

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИНЫ В СТАЛЯХ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ОБРАЗЦОВ ШАРПИ И ДИСКОВЫХ ОБРАЗЦОВ

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

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

Разработана экспериментальная методика для исследования распространения и остановки трещин в образцах Шарпи при ударном нагружении и в дисковых образцах при термошоке. По результатам экспериментального и численного моделирования определены скорости распространения трещины в исследуемых образцах. Проведены металлографические исследования боковых поверхностей и фрактография изломов дисковых образцов и образцов Шарпи. Установлена корреляционная взаимосвязь между величиной мгновенной скорости распространения трещины в сечении дискового образца под действием градиента температур в условиях термошока и площадью локальных проскоков трещины на изломе дискового образца. Проведено сопоставление участков диаграмм «усилие–перемещение» и параметров характерных зон изломов образцов Шарпи.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одной из актуальных проблем атомной промышленности является продление ресурса корпусов реакторов АЭС. В ряде нормативных документов [1, 2] приводятся методики, которые учитывают распространение и остановку трещины. В связи с поиском дополнительных резервов прочности развиваются и совершенствуются различные численные и экспериментальные методики анализа поведения конструктивных элементов с трещинами при термошоке, включая распространение и остановку трещины. Проведение полунатурных испытаний, которые используются для изучения таких процессов, связано со значительными затратами и не дают возможности полностью оценить многие факторы, которые влияют на поведение материала при распространении трещины (например, испытания в рамках международного проекта NESK-1 [5]). Поэтому в последнее время разрабатываются методы испытания малоразмерных образцов (образцы Шарпи, СТ-образцы, дисковые образцы с трещиной) [3,4]. Такие испытания являются сравнительно простыми и недорогими, а также позволяют получить большое количество информации об особенностях распространения и остановки трещины.

В данной работе приведено сопоставление результатов экспериментального моделирования распространения и остановки трещины в образцах Шарпи при ударном нагружении и в дисковых образцах при термошоке и результатов металлографических и фрактографических исследований поверхностей изломов образцов. Исследования проводились на образцах из стали 45 и реакторной стали 15X2НМФА.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В Институте проблем прочности была разработана экспериментальная методика проведения испытаний дисковых образцов с трещиной при термошоке. Для испытаний был выбран дисковый образец с размерами $d_1 = 60$ мм, $d_2 = 110$ мм, $h = 10$ мм. Исследовались стали 45 и 15X2НМФА. На внешней стороне образца

выращивалась усталостная трещина длиной $l_{tr} \approx 13$ мм с помощью современной резонансной испытательной машины «Testronic» производства швейцарской фирмы RUMUL.

Экспериментальные исследования проводились на установке FP-100, оборудованной системами нагрева и охлаждения образцов, а также контроля температуры. Эксперимент проводился в следующей последовательности. После подготовки образца к испытанию (приварки термопар, наклейки тензорезисторов, и т. д.) он помещался в холодильную камеру, в которой охлаждался до температуры $T = -210$ °С, после чего устанавливался на теплостойкую подложку и подвергался воздействию высоких температур путем заливки во внутреннюю полость перегретого до температуры ~ 900 °С жидкого свинца. Предложенная методика позволила достичь требуемого градиента температур и инициировать продвижение трещины как на образцах из углеродистой стали 45, так и легированной теплостойкой стали 15X2НМФА.

Температура поверхности образца контролировалась термопарами и автоматической системой регистрации, описанными ниже. Плавление металла, необходимого для создания термошока, происходило в специальном тигле, помещенном в штатную печь установки FP-100. Температура расплава контролировалась хромель-алюмелевой термопарой. По результатам экспериментов были получены данные об изменении температуры на внешней и внутренней поверхности дискового образца, а также в вершине трещины. Эти результаты были использованы в расчетах для определения условий термосилового нагружения [6].

Для регистрации скорости распространения трещины в образце использовались датчик I-RDS22 фирмы НВМ, специально разработанный датчик на основе тензорезисторов КФ-5 и быстродействующий многоканальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) Adlink-9812, максимальная частота преобразований которого составляет 20×10^6 измерений в секунду. Датчики наклеивались в месте прогнозируемого распространения трещины. По мере прохождения

трещины проводники датчика разрушаются, и соответственно изменяется его сопротивление. Зафиксировав процесс изменения сопротивления датчика, определялись следующие параметры распространения трещины: место и время старта и остановки трещины; скорость распространения трещины с дискретностью, соответствующей времени преобразования АЦП Adlink-9812 и расстоянию между проводниками датчика.

Были проведены испытания дисковых образцов с трещиной из сталей 45 и 15Х2НМФА. Получены данные об изменении температуры на поверхности образца в разных точках и скорости распространения трещины.

