

Экспериментальное определение момента зарождения трещины в стандартных образцах Шарпи и образцах с боковыми надрезами

Е. А. Кондряков, А. В. Панасенко, В. В. Харченко

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

Приведены результаты исследований момента зарождения трещины при испытаниях на ударный изгиб. Разработана методика регистрации момента зарождения трещины с использованием тензорезисторов. Методика опробована на стандартных образцах Шарпи и образцах с боковыми надрезами. Проведено сравнение диаграмм сигнала датчиков и диаграмм нагружения с результатами фрактографических исследований изломов образцов.

Ключевые слова: образец Шарпи, образец с боковыми надрезами, инструментированный копер, момент зарождения трещины.

Введение. Корректное обоснование прочности и долговечности элементов оборудования 1-го контура АЭС обусловлено совершенствованием нормативной базы относительно механических характеристик материалов в эксплуатационных условиях.

Существующие в настоящее время методики оценки радиационного охрупчивания металла различаются способом обработки данных испытаний образцов-свидетелей (ОС) [1–3]. Ограниченное количество испытаний ОС, особенно при высоком уровне флюенса, и дефицит облученного металла приводят к значительным отклонениям в прогнозах изменения свойств материалов под воздействием охрупчивающих факторов по различным методикам. Решение данной проблемы состоит в повышении информативности каждого испытания, развитии новых методов испытаний и совершенствовании известных экспериментальных методик. Особое внимание уделяется определению характеристик трещиностойкости по результатам ударных испытаний образцов Шарпи.

Описанная в данной работе модернизация экспериментального оборудования позволяет существенно повысить информативность ударных испытаний стандартных образцов Шарпи и образцов с боковыми надрезами.

Использование тензорезисторов и современных высокоскоростных систем регистрации, реализованных в вертикальном инструментированном копре, позволяет повысить точность исследований и получаемый при испытании объем данных о процессе разрушения. Путем сравнения диаграмм нагружения в координатах усилие P – время t , построенных при контакте ударника с образцом при испытаниях на ударный изгиб, с результатами фрактографических исследований можно получить дополнительную информацию о механизмах распространения трещины в образце Шарпи.

Методика испытаний и обработки результатов. Согласно существующим методикам для определения характеристик трещиностойкости по результатам испытаний на ударный изгиб образцов Шарпи необходимо знать момент зарождения трещины. Обычно предполагают, что он соответствует максимальному усилию на диаграмме нагружения [4]. Однако некоторые исследователи полагают, что момент зарождения трещины наступает значительно раньше [5].

В данной работе описаны методика фиксирования момента зарождения трещины и особенности ее распространения в образцах Шарпи и образцах с глубокими боковыми надрезами при испытаниях на ударный изгиб на вертикальном инструментированном копре. Схема, принципы работы экспериментального оборудования и

методика проведения таких испытаний приведены ранее [6]. Материал образцов – горячекатаная сталь 45. Структура стали – ферритно-перлитная смесь, фазы феррита и перлита представлены в виде отдельных зерен (колоний). Средний диаметр зерен феррита составляет 35 мкм, перлита – 54 мкм. Для структуры материала характерна сильно выраженная текстурированность.

На основе нормативных документов [7, 8] была разработана методика определения момента зарождения трещины в образцах Шарпи при испытаниях на ударный изгиб. Согласно данной методике на образце вблизи вершины надреза крепился датчик деформации, не требующий калибровки. Начало распространения трещины определяется по резкому падению (по крайней мере на 20%) сигнала датчика на диаграмме в координатах электрическое напряжение U – время t .

Датчики располагали на поверхности образцов вблизи V-образного концентратора вдоль предполагаемого фронта распространения трещины (рис. 1). Маркировка образцов: буквой “С” обозначены образцы Шарпи, буквой “S” – образцы с боковыми надрезами. Каналы регистрации сигнала датчика на образце и на ударнике были синхронизированы по времени. Дискретность сигнала по времени составляет $2 \cdot 10^{-7}$ с (частота отклика 5000000 Гц).

