



СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЯЗКОСТИ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛА ЗТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

В. С. БУТ, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены результаты экспериментальных исследований вязкости разрушения металла зоны термического влияния сварных соединений низколегированных сталей с различной схемой формирования надреза. Выполнена оценка существующих способов изготовления образцов и результаты их испытаний на критическое раскрытие трещины при трехточечном нагружении.

Ключевые слова: дуговая ручная сварка, сварные соединения, вязкость разрушения, критическое раскрытие трещины, диаграмма разрушения, металлографические исследования, структура, температура испытаний

В настоящее время при оценке работоспособности ответственных конструкций и сооружений, сосудов высокого давления и трубопроводов, работающих в сложных условиях, особое внимание уделяется сопротивляемости сварных соединений хрупкому разрушению.

Как показано в работе [1], основными факторами, способствующими возникновению хрупкого разрушения сварного соединения, являются концентрация напряжений, вызванная подрезом (резким изменением сечения, технологическими дефектами сварных швов и основного металла), остаточные растягивающие напряжения у основания надреза, пониженные пластические свойства на указанном участке, низкая температура.

При оценке склонности сварных соединений к хрупкому разрушению, наряду с традиционными критериями (ударной вязкостью, характером излома) все более широко применяется критерий нелинейной механики разрушения — значение критического раскрытия трещины (КРТ) δ_c [2]. Отражая количественно сопротивление разрушению материалов и сварных соединений с трещиноподобными дефектами технологического и эксплуатационного происхождения, этот показатель позволяет установить для конструкционных сталей значения критических температур, разделяющих области вязких, квазихрупких и хрупких разрушений. По отношению к сварным соединениям это имеет практическое значение в связи с возможным локальным охрупчиванием металла в зоне шва, а следовательно, с необходимостью ограничения области значений рабочей температуры вязким состоянием [3].

Преимущества метода испытаний на раскрытие трещины (РТ) достаточно полно освещены

в работах [1–4]. К тому же в сварных соединениях некоторых ремонтных конструкций неизбежно имеются концентраторы напряжений, которые могут оказывать влияние не только на образование холодных трещин, но и на стойкость против хрупкого разрушения.

Как правило, охрупчивание металла при сварке конструкционных сталей имеет место на участке крупного зерна зоны термического влияния (ЗТВ). В связи с этим оценку сопротивляемости сварных соединений хрупкому разрушению обычно выполняют исходя из результатов испытаний образцов с надрезом в указанной зоне при трехточечном медленном нагружении [5].

Как показывает мировой опыт, при определении допустимых размеров трещиноподобных дефектов в сварных соединениях на основе методики КРТ наиболее достоверные данные показывают образцы с неполным проплавлением притупления (НПП) в разделке соединения, использованные в японской методике [6] (рис. 1, а). Сварку таких образцов выполняют в специальном приспособлении (рис. 1, б), которое ограничивает угловые деформации и позволяет свободно деформироваться в поперечном ко шву направлении. Однако такая методика является трудоемкой, она приспособлена только для сварки штучными электродами, поскольку требует, чтобы граница сплавления многослойного шва была параллельна щелевому зазору.

Изготовление образцов и способ нанесения надрезов, согласно работе [7], позволяет использовать методику КРТ и для других способов сварки. При этом образцы с V-образной разделкой кромок имеют преимущество перед другими вариантами благодаря простоте и небольшой трудоемкости изготовления.