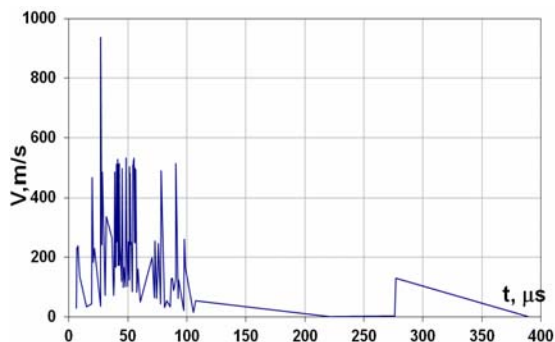


Рис. 1. Зависимость скорости распространения трещины от времени в дисковом образце из стали 45

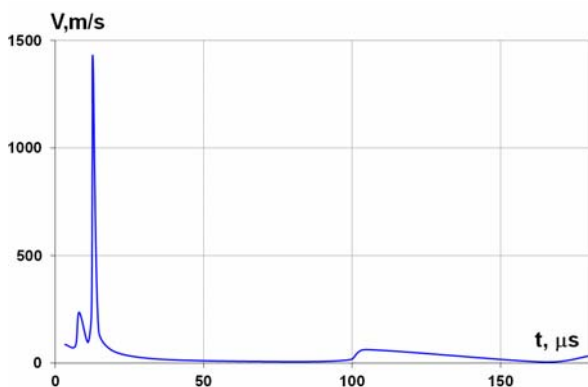


Рис. 2. Зависимость скорости распространения трещины от времени в образце Шарпи

МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРЕЩИНЫ НА ПОВЕРХНОСТИ ДИСКОВЫХ ОБРАЗЦОВ

Металлографические исследования структур, особенностей зарождения, распространения и остановки трещин, видимых на поверхности образцов, проводились на оптическом микроскопе прямого типа Carl Zeiss Axiotech-Vario, который оснащен объективами Carl Zeiss Epiplan, позволяющими проводить наблюдения объектов при увеличениях 25x/100x/500x в режимах темного и светлого полей. Микроскоп также оснащен камерой Canon PowerShot G9, позволяющей получать цифровые изображения объектов с высоким разрешением (4000x3000).

На начальном этапе происходит медленный подрос трещины с последующим резким скачком до уровня ~ 1000 м/с, а затем скорость трещины понижается до уровня 300 м/с и практически не изменяется до остановки (рис. 1). Такой характер изменения скорости распространения трещины согласуется с результатами численного моделирования [6], а также с результатами подобных испытаний других авторов [3, 4].

Описанная выше методика была также использована для регистрации скорости распространения трещины в образцах Шарпи при ударном нагружении. Испытания на ударный изгиб проводились на вертикальном инструментированном копре, спроектированном и изготовленном в Институте проблем прочности им. Г.С. Писаренко [7]. При испытаниях на ударный изгиб использовались стандартные образцы Шарпи из стали 45.

С помощью специальных разрывных датчиков, согласно методике, описанной выше, были определены зависимости скорости распространения трещины от её длины и времени в образцах Шарпи (рис. 2). Кроме этого, регистрировалось изменение усилия на ноже в процессе испытания. Регистрация данных проводилась синхронно, т.е. можно было увидеть, как изменяется скорость распространения трещины на различных участках диаграммы усилие–время $P(t)$. Всего было испытано 12 образцов (рис. 3).

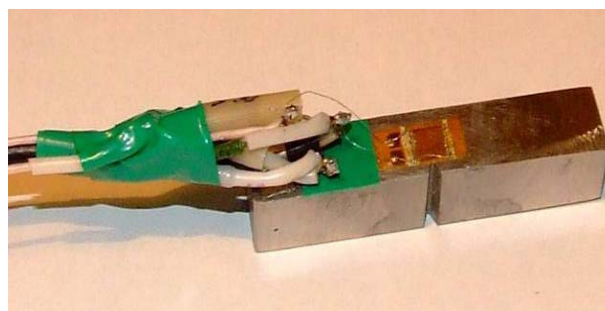


Рис. 3. Вид образца Шарпи, подготовленного к испытаниям

Панорама трещины на поверхности дискового образца после испытания на термошок приведена на рис. 4. Измерения параметров трещин образцов проводились на каждом этапе испытаний – при выращивании усталостных трещин и после испытаний на термошок. На поверхности дисковых образцов после испытания на термошок наблюдались характерные зоны – зона концентратора, зона предварительно выращенной усталостной трещины, зона проскока трещины при термошоке и зона от вершины остановившейся трещины до внутреннего края (рис. 4, 6). Статистическая обработка результатов металлографических исследований дисковых образцов позволила выявить закономерности распространения и остановки трещин при термошоке.



Рис. 4. Панорама трещины на поверхности дискового образца после испытания на термошок: 1 – концентратор; 2 – усталостная трещина; 3 – проскок трещины при термошоке и ее остановка

Для анализа влияния различных факторов на особенности и детали распространения трещин при термошоке образцы были сгруппированы на 3 группы по уровню градиента температур: градиент 1 (95...110 °С), градиент 2 (170...210 °С), градиент 3 (250...280 °С). Наблюдается слабая тенденция к увеличению суммарной (длина усталостной трещины + длина проскока при термошоке) длины трещины при возрастании градиента температур от 100 до 350 °С. В диапазоне градиента температур 90...210 °С на пяти из испытанных в данном диапазоне градиентов температур образцах наблюдался проскок только на одном из двух концентраторов. Можно сделать вывод, что вероятность проскока трещины при термошоке значительно снижается с уменьшением величины градиента температур на внешней и внутренней поверхностях образцов. Величины проскоков трещины возрастают при увеличении градиента температур.