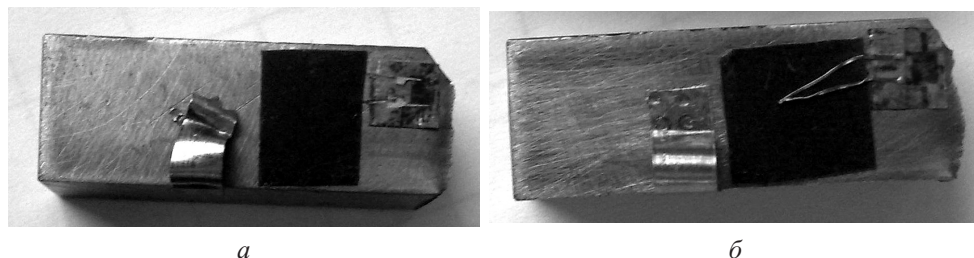


Рис. 1. Вид образцов с датчиками деформации: *a* – образец С-1; *б* – образец С-2.

Результаты испытаний. На рис. 2 приведены синхронизированные диаграммы сигнала датчика и нагружения для образцов С-1 (температура испытаний $T = 25^\circ\text{C}$) и С-2 ($T = 35^\circ\text{C}$). Максимальное напряжение на диаграмме сигнала датчика располагается по времени вблизи начала резкого спада усилия на диаграмме нагружения. Аналогичный характер имеют диаграммы для образца С-2 (рис. 2, *б*), за исключением того, что максимум на диаграмме сигнала датчика сдвинут вправо по сравнению с точкой начала участка резкого падения усилия на диаграмме нагружения, в то время как для образца С-1 он сдвинут влево. При повышении температуры испытаний наблюдается тенденция к сдвигу максимума на диаграмме сигнала датчика преимущественно влево в направлении максимума на диаграмме нагружения.

На макрофрактограммах каждого из образцов можно наблюдать характерные зоны: стабильного подрастания и нестабильного проскока трещины; долома и губ среза. На рис. 3 приведена макрофрактограмма образца С-1. С точки зрения анализа физического смысла диаграммы сигнала датчика необходимо отметить, что существенной особенностью изломов образцов Шарпи является форма зоны стабильного подрастания – она имеет вид вытянутого треугольника или трапеции с максимальной протяженностью (по направлению распространения магистральной трещины) в центральной части образца и минимальной (часто близкой к нулю) на краях излома, т.е. вблизи его боковых поверхностей (зоны губ среза). Таким образом зарождение трещины происходит внутри образца с последующим выходом на поверхность, что сопровождается интенсивным деформированием боковых граней образца и появлением на них утяжек (губы среза). При этом датчик в большей степени реагирует на

