

М. Эрделен-Пепплер¹, Х.-Г. Хилленбранд², С. Кальва², Г. Кнауф¹

¹Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH, Германия

²Europipe, Мюльхайм-на-Руре, Германия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ ПРОГНОЗИРУЕМОЙ СПОСОБНОСТИ К УДЕРЖАНИЮ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАЗРУШЕНИЯ ДЛЯ ВЫСОКОПРОЧНОГО ТРУБОПРОВОДА В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

Распространение трещин в магистральных трубопроводах является серьезной проблемой для операторов трубопроводов высокого давления. Явление распространения трещин характеризуется сложным взаимодействием между трубой и перекачиваемым газом. Более того, это очень быстрый процесс.

Устойчивость к протяженному вязкому разрушению в основном определяется испытаниями на ударную вязкость по Шарпи. Энергия удара измеряется и переносится на устойчивость к пластичному разрушению труб методом полуэмпирической корреляции. Изначально, эти формулы были выведены для сталей относительно низкой прочности с ударной энергией ниже 100 Дж посредством сопоставления данных лабораторных исследований с результатами полномасштабных испытаний на распространение трещин.

Наиболее часто используемой моделью является модель двух кривых Бателли (BTC), предложенная Eiber, Bubenik и Махей [1], которая, как полагают, обеспечивает надежное прогнозирование применительно к материалам со свойствами, близкими к тем, которые используются для отработки модели. Этот подход связан с декомпрессией газа и устойчивостью к распространению трещин, как несвязанных процессов, которые зависят от скорости их распространения.

Во время отработки модели BTC, а также для материала, свойства которого были основой для этой модели, прогнозирование осуществлялось на высоком уровне. По мере повышения прочности и вязкости труб, трубы с вязкостью, превышающей вязкость удержания, не обеспечивают удержание распространения трещин. Результаты испытаний труб класса X80 и выше показаны на рис. 1. Если