Главным фактором, влияющим на величину проскока при термошоке, является величина градиента температур. Однако детальный анализ соотношений «величина проскока–градиент температур» и «расстояние от вершины трещины–градиент температур» указывает на существование дополнительных факторов, влияющих на величину проскока трещины при термошоке. Такими дополнительными факторами являются размер дефекта, инициирующего проскок трещины при термошоке (длина предварительно выращенной усталостной трещины) и распределение температур в зоне страгивания трещины при термошоке (в области около вершины усталостной трещины). У образцов всех трех уровней градиента температур

наблюдается тенденция к уменьшению величины проскока трещины при термошоке с увеличением длины предварительно выращенной усталостной трещины. Данный эффект предположительно объясняется тем, что суммарная длина трещины является приблизительно постоянной величиной для конкретного значения градиента температур – трещина останавливается в области повышенной температуры вблизи внутреннего края (и соответственно с большим значением вязкости разрушения) на расстоянии от 1 до 10 мм от внутреннего края образца.

Наибольшие значения проскока трещины наблюдались на образцах стали 45. Образцы стали 45 листового проката имеют наибольший разброс значений параметров трещин после термошока, что объясняется влиянием текстурированности структуры стали 45 на распространение трещины при термошоке. Результаты измерений параметров трещин образцов стали 45 круглого сортового проката имеют большую однородность и меньший разброс значений.

Важным параметром, описывающим распространение трещины, является ее раскрытие [8, 9]. Раскрытие трещины является параметром, описывающим степень пластической деформации в зоне у вершины трещины. Раскрытие трещины измерялось около концентратора до и после испытаний на термошок. Раскрытие усталостной трещины у надреза для всех групп образцов не превышало 2 мкм. После термошоковых испытаний берега трещин у надреза раскрывались до величины 5...50 мкм.

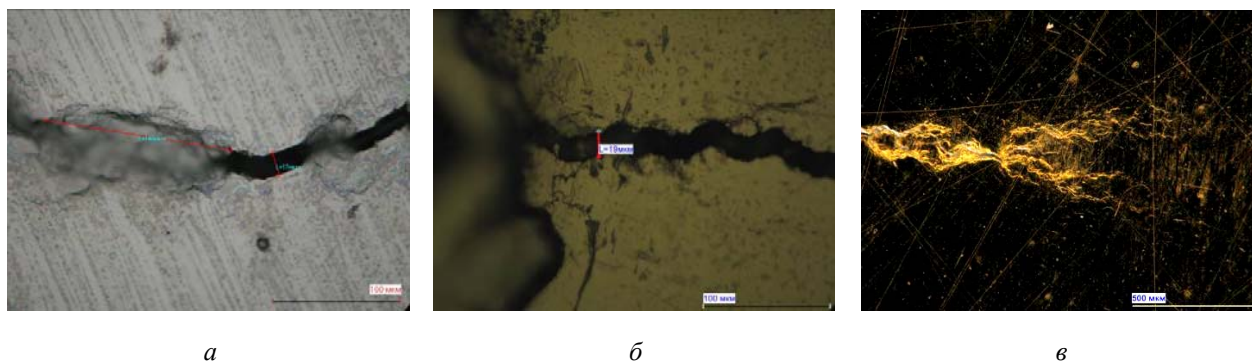


Рис. 5. Особенности распространения трещины под действием градиента температур в условиях термошока: а – чередование зон пластической деформации и хрупких проскоков на берегах трещины, 500 х; б – раскрытие трещины у надреза, 500 х; в – ветвление трещины при ее остановке, 100 х, темное поле

Металлографические исследования показали, что раскрытие трещины у надреза слабо зависит от градиента температур, но связано с величиной проскока трещины при термошоке. Наблюдается прямо пропорциональная зависимость между величинами раскрытия трещины у надреза и проскока трещины при термошоке. Таким образом, величина раскрытия трещины у надреза показывает степень пластической деформации у вершины трещины во время распространения трещины при термошоке.

На рис. 5 приведены характерные особенности распространения трещины при термошоке, наблюдаемые на поверхности дискового образца: раскрытие трещины; наличие зон интенсивной пластической деформации, чередующихся с зонами хрупких проскоков; ветвление трещины, предвещающее ее остановку.

ФРАКТОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗЛОМОВ ДИСКОВЫХ ОБРАЗЦОВ И ОБРАЗЦОВ ШАРПИ

Исследования микромеханизмов разрушения образцов проводились на растровом электронном микроскопе РЭМ-100У. Макроизображения изломов после раскрытия показаны на рис. 6.