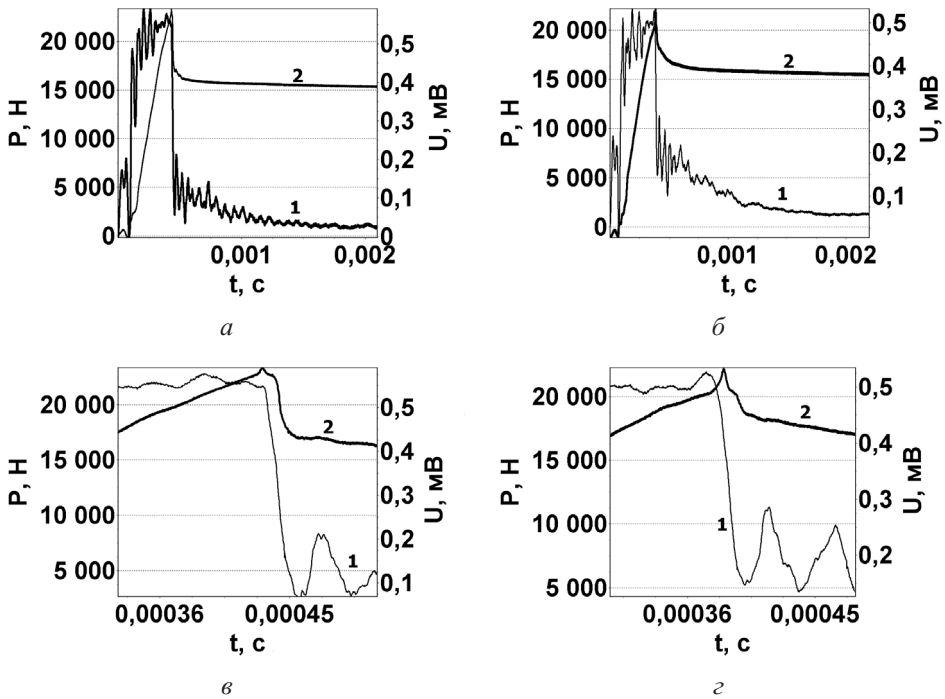


Рис. 2. Диаграммы нагружения (1) и сигнала датчика (2): а – образец С-1; б – образец С-2; в, г – увеличение масштаба участка резкого падения усилия на диаграмме нагружения для образцов С-1 и С-2 соответственно.

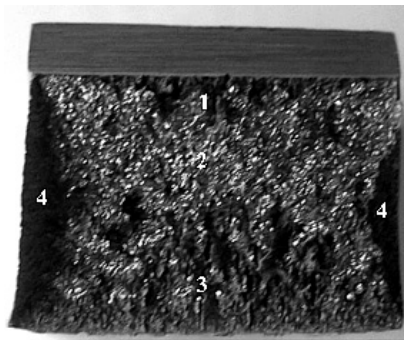


Рис. 3. Макрофрактограмма образца С-1: 1, 2 – зоны стабильного подрастания и нестабильного проскока трещины; 3 – зона долома; 4 – губы среза.

деформацию поверхности образца, чем на момент зарождения трещины. При такой форме и размерах трещины затруднительным представляется возможность регистрации датчиком момента ее зарождения.

Этим можно объяснить тот факт, что максимум на диаграмме сигнала датчика не совпадает с максимумом на диаграмме нагружения, а смещен вправо по времени.

Для подтверждения данного предположения были проведены дополнительные испытания с деформированием образцов Шарпи без инициирования и с инициированием трещины.

Путем варьирования высотой падения ударника были подобраны скорости его падения в момент контакта с образцом, при которых он деформировался без зарождения трещины.

При скорости падения ударника $V = 1,4$ м/с трещина инициировалась в центральном сечении образца С-3 (рис. 4). На диаграмме нагружения хорошо виден участок резкого падения усилия в момент зарождения и распространения хрупкой трещины в центральном сечении образца. Из рис. 5 следует, что трещина зарождается в центральном сечении образца (максимальное раскрытие трещины составляет около 1 мм в центральном сечении) и не выходит на боковую поверхность. Диаграмма сигнала датчика имеет максимум, смещенный влево по отношению к максимуму на диаграмме нагружения. Таким образом, в данном случае датчик регистрирует деформацию на поверхности образца, но не регистрирует зарождение стабильной вязкой трещины внутри него, поскольку ее берега не вышли на его боковые поверхности. На диаграмме нагружения отсутствует участок резкого спада усилия, свидетельствующий о распространении в образце хрупкой нестабильной трещины.