С целью установления адекватности указанных методик и корреляции полученных результатов в данной работе с использованием штучных электродов на одинаковых режимах сварки вы-

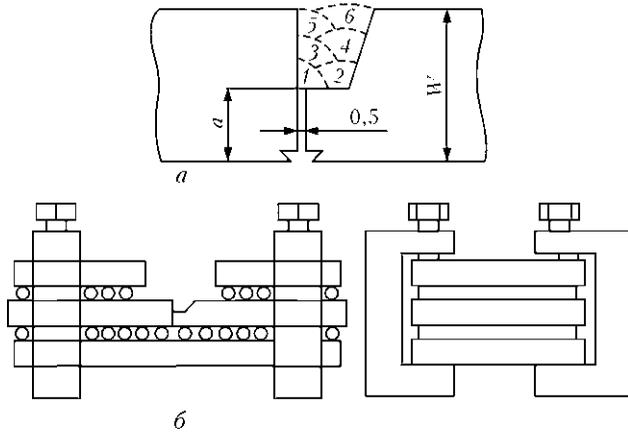


Рис. 1. Схемы сварного образца с НПП кромки (а) и приспособления для его сварки (б): 1–6 — последовательность заполнения разделки

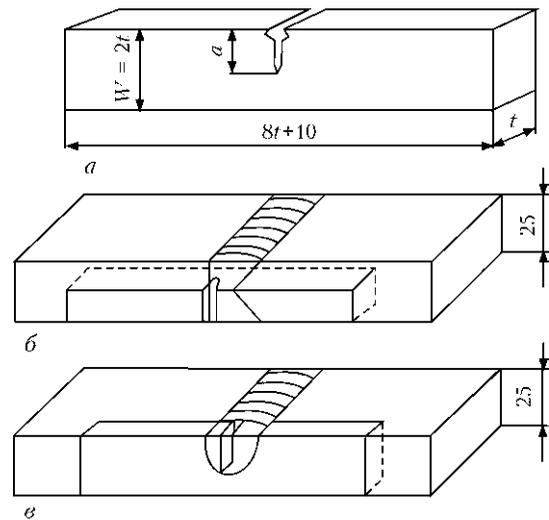


Рис. 2. Схемы образцов, вырезанных из сварных соединений для КРТ, с надрезами различной формы (а–е)

полняли сварные соединения сталей Х60 и 17Г1С с разными формами разделки (рис. 2), химический состав которых приведен в таблице.

На указанных образцах выполняли надрезы механическим способом под углом перпендикулярно и параллельно границе сплавления (рис. 2). Во всех случаях вершина надреза с радиусом кривизны 0,1 мм была расположена на расстоянии 0...0,3 мм от границы сплавления. Кроме того, сваривали образцы с естественным концентратором напряжений, т. е. с НПП в разделке сварного соединения. В этом случае зазор между свариваемыми кромками (рис. 1, а) выбирали согласно рекомендациям [7].

Макрошлифы сварных образцов для испытания на КРТ с различной схемой формирования надреза в ЗТВ показаны на рис 3. Испытание образцов с НПП на изгиб проводили по такой же методике, как и образцов с механическим надрезом в соответствии рекомендациями Британского стандарта BS5762–79 и методики [8]. В данном случае испытания на РТ происходили при контролируемой и относительно медленной скорости увеличения v_c нагрузки с одновременной регистрацией ее и РТ на двухкоординатном самописце. Испытания заканчивали, когда достигалось неконтролируемое развитие трещины и происходил излом. При этом использовали комплект из трех образцов каждого сварного соединения при одинаковой температуре. Схемы и размеры образцов для определения КРТ приведены на рис. 2, а. При испытании на КРТ строится диаграмма в координатах нагрузка–РТ. Полученные

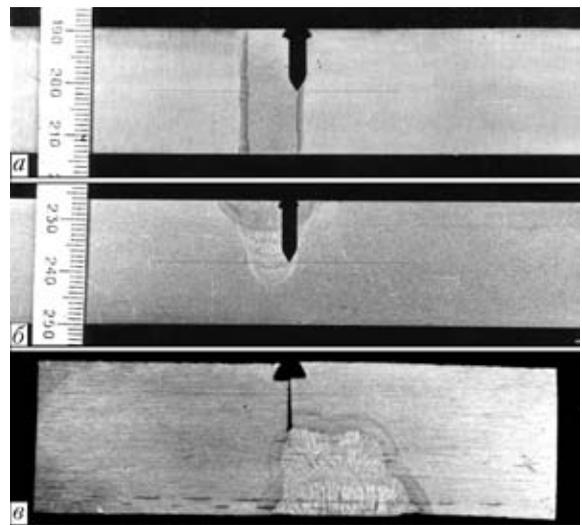


Рис. 3. Макрошлифы с искусственными (механическими) и естественными надрезами в ЗТВ: а — надрез, расположенный параллельно границе сплавления; б — надрез под углом к границе соединения; в — естественный с НПП