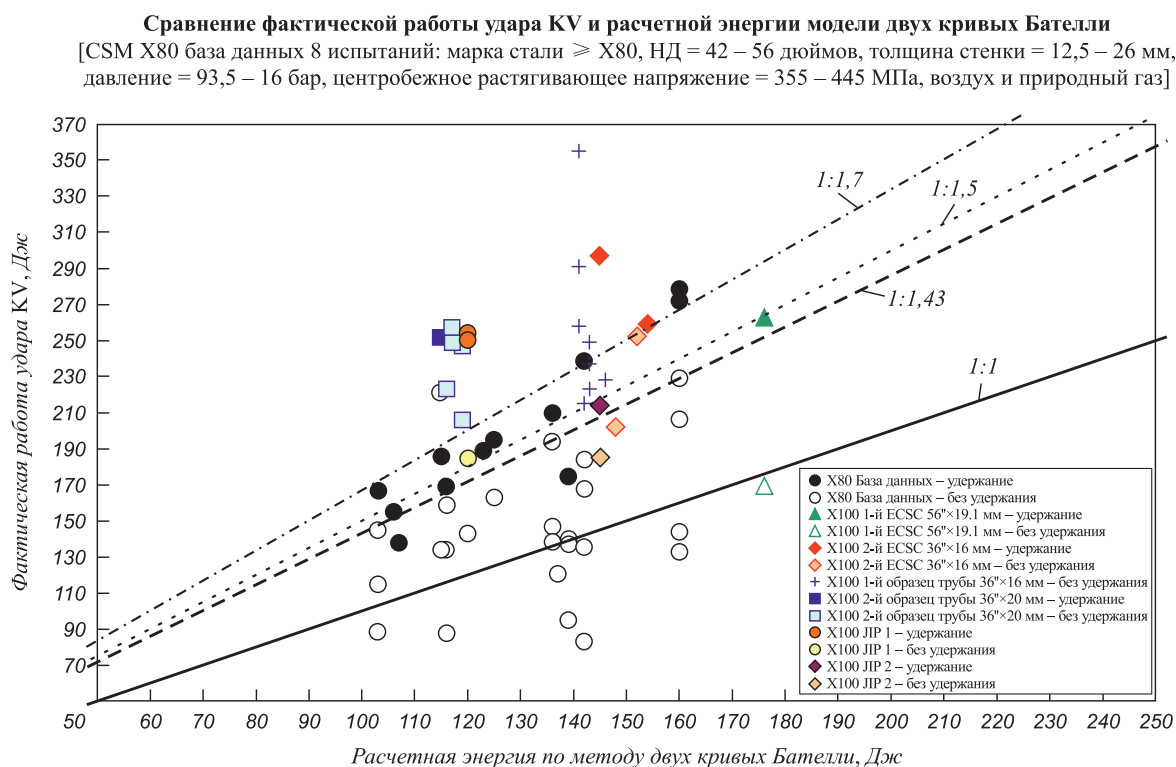


Рис. 1. Сравнение фактической работы удара KV и расчетной BTC модели для высокопрочных сталей [2]

модель действительна для труб указанного класса, линия 1:1 должна разделять удержание (закрашенные символы) и распространение (пустые символы). Совершенно очевидно, что этого не происходит. Поэтому для снятия этих ограничений для труб класса X80 было предложено использование поправочных коэффициентов.

С другой стороны, это решение не может применяться для труб класса X100. Решение, казалось, заключалось в использовании поправочного коэффициента 1,7. Однако последующая серия испытаний, проведенных в рамках финансируемого ЕС проекта, показала, что распространение трещин в трубах с работой удара KV значительно превышает этот уровень [2].

Недавние полномасштабные испытания на разрушение труб X80 для арктических условий еще раз подтвердили ограниченность этой методологии при использовании за пределами граничных условий даже в случае применения к этим трубам соответствующего поправочного коэффициента [3]. Авторы наблюдали ограниченную деформацию, определенную по утонению стенки трубы по траектории, прилегающей к пути трещины, в сочетании с расслоением на поверхности разрушения в тех трубах, которые оказались неспособными к удержанию распространения трещин.

Несколько возможных факторов, вызывающих неспособность удержания растрескивания высокопрочными трубами, были выявлены и обсуждены, однако на сегодняшний день они не нашли окончательного объяснения, не говоря уже о каком-либо решении:

- ограниченная деформируемость/пластичность (высокое отношение Y/T , недостаточное деформационное упрочнение);
- смещение пропорции возникновения трещины и ее распространения в сторону относительно быстрого возникновения;
- проблема значимости расщеплений и других образований на поверхностях разрушения на образцах лабораторных и полномасштабных испытаний;
- проблемы со значимыми лабораторными образцами; ограничения испытаний на ударную вязкость по Шарпи для высокопрочных и высокопластичных сталей (образцы обычно не разрушаются при воздействии энергии, превышающей 200 – 250 Дж; при испытаниях на ударную вязкость по Шарпи отсутствуют различия между энергиями возникновения и распространения).

Для преодоления этой ситуации большое количество исследований было направлено на поиск альтернативных методов испытаний для измерения устойчивости к распространению трещин в лабораторных условиях, а также на совершенствование существующей методики.

Альтернативные методы испытаний

Инструментированные испытания падающим грузом

В качестве альтернативы использованию работы удара KV в ВТС модели, модель была использована относительно энергии DWTT. Испытания падающим грузом обладают преимуществами большей ширины образца под надрезом, использования полной толщины стенок и разделения между энергией возникновения и распространения. Определенным недостатком является неопределенность измерений, которые в значительной степени определяются различными методами испытаний и оценки, используемыми для нестандартных испытаний в различных лабораториях.

Были предприняты первые попытки замены работы удара KV полной энергией DWTT. Для высококачественных высокопрочных сталей проблема снижения доли энергии распространения по отношению к полной энергии не была решена. Поэтому предпринимались различные попытки экспериментального снижения энергии возникновения. Были тщательно изучены образцы с дополнительным надрезом по боковым граням [4], образцы с предварительно нанесенной трещиной [5] и образцы с концентратором в виде охрупченной области, нанесенной наплавкой [6]. Реальный прорыв не был достигнут, хотя некоторые улучшения все же отмечались. Авторы работы [7] утверждают, что при использовании энергии DWTT отсутствует необходимость коррекции