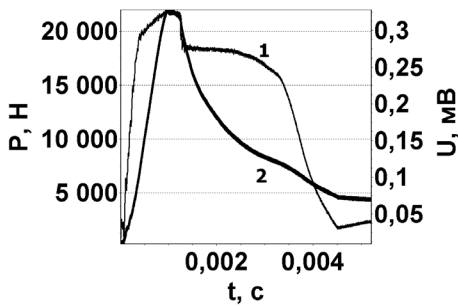


Рис. 4

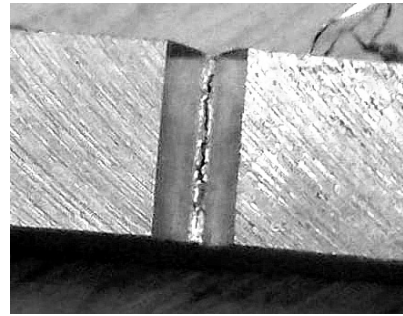


Рис. 5

Рис. 4. Диаграммы нагружения (1) и сигнала датчика (2) для образца С-3, скорость ударника $V = 1,4$ м/с.

Рис. 5. Трещина в образце С-3, скорость ударника $V = 1,4$ м/с.

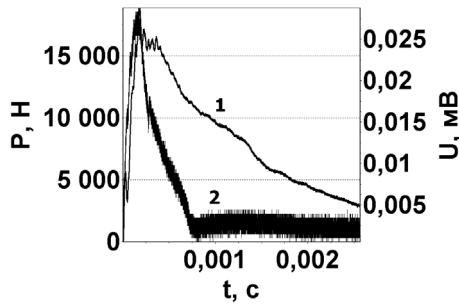


Рис. 6. Диаграммы нагружения (1) и сигнала датчика (2) для образца С-3, скорость ударника $V = 3$ м/с.

В дальнейшем образец был разрушен при скорости ударника $V = 3$ м/с. Диаграмма его разрушения приведена на рис. 6. Видно, что на диаграмме нагружения отсутствует участок деформации/зарождения трещины, т.е. начальный участок имеет вид прямой линии (упругая деформация) с незначительными колебаниями. Это связано с наличием в образце С-3 инициированной трещины.

Проведенные исследования показывают, что методика определения момента зарождения трещины имеет ряд недостатков, связанных в первую очередь с образованием боковых утяжек. Для получения более точных результатов были проведены испытания образцов с глубокими боковыми надрезами с целью исключения влияния деформирования их боковой поверхности на показания датчика. Данный тип образцов предложен ЦНИИ КМ “Прометей” [3] (рис. 7).

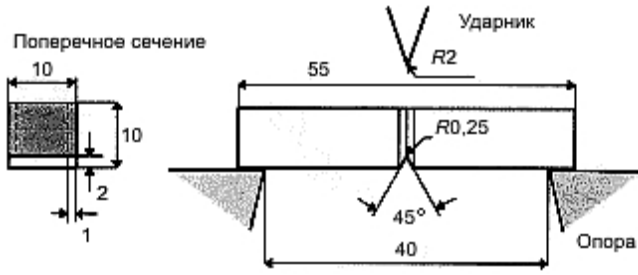


Рис. 7. Образец с глубокими боковыми надрезами.