кривые, как правило, соответствуют одному из типов разрушения, показанных на рис. 4 [9].

Для проведения испытаний по методике КРТ изготовлено приспособление (рис. 5), основными узлами которого является силовая скоба и обойма с переменной базой опор нагружения, что позволяет испытывать образцы в широком диапазоне толщин (5...30 мм) при трехточечном нагружении. Тензодатчики, которые контролируют уровень нагружения, клеют на внешнюю повер-

Химический состав исследуемых сталей

Марка стали	C	Mn	Si	Ni	S	P	V	Nb	Al	C _{экв}
Х60	0,12	1,60	0,48	0,20	0,01	0,025	0,08	0,06	0,01	0,42
17Г1С	0,18	1,48	0,39	0,10	0,03	0,022	—	—	—	0,43

Примечание. C_{экв} определяли по формуле Международного института сварки.

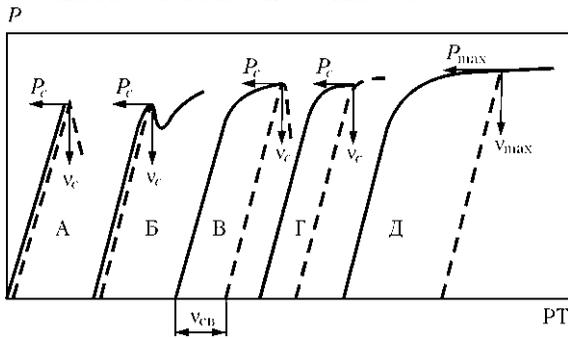


Рис. 4. Типы диаграмм нагрузка–РТ (P_c — критическая нагрузка)

хность боковых стоек силовой скобы в местах максимальных напряжений изгиба, которые возникают во время нагружения образца. Это повышает чувствительность тензодатчика и обеспечивает пропорциональность по координате у при записи диаграммы нагрузка–РТ. Кроме того, расположение тензодатчиков за пределами охлаждающей среды позволяет повысить их долговечность и надежность при многократных испытаниях в условиях низких температур.

Испытания образцов указанных размеров на трехточечный изгиб при контролируемой скорости нагрузки (2 мм/мин) и температуре $-30...110$ °С осуществляли на гидравлической машине с усилием 300 кН, оснащенной тензоусилителем с регулируемым блоком питания и двухкоординатным самопишущим планшетным потенциометром. Температуру образцов до -70 °С обеспечи-