Фрактографические исследования позволили выявить в изломах наличие трех характерных зон:

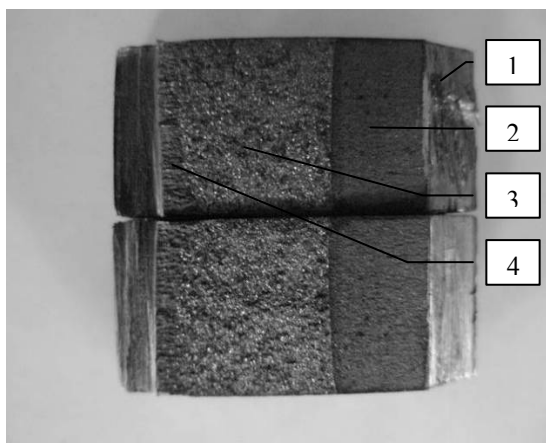


Рис. 6. Излом дискового образца после термошока: 1 – концентратор; 2 – зона усталостной трещины; 3 – зона проскока трещины при термошоке; 4 – зона долома

При детальном рассмотрении панорам изломов на изображениях фрактограмм были обнаружены области с высокой степенью однородности по яркости. Данные объекты представляют собой группы фасеток скола и квазискола (см. рис. 3). Размеры подобных объектов изменяются по пути распространения трещины в широких пределах – от нескольких десятков до нескольких сотен микрометров, при этом размеры наиболее крупных групп значительно превышают средний размер зерен в материале (протяженность наиболее крупных областей составляет ~ 200 мкм (см. рис. 7), средний диаметр зерен феррита в стали – 45...26 мкм, средний диаметр колоний перлита – 45 мкм, средний диаметр исходного зерна аустенита

1 – концентратор, 2 – зона предварительно выращенной усталостной трещины; 3 – зона проскока трещины при термошоке; 4 – зона вязкого долома. Механизм распространения трещины при испытаниях на термошок идентифицируется как квазискольный. На всем протяжении зоны 3 от места иницирования трещины при термошоке (вершины усталостной трещины) до места остановки (вязкого долома) не наблюдается изменения механизма распространения трещины. На изломе присутствуют характерные для данного механизма распространения трещины детали – фасетки скола и квазискола, гребни отрыва, ступеньки скола, формирующие ручьи рельефа (рис. 7). Методами растровой электронной микроскопии формируются изображения излома при высоких увеличениях. На таких изображениях (фрактограммах) присутствуют объекты – области изображения, являющиеся проекциями реальных пространственных особенностей рельефа и структуры излома. Выделяя подобные объекты на фрактограммах и анализируя их параметры методами количественной фрактографии, можно получить дополнительную информацию об особенностях зарождения, распространения и остановки трещины при данном конкретном типе разрушения.

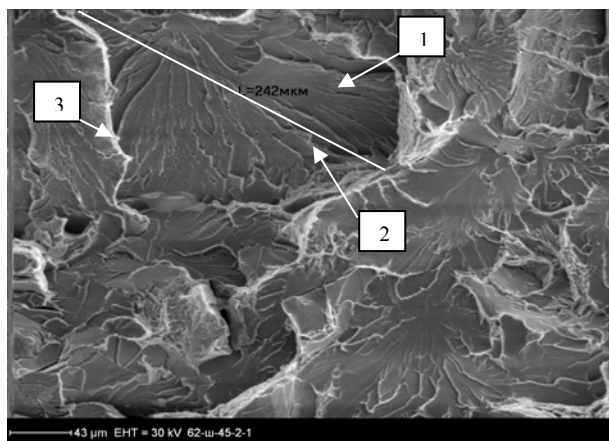


Рис. 7. Особенности строения излома в зоне проскока трещины при термошоке: 1 – след локального проскока трещины при термошоке; 2 – ступенька скола; 3 – гребень отрыва

в стали 15X2НМФА – 82 мкм). Представляется вероятным, что такие скопления фасеток являются следами локальных хрупких проскоков трещины при термошоке, объединяющие в себе фасетки квазискола приблизительно одной кристаллографической ориентации (близкой к семейству плоскостей скола – (100) для ОЦК-металлов), принадлежащие одному или нескольким соседним зернам. Соответственно должна существовать корреляционная зависимость между размерами локальных проскоков трещины, наблюдаемых на изломе по пути распространения трещины, и скоростью распространения трещины на данных участках образца.

Как уже было отмечено, подобные следы локальных проскоков трещины являются областями большей или меньшей степени однородности по яркости и могут являться объектами для выделения по алгоритмам сегментационного (кластерного) анализа. На границах подобных объектов наблюдается значительное изменение градиента яркости, связанное с присутствием иных деталей изломов, являющихся характерными для распространения трещины по механизму квазискола – ступеньками скола и гребнями отрыва.

Для получения количественных характеристик объектов, наблюдаемых на изломе, была

разработана методика исследований излома, детальное описание которой приведено в [10]. На рис. 8 приведен пример обработки фрагмента панорамы: на рис. 8,а представлено исходное изображение фрагмента, на рис. 8,б – изображение масок объектов в режиме цветокодирования, выделенных на изображении после обработки описанным выше алгоритмом сегментационного анализа. Для каждого фрагмента была рассчитана координата на изломе (x) – расстояние от места срагивания трещины при термошоке (границы с усталостной зоной).