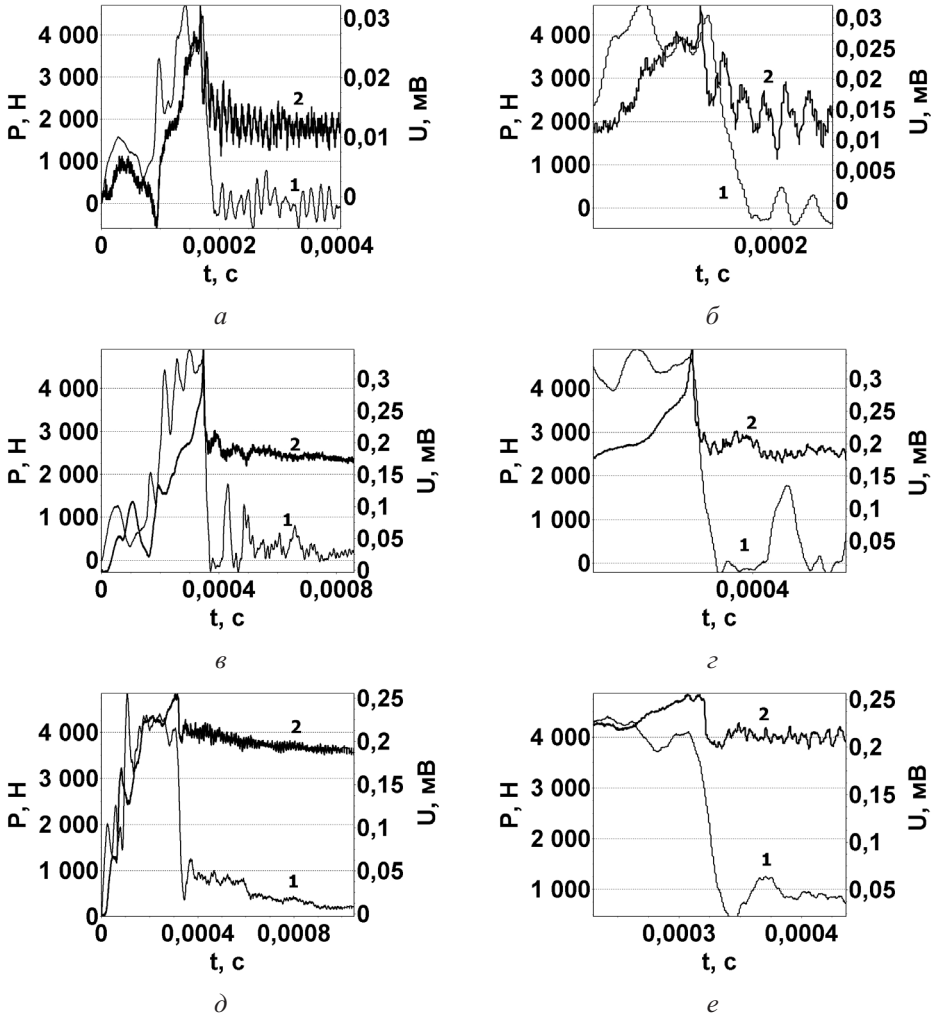


Рис. 8. Сравнение диаграмм нагружения (1) и диаграмм сигнала датчиков (2), полученных для разных образцов и температур испытания: а, б – образец S-1 ($T = 12^{\circ}\text{C}$); в, г – образец S-2 ($T = 55^{\circ}\text{C}$); д, е – образец S-3 ($T = 80^{\circ}\text{C}$).

Момент зарождения трещины в образцах с глубокими боковыми надрезами определялся по описанной выше методике. Датчик деформации крепился на боковую поверхность образца возле надреза параллельно предполагаемой траектории распространения трещины.

На рис. 8 представлены характерные диаграммы сигнала датчика и диаграммы нагружения образцов с боковыми надрезами при различных температурах. Участок монотонного роста сигнала датчика на диаграмме обусловлен накоплением упругой деформации образца в момент его контакта с ударником копра. Момент зарождения трещины на диаграмме сигнала датчика определяется по моменту резкого падения усилия после его монотонного роста, что свидетельствует об освобождении боковой поверхности образца от упругой деформации вследствие распространения трещины в его поперечном сечении.

Следует отметить, что наличие боковых надрезов позволяет избежать негативного влияния эффекта образования боковых утяжек на показания датчика. Таким образом датчик фиксировал лишь изменение упругой деформации на боковой поверхности образца с последующей разгрузкой берегов трещины при ее распространении после контакта ударника с образцом.