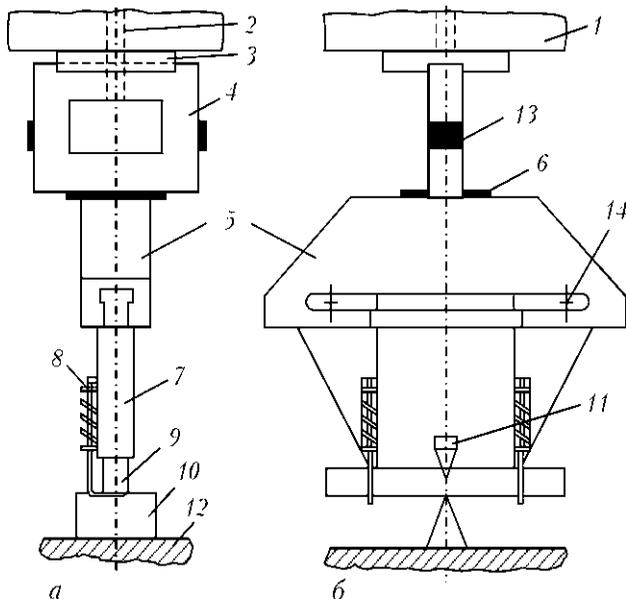


Рис. 5. Схема приспособления для испытаний образцов по методике КРТ: 1 — верхняя траверса; 2 — шток закрепления; 3 — опорная пята; 4 — силовая скоба; 5 — обойма с подвижными опорами; 6 — теплоизолирующая прокладка; 7 — подвижная опора; 8 — прижим; 9 — образец; 10 — неподвижная опора; 11 — датчик РТ; 12 — платформа испытательной машины; 13 — датчик нагружения; 14 — фиксатор

вали раствором твердой углекислоты в бензине. До более низкой температуры образцы охлаждали парами азота. Температуру образцов контролировали с помощью хромель-алюмелевых термопар и милливольтметра. Предварительно строили тарировочный график в координатах температура–напряжение, по которому во время испытаний контролировали температуру охлаждения образца.

При испытаниях образцов получено три типа диаграмм нагрузка–РТ — А, В, Д (рис. 4). Причем при температуре -70 °С образцы с искусственным надрезом разрушались по типу В и Д, а образцы с НПП — по типу А. При понижении температуры до -90 °С образцы с механическим надрезом из стали 17Г1С разрушались по типу А, из стали Х60 — по типу В. При -110 °С все образцы разрушались по типу А.

При повышении температуры испытаний до -50 °С и более образцы НПП разрушались по типу В. По минимальным значениям δ_c построены графики изменения этой величины у образцов из исследуемых сталей в зависимости от температуры испытаний и вида надреза в ЗТВ (рис. 6). Из рисунка видно, что схема нанесения надреза механическим способом на участке крупного зерна ЗТВ не влияет на КРТ. Для сравнительной оценки сопротивляемости металла в ЗТВ хрупкому разрушению можно и следует применять образцы, изготовленные по наиболее простой и наименее трудоемкой методике, изложенной в работе [7], в соответствии с которой можно оценивать ЗТВ сварных соединений любого вида, полученных различными способами сварки. Показатель КРТ у образцов с НПП значительно ниже, чем у образцов с искусственным (механическим) надрезом, испытанных при температуре -70 °С и достигает уровня значений КРТ образцов с надрезом при более высокой (-40 °С) температуре испытаний.

В диапазоне $-70...-80$ °С образцы из стали Х60 с искусственным надрезом в ЗТВ имеют достаточно высокие значения КРТ (0,22...0,31 мм), в то время как у образцов из стали 17Г1С эти значения гораздо ниже, при температуре -80 °С $\delta_c \approx 0,1$ мм. При снижении температуры испытаний до -110 °С зафиксированы практически одинаковые (минимальные) значения КРТ у образцов из различных сталей с искусственным надрезом в металле ЗТВ сварных соединений. Используя критерии оценки материала ($\delta_c \geq 0,12$ мм), приведенные в работе [8], можно предположить, что металл ЗТВ (участок крупного зерна) сварных соединений стали Х60 будет разрушаться хрупко при температуре ниже -90 °С, а стали 17Г1С — при более низкой (-80 °С) температуре. Если использовать значения КРТ, полученные на образцах с НПП, то температурный диапазон хрупкого разрушения участков указанной зоны будет на-



ходиться ниже области -60 и -45 °С соответственно для сталей Х60 и 17Г1С.