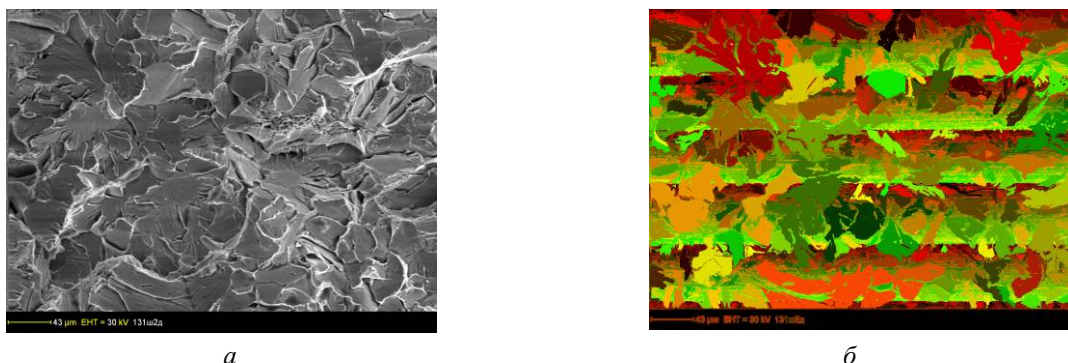


Рис. 8. Фрактограммы излома дискового образца в зоне проскока трещины при термошоке, сталь 20: а – локальные проскоки трещины, образованные группами фасеток квазискола, и группа ямок вязкого разрушения; б – иллюстрация результата обработки фрактограммы по алгоритму сегментации в режиме цветокодирования

Для каждой панорамы излома образца был построен график зависимости средней площади локальных проскоков $\bar{S}(x)$ от координаты по направлению развития магистральной трещины. На

рис. 9 приведены результаты сравнения измерений скорости распространения трещины при термошоке при помощи датчиков на поверхности образцов с результатами анализа по описанной методике.

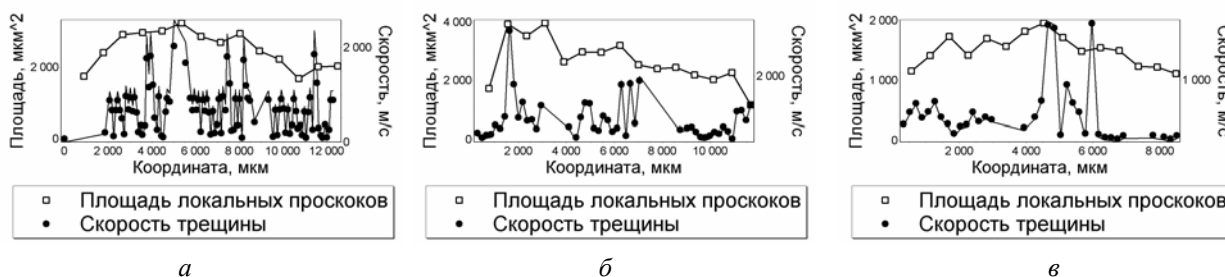


Рис. 9. Сравнение результатов анализа фрактограмм изломов и результатов измерения скорости распространения трещины при термошоке: а – сталь 45, листовой прокат; б – сталь 45, круглый прокат; в – сталь 15X2HMFA

СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИЗА ДИАГРАММ «УСИЛИЕ–ПЕРЕМЕЩЕНИЕ» И РЕЗУЛЬТАТОВ ФРАКТОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОБРАЗЦОВ ШАРПИ

С целью детального изучения особенностей зарождения/распространения трещины в вязко-хрупком переходе были проведены испытания на ударный изгиб образцов Шарпи-V (материал сталь 45, листовой прокат). Образцы были разделены на две группы по ориентации V-образного концентратора относительно проката. Каждый

образец был оснащен разрывным датчиком, регистрирующим распространение вершины трещины на поверхности образца. По результатам измерений были построены диаграммы изменения скорости распространения трещины по времени и по координате, определены средние и максимальные скорости распространения трещины.

Анализ диаграмм «усилие–перемещение» позволил получить информацию об энергии зарождения/распространения трещины в характерных зонах, наблюдаемых на изломах образцов. На изломах присутствуют характерные зоны (рис. 10), связанные с последовательными

этапами распространения трещины при испытании образцов на ударный изгиб [11-14]:

- 1 – зона стабильного подраста трещины;
- 2 – зона нестабильного проскока трещины;
- 3 – зона долома;
- 4 – области поперечной деформации (губы среза).