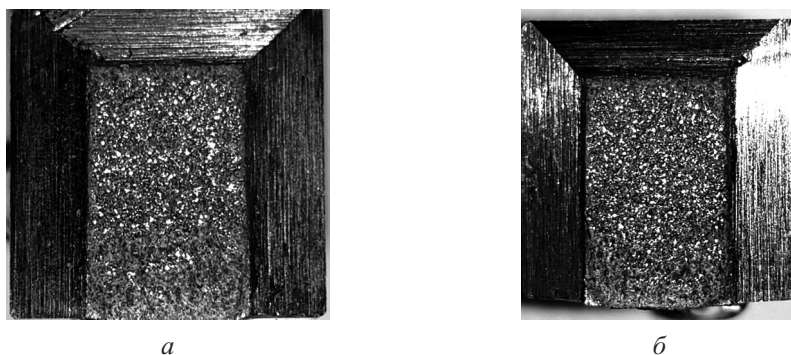


Рис. 9. Макроизломы образцов S-2 (а) и S-3 (б) с глубокими боковыми надрезами.

Из рис. 8 видно, что момент зарождения трещины для всех образцов отмечается вблизи начала участка резкого падения усилия из-за нестабильного распространения трещины в образце. Анализ изломов показывает, что фронт трещины в образцах с боковыми надрезами является равномерным (рис. 9).

Выводы

1. Разработана и опробована методика определения момента зарождения трещины в образцах Шарпи и образцах с боковыми надрезами при испытаниях на ударный изгиб на вертикальном инструментированном копре.
2. Сравнение диаграмм нагружение–сигнал датчика с результатами фрактографических исследований с учетом данных по определению момента зарождения трещины позволяет более точно сопоставить участки на диаграмме нагружения с характерными зонами излома.
3. Подтверждено, что трещина в образце Шарпи при испытании на ударный изгиб зарождается в его центральном сечении.
4. Описанную методику определения момента зарождения трещины более корректно использовать на образцах с боковыми надрезами из-за отсутствия влияния боковых утяжек на показания датчиков.

Резюме

Наведено результати досліджень моменту зародження тріщини при випробуваннях на ударний згин. Розроблено методику реєстрації моменту зародження тріщини з використанням тензорезисторів. Методику опробовано на стандартних зразках Шарпі

та зразках із боковими надрізами. Проведено порівняння діаграм сигналу датчиків і діаграм навантаження з результатами фрактографічних досліджень злому зразків.

1. ПНАЭ Г-7-008-89. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 168 с.
2. *Unified Procedure for Lifetime Assessment of Components and Piping in WWER NPPs (“VERLIFE”)* / European Commission under the Euratom Research and Training Programme on Nuclear Energy. – Version 8. – 2008. – 275 p.
3. РД ЭО 1.1.2.09.0789-2009. Метод определения вязкости разрушения для оценки целостности и срока службы корпусов реакторов типа ВВЭР-1000 с использованием результатов испытаний образцов-свидетелей. – ОАО “Концерн Энергоатом”. – 2009. – 61 с.
4. *Schindler H. J.* Estimation of the dynamic J - R -curve from a single impact bending test // 11th Eur. Conf. on Fracture (Sept. 3–6, 1996). – Poitiers, France, 1996. – P. 2007 – 2012.
5. *Chaouadi R. and Puzzolante J. L.* Crack resistance determination from the Charpy impact test // 16th Eur. Conf. on Fracture (July 3–7, 2006). – Alexandroupolis, Greece, 2006. – 13 p.
6. Харченко В. В., Кондряков Е. А., Жмака В. Н., Бабуцкий А. А. Инструментированный копер для ударных испытаний: основные элементы, анализ работоспособности // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 2006. – № 27. – С. 121–130.
7. *ASTM E1820-01.* Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness // Annual Book of ASTM Standards. – Vol. 03.01. – ASTM International, West Conshohocken, PA, 1998. – 46 p.
8. *Proposed Standard Methods for Instrumented Precracked Charpy Impact Testing of Steels and Other Metallic Materials* // ESIS Procedure P7-00, Draft 25.4: December 2005.

Поступила 23. 03. 2015