Сравнение температурных зависимостей δ_c в ЗТВ сварных соединений сталей Х60 и 17Г1С (временное сопротивление 540...600 МПа), полученных на образцах с НПП и с искусственным надрезом, показало, что для сталей исследуемых марок обе зависимости достаточно хорошо соответствуют друг другу. Однако значения δ_c у образцов с НПП значительно ниже, порог хрупкого разрушения ЗТВ смещается в сторону положительной температуры на 30...35 °С по сравнению с образцами с искусственным надрезом в ЗТВ. Это объясняется следующими причинами. Во-первых, вершина естественного надреза в образцах с НПП находится на линии сплавления, поэтому он должен быть более острым, чем у образцов с искусственным надрезом; во-вторых, у вершины надреза во время сварки происходит концентрация пластических деформаций и остаточных напряжений. На основании изложенного можно сделать вывод, что для точной и достоверной оценки сопротивляемости сварного соединения хрупкому разрушению вершина надреза должна находиться на участке крупного зерна ЗТВ, однако такой надрез трудно выполнить механическим способом. Образцы с НПП позволяют просто и надежно получить требуемые характеристики, поскольку в этом случае вершина естественного надреза расположена точно на границе сплавления. Значения δ_c у образцов с НПП можно использовать для определения допустимых размеров трещиноподобных дефектов в сварных соединениях расчетным методом согласно [10]. Как показали исследования, в то же время при тщательной разметке и точном нанесении искусственного надреза в требуемом участке ЗТВ можно получить удовлетворительные результаты при определении вязкости разрушения. При этом следует учитывать, что температурный диапазон вязкого разрушения расширяется в сторону снижения температуры на 30...35 °С.

За рубежом уже давно при проектировании ответственных конструкций устанавливают требования к вязкости металла и сварным соединениям по критерию δ_c , значения которого составляют 0,20...0,25 мм (последнее значение относится к сварным швам). Предъявление более высоких требований к сварным соединениям объясняется возможным проявлением дополнительных факторов — большей вероятностью возникновения дефектов в соединениях по сравнению с основным металлом [11].

Учитывая указанные нормативные уровни трещиностойкости сварных соединений, можно заключить, что область вязкого разрушения металла ЗТВ стали Х60 будет находиться выше темпера-

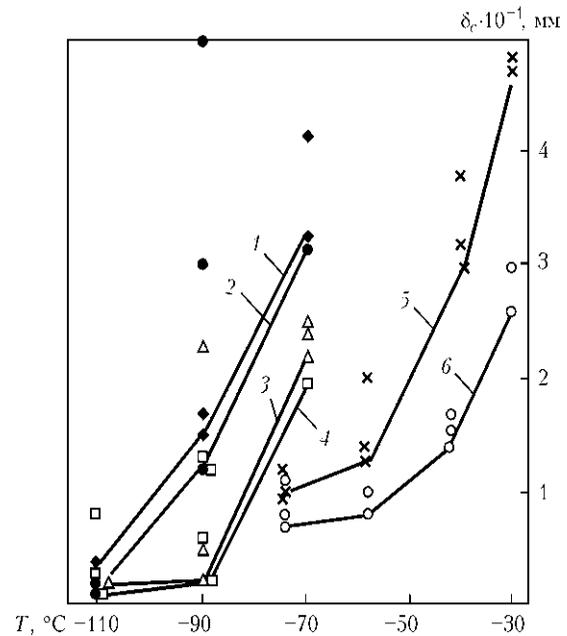


Рис. 6. Зависимость КРТ от температуры испытаний и типа надреза в ЗТВ образцов из сталей Х60 (1, 2, 5) и 17Г1С (3, 4, 6): 1, 3 — надрез параллельно границе сплавления; 2, 4 — перпендикулярно ГС; 5, 6 — образцы с НПП

туры -45 °С, а стали 17Г1С — выше -30 °С. Поскольку наиболее низкая температура для северных газопроводов [12] составляет всего -15 °С (для нефтепроводов еще выше), указанные стали можно рекомендовать для изготовления ремонтных муфт и разрезных сварных тройников [13, 14]. Вместе с тем сталь Х60 позволяет снизить вероятность хрупкого разрушения сварных соединений, что очевидно, связано с металлургическими особенностями выплавки и проката.