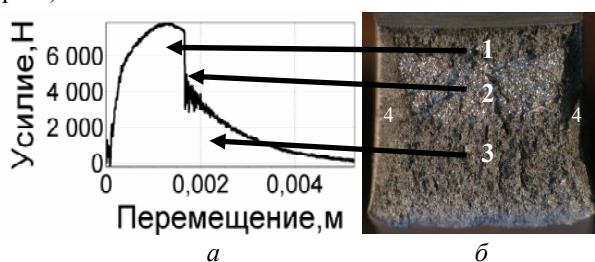


Рис. 10. Сопоставление участков диаграмм «усилие–перемещение», полученных при испытаниях на ударный изгиб, и характерных зон излома образца Шарпи: а – диаграмма «усилие–перемещение»; б – излом образца Шарпи; 1 – зона стабильного подрастания трещины, 2 – зона нестабильного проскока трещины, 3 – зона долома, 4 – губы среза

Площади и линейные размеры характерных зон изломов образцов Шарпи определены методами количественной фрактографии по оптическим

фрактограммам изломов. Сопоставление энергий распространения трещины в зонах излома и размеров зон (см. рис. 10) позволило оценить удельные энергии распространения трещины в этих зонах.

Под удельной энергией распространения трещины в зоне излома подразумевается энергия, затрачиваемая на распространение трещины в данной зоне. В зависимости от механизма разрушения (вязкий транскристаллитный разрыв, квазихрупкий транскристаллитный скол, хрупкий транскристаллитный скол, вязкое межзеренное разрушение, хрупкое межзеренное разрушение), обуславливаемого внешними (температура, приложенное усилие, скорость нагружения) и внутренними (структура материала) факторами, энергия, затрачиваемая на распространение трещины, будет изменяться в широких пределах. В данной работе приведены оценки удельных энергий распространения трещины в зонах изломов образцов, отличающихся по механизму разрушения.

Характер разрушения в зоне стабильного подраста трещины и в зоне долома – вязкий, механизм распространения трещины – ямочный разрыв (зарождение, рост и коалесценция вязких пор) (рис. 11).

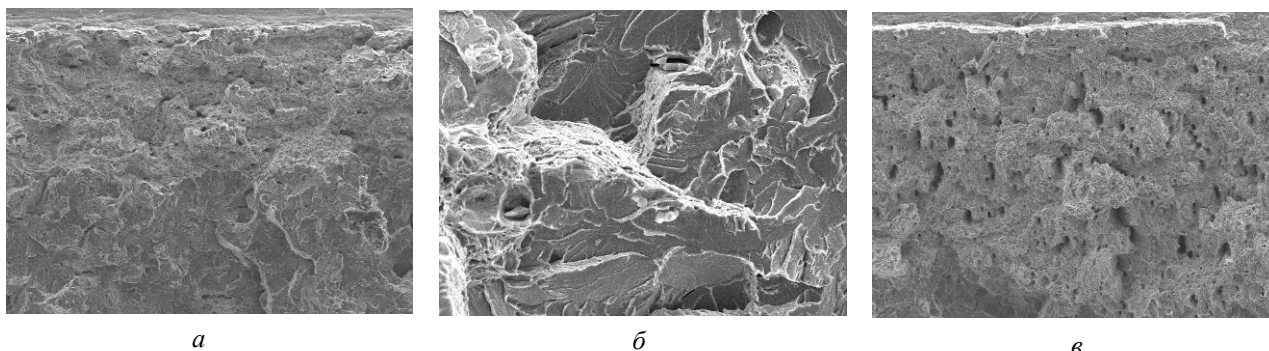


Рис. 11. Фрактограммы участков характерных зон изломов, 800х: а – участок зоны стабильного подраста; б – участок зоны нестабильного проскока; в – участок зоны долома

Характер разрушения в зоне нестабильного проскока – хрупкий, механизм распространения трещины – транскристаллитный квазискол. Распространение фронта трещины происходило по плоскостям с ориентацией, близкой к (100) [15]. На изломе присутствуют элементы вязкости в виде гребней отрыва, язычков скола и ручьистого

рельефа, связанного с переходом трещины с одной плоскости скола на параллельную ей, при пересечении фронтом распространяющейся трещины дефекта в виде винтовой дислокации или дислокационной петли [15]. В хрупкой зоне разрушения присутствуют отдельные изолированные группы вязких ямок разрыва.

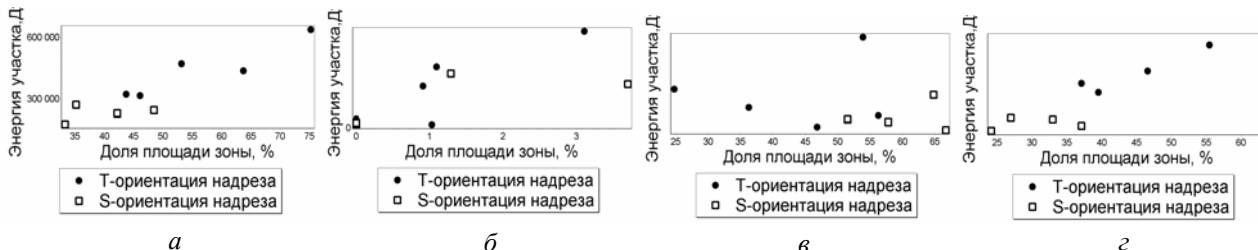


Рис. 12. Соотношения между энергиями участков диаграммы «усилие–перемещение» и площадью характерных зон изломов: а – KCV – доля вязкого разрушения; б – энергия 2 участка диаграммы – доля зоны стабильного подрастания; в – энергия 3 участка диаграммы – доля зоны нестабильного проскока; г – энергия 4 участка диаграммы – доля зоны долома

На рис. 12 приведены графики соотношений энергий участков диаграммы «усилие–перемещение» и долей площади характерных зон излома. Просматривается определенная пропорциональная зависимость между этими величинами. Разброс значений и отклонение от средней линии регрессии можно объяснить неоднородностью структуры горячекатаной стали. На изломах образцов наблюдаются вторичные трещины расслоений, ориентированных перпендикулярно плоскости магистральной трещины и в направлении проката (рис. 13).