Для изучения характера распространения трещин и исследования микроструктуры отдельных участков сварных соединений образцов с НПП вырезали шлифы. Анализ показал, что, как правило, трещины распространяются вдоль границы сплавления на участке крупного зерна (рис. 7, а), в некоторых случаях они берут свое начало на участке крупного зерна и распространяются в металл шва. Следует отметить, что случаи распространения трещин в металл шва как в сварных соединениях стали 17Г1С, так и в соединениях стали Х60 зафиксированы при самой низкой (-75 °С) температуре испытаний. Очевидно, это связано со значительным охрупчиванием металла шва и на участке крупного зерна. Причем распространение трещин в образцах из стали 17Г1С происходит на большую глубину, чем в образцах из стали Х60. На рис. 8 представлена типичная панорама распространения трещин в образцах из стали 17Г1С с НПП. Исследования структуры металла сварных соединений показали следующее. У основного металла она во всех случаях ферритно-перлитная, твердость стали 17Г1С составляет $HV 190$, а стали Х60 — $HV 170$. Металл шва сварного соединения

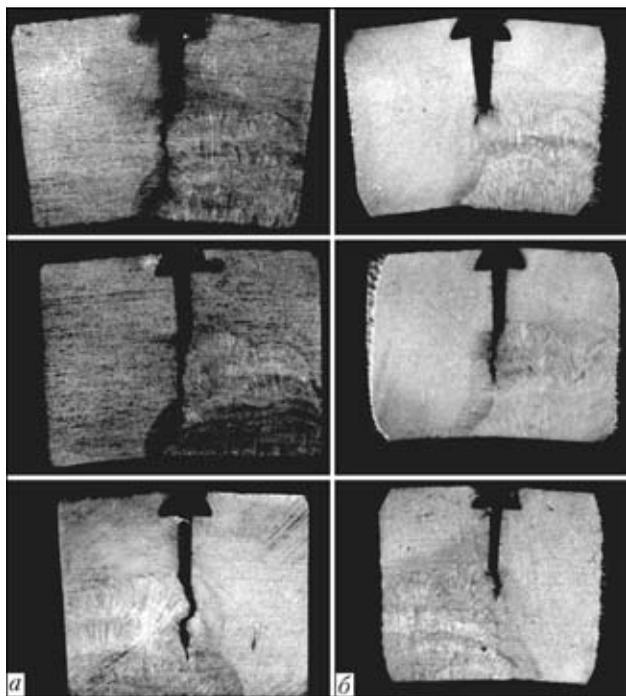


Рис. 7. Характер разрушений образцов из сталей 17Г1С (а) и типа X60 (б)

представляет собой литую смесь доэвтектоидного феррита, перлита и участков бейнита. Структура металла ЗТВ на участке перегрева (крупного зерна) стали X60 бейнитно-перлитная с выделением доэвтектоидного феррита преимущественно по границам зерен, у стали 17Г1С — в основном верхний бейнит, игольчатый феррит и незначительная доля перлита и доэвтектоидного феррита.

Исследования характера распространения трещин показали, что последние в основном проходят через участки верхнего бейнита и игольчатого феррита, в редких случаях — через участки доэвтектоидного феррита. Как правило, трещины останавливались в зонах расположения вязких составляющих.

Одновременно проводили исследования особенностей разрушения металла в ЗТВ образцов с искусственным надрезом по общепринятой методике на электронных микроскопах ДЖЕМ-120 и ДЖЕМ-200СХ.

Для образцов из стали X60, испытанных при температуре $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$, характерен вязкий тип разрушения. Поверхность разрушения в основном имеет ячеистый характер с высокой степенью пластического течения перед разрушением. Зарождение ячеек разрушения происходит в области крупных фазовых выделений. Имеют место также участки вязкого разрушения с меньшей степенью пластического течения перед разрушением (более плоские фасетки) и участки межзеренного разрушения. Межзеренный характер разрушения свидетельствует об охрупчивании на некоторых участках границ зерен. Излом образца из стали 17Г1С также имеет вязкий характер разрушения, однако границы фасеток отрыва свидетельствуют о меньшей степени пластического течения перед разрушением. Обнаружены также зоны хрупкого разрушения (речный узор), однако доля их незначительна.

При температуре испытаний $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ изломы образцов из стали 17Г1С имеют в основном вязкий характер с плоскими фасетками или фасетками с более значительным пластическим течением перед разрушением. Обнаружены участки квазивязкого разрушения и хрупкого излома. При аналогичных испытаниях образцов сварных соединений стали X60 определено, что поверхность их излома в ЗТВ имеет более вязкий характер разрушения по сравнению с соединениями стали 17Г1С, что согласуется с данными механических испытаний образцов из сталей исследуемых марок. Имеет место вязкий излом со значительным пластическим течением перед разрушением как в объеме, так и по границам зерен.

Фрактографические исследования изломов образцов из стали 17Г1С при температуре $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$ показали, что разрушение имеет в основном хрупкий характер с четко выраженным речным узором и гребнями отрыва. Следует отметить, что при указанной температуре чаще всего происходит межкристаллитное разрушение. Характер изломов образцов из стали X60 такой же, как и у образцов из стали 17Г1С, испытанных при той же температуре. Имеются также разрушения, происходящие вследствие хрупкого скола, и незначительная доля участков квазивязкого разрушения. Учиты-

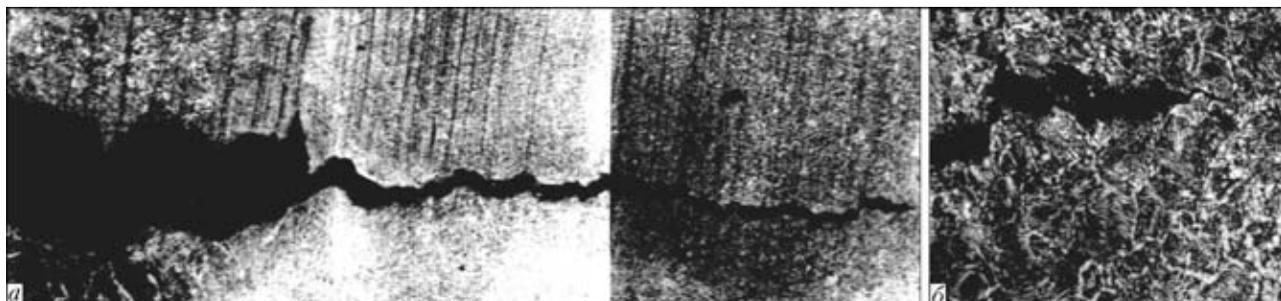


Рис. 8. Панорама типичного распространения трещины в образце из стали 17Г1С с НПП (а, $\times 63$) и фрагменты трещины в зоне остановки (б, $\times 200$)



вая, что при температуре испытаний $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$ изломы ЗТВ сварных соединений исследуемых сталей идентичны, можно считать, что при низкой температуре испытаний влияние легирующих элементов на вязкость разрушения нивелируется.

Исследованы также изломы образцов с механическими надрезами, выполненными перпендикулярно и параллельно границе сплавления. Исходя из результатов фраттографических исследований характер разрушения сварных соединений идентичен даже при различных схемах нанесения надреза на участке крупного зерна ЗТВ. Установлено, что значения δ_c не зависят от способа нанесения механического надреза в исследуемой зоне и считаются достоверными, если вершина надреза находится от границы сплавления на расстоянии, не превышающем 0,3 мм.