Вторичные трещины расслоения вносят существенный вклад в поглощение энергии удара ножа, что отображается в виде увеличения отдельных энергий участков диаграммы и повышения значения полной энергии деформирования/разрушения. Наибольшие значения доли площади раскрытия вторичных трещин,

наблюдаемых на поверхности излома, характерны для образцов с ориентацией концентратора в плоскости, перпендикулярной направлению проката, и в направлении деформации под действием основных прокатных валков (ориентация Т). Для образцов с ориентацией концентратора в направлении деформации под действием обжимных прокатных валков (ориентация S) характерно наличие меньшего (на 1-2 порядка) значения доли площади раскрытия вторичных трещин на изломе. Подобное явление находит отражение в значениях полной энергии деформирования и разрушения, определяемой по диаграмме «усилие–перемещение», и в удельной энергии разрушения KCV – для образцов с Т-ориентацией концентратора значения KCV значительно выше, чем для образцов с S-ориентацией концентратора при тех же температурах (см. рис. 12,а).

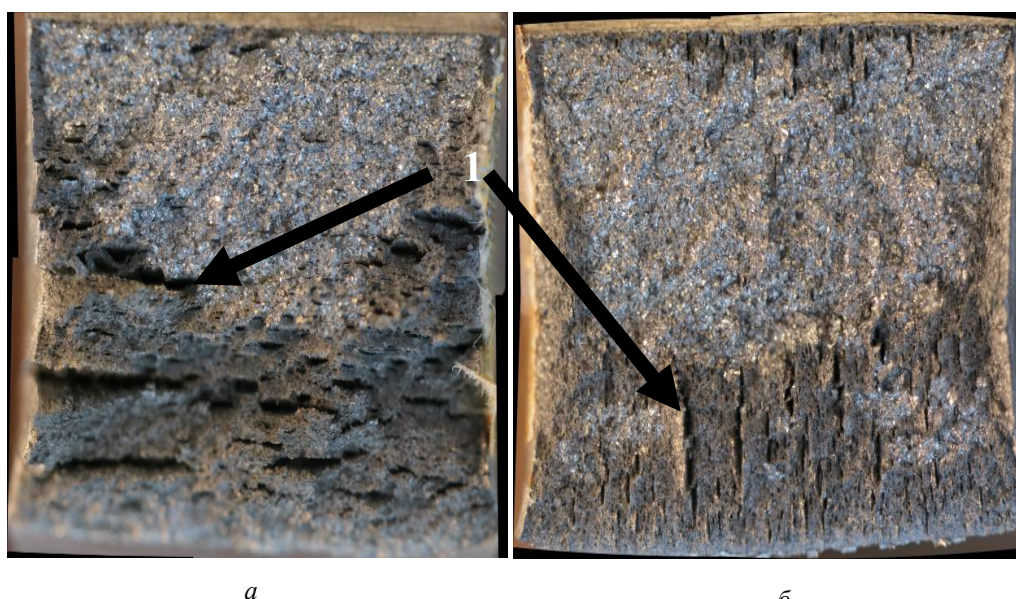


Рис. 13. Изломы образцов стали 45 с различной ориентацией концентратора:
а – Т-ориентация; б – S-ориентация; 1 – вторичные трещины расслоения по плоскостям проката

ВЫВОДЫ

1. Сопоставление результатов металлографических исследований с параметрами эксперимента при испытании дисковых образцов в условиях термошока позволило оценить влияние на величину проскока трещины при термошоке в дисковых образцах следующих основных факторов:

- а) градиента температур на внутренней и внешней поверхностях образцов;
- б) структурного фактора (состава и структуры образца, наличия текстуры);
- в) размера дефекта, инициирующего проскок трещины при термошоке (длины усталостной трещины);
- г) распределения температур в области старта трещины при термошоке.

2. Установлена корреляционная взаимосвязь между изменением величины площади локальных проскоков трещины, наблюдаемых на панорамах изломов дискового образца, и скоростью

распространения трещины, регистрируемой датчиками на поверхности образца.

3. Анализ диаграмм «усилие–перемещение», построенных по результатам испытаний на вертикальном инструментированном копре, и величин площадей характерных макрозон изломов образцов Шарпи показал наличие корреляционной зависимости между площадью участков диаграммы «усилие–перемещение» и размерами характерных зон излома образцов Шарпи.

4. Выполнена оценка удельных энергий распространения трещины в зонах излома образцов Шарпи из стали 45.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Pressurized Thermal Shock in Nuclear Power Plants: Good Practices for Assessment // IAEA-TECDOC-1627. Vienna, 2010, 229 p.
2. Unified Procedure for Lifetime Assessment of Components and Piping in WWER NPPs (“VERLIFE”). European Commission, 2008.

3. B. Prabel, S. Marie, A. Combescure. Using the X-FEM method to model the dynamic propagation and arrest of cleavage cracks in ferritic steel // *Eng Fract Mech.* 2008, v. 75, №10, p. 2984-3009.
4. C. Berdin, M. Hajjaj, Ph. Bompard, et al. Local approach to fracture for cleavage crack arrest prediction // *Eng Fract Mech.* 2008, v. 75, №11, p. 3264-3275.
5. R. Hurst, N. Taylor, D. McGarry, et al. Evaluating the NESK-1 test and the integrated approach to structural integrity assessment // *Int. J. Press. Vess. and Piping.* 2001, v. 78, p. 213-224.
6. Е.А. Кондряков. Численное моделирование распространения трещины в дисковом образце при термошоке // *Надежность и долговечность машин и сооружений.* 2009, №32, с. 194-201.
7. В.В. Харченко, Е.А. Кондряков, В.Н. Жмака, А.А. Бабуцкий. Инструментированный копер для ударных испытаний: основные элементы, анализ работоспособности // *Надежность и долговечность машин и сооружений.* 2006, №27, с. 121-130.
8. F.M. Burdekin, D.E.W. Stone. The crack opening displacement approach to fracture mechanics in yielding // *J. Strain Analysis.* 1966, v. 1, p. 145-153.
9. J.R. Rice, M.A. Johnson. The role of large crack tip geometry changes in plane strain fracture // *In elastic behavior of solids.* Kanninen Ed. McGraw-Hill, 1970, p. 641- 672,
10. А.В. Панасенко, Е.Е. Гопкало. Изучение особенностей строения излома образцов при распространении трещины в испытаниях на термошок // *Міжнародний науково-технічний збірник «Надійність і довговічність машин і споруд».* 2010, в. 33, с. 263-272.
11. Л.Р. Ботвина. *Кинетика разрушения конструкционных материалов.* М.: «Наука», 1989, 230 с.
12. С.Н. Махарова, М.З. Борисова. Влияние интенсивной пластической деформации на механизм разрушения малоуглеродистой низколегированной стали // *Электронный научный журнал «Исследовано в России».* 2006, с. 742.
13. Е.А. Кулешова, Б.А. Гурович, Я.И. Штромбах. Структурные изменения и механизмы, ответственные за радиационное охрупчивание стали реактора ВВЭР-440, облученной до высокого флюенса быстрых нейтронов / НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия // *Сборник докладов 7-й Российской конференции по реакторному материаловедению, г. Димитровград, 8-12 сентября 2003 г.* Димитровград: ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР», 2004, в 3-х томах, т. 2, 198 с.
14. Н.А. Махутов, В.Н. Пермяков, Ю.А. Кравцова, Л.Р. Ботвина. Оценка состояния материала продуктопровода после его длительной эксплуатации // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* 2007, №2, т. 73.
15. В.И. Владимиров. *Физическая природа разрушения металлов.* М: «Металлургия», 1984, 280 с.

Статья поступила в редакцию 12.10.2012 г.

ОСОБЛИВОСТІ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ТРІЩИНИ У СТАЛЯХ ПРИБИ ВИПРОБУВАННЯХ ЗРАЗКІВ ШАРПІ ТА ДИСКОВИХ ЗРАЗКІВ

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

Розроблена експериментальна методика для дослідження розповсюдження та зупинки тріщин у зразках Шарпі при ударному навантаженні та в дискових зразках в умовах термошоку. За результатами експериментального та чисельного моделювання розраховано швидкості розповсюдження тріщини в зразках. Проведено металографічні дослідження бічних поверхонь та фрактографічні дослідження поверхонь руйнування дискових зразків та зразків Шарпі. Встановлена кореляційна залежність між величиною миттєвої швидкості розповсюдження тріщини по перерізу дискового зразка під впливом градієнта температур в умовах термошоку та площею локальних стрибків тріщини на поверхні руйнування дискового зразка. Проведено заставлення ділянок діаграм «навантаження–переміщення» та параметрів характерних зон на поверхні руйнування зразків Шарпі.

CRACK PROPAGATION PECULIARITIES IN STEELS AT CHARPY AND DISC-SHAPED SPECIMENS TESTS

V.V. Kharchenko, E.A. Kondryakov, A.V. Panasenko

Crack propagation and arrest experimental methodic in Charpy specimens under impact load and disk-shaped specimens under thermal shock was developed. Crack velocity from experimental and numerical simulations was obtained. Metallographic studies were carried out from side surfaces of disc-shaped specimens. Fractographic studies were carried out from fracture surfaces of disc-shaped specimens. Correlation between crack velocity in cross-section of disc-shaped specimen under thermal shock conditions and square of local crack jumps on fracture surface was determined. The comparison sites of "force-displacement" diagrams and the parameters of characteristic zones of Charpy specimens was carried out.