Проведенные металлографические исследования полностью подтвердили результаты испытаний на КРТ. При этом температурные зависимости δ_c металла ЗТВ сварных соединений исследуемых сталей, полученные на образцах с НПП и с искусственным (механическим) надрезом, хорошо коррелируют. При этом сопротивление хрупкому разрушению металла на участке крупного зерна ЗТВ у стали Х60 выше, чем у 17Г1С.

Таким образом, наиболее простой и наименее трудоемкой является методика нанесения механического надреза в ЗТВ под углом к границе сплавления, что позволяет оценить сопротивление металла ЗТВ хрупкому разрушению сварных соединений, выполненных в широком диапазоне тепловложений погонных энергий сварки, по сравнению с наплавленным и основным металлом.

Значения КРТ при испытаниях образцов с НПП и механическим надрезом показывают хорошую корреляцию. Однако в первом случае порог хрупкого разрушения смещается в сторону положительной температуры на $30...35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это следует учитывать при установлении темпера-

турного диапазона хрупкого разрушения металла ЗТВ по результатам испытаний образцов с механическим надрезом.

1. *Красовский А. Я., Красику В. Н.* Трещиностойкость сталей магистральных трубопроводов. — Киев: Наук. думка, 1990. — 176 с.
2. *Броек Д.* Основы механики разрушения. — М.: Высш. шк., 1980. — 368 с.
3. *Механика разрушения и прочность материалов:* Справ. пособие. В 4 т. / Под общ. ред. В. В. Панасюка. — Киев: Наук. думка, 1988. — Т.1. — 388 с.
4. *Gray T. G., McCombe A. A., Shanks W. A.* CTOD testing to BS 5762 // *Metals and Mater.* — 1985. — № 4. — P. 223–285.
5. *Красовский А. Я.* Хрупкость металлов при низких температурах. — Киев: Наук. думка, 1980. — 340 с.
6. *Андо К.* Оценка вязкости разрушения в зоне термического влияния с помощью трехточечного метода испытаний на изгиб образцов с надрезом // *Есэцу чаккайси.* — 1979. — № 5. — С. 55–60.
7. *Dolby R. E.* Welding and fracture initiation in QT low alloy steels // *Metal Constr. and Brit. Weld. J.* — 1971. — № 3. — P. 99–103.
8. *Кирьян В. И.* Методика оценки сопротивления конструкционных сталей вязкости разрушения // *Автомат. сварка.* — 1984. — № 11. — С. 1–6.
9. *Fletcher L.* Practical COD fracture toughness measurement and evaluation // *Australian Weld. J.* — 1979. — № 7. — P. 51–56.
10. *Кошелев П. Р., Егоров Ю. И.* Применение механики разрушения для оценки несущей способности магистральных трубопроводов // *Прочность конструкций, работающих в условиях низких температур.* — М.: Металлургия, 1985. — С. 8–12.
11. *Гиренко В. С., Дядин В. П.* Зависимости между ударной вязкостью и критериями механики разрушения конструкционных материалов и их сварных соединений // *Автомат. сварка.* — 1986. — № 10. — С. 61–62.
12. *Патон Б. Е., Труфяков В. М., Кирьян В. И.* Требования к вязкости стали для магистральных газопроводов при постановке в них гасителей протяженных разрушений // *Там же.* — 1982. — № 12. — С. 5–9.
13. *Определение* допустимых размеров сварных швов при установке тройников и муфт на действующих магистральных трубопроводах / В. И. Махненко, В. С. Бут, Е. А. Великоиваненко и др. // *Там же.* — 2003. — № 8. — С. 7–12.
14. *Бут В. С., Олейник О. И.* Основные направления развития технологии ремонта магистральных трубопроводов в условиях эксплуатации // *Там же.* — 2007. — № 5. — С. 42–48.

The paper presents the results of experimental studies of fracture toughness of HAZ metal of low-alloyed steel welded joints with different schematic of notch formation. Assessment of the currently available methods of sample preparation and results of their testing for critical crack tip opening displacement at three-point loading was performed.

Поступила в редакцию 17.06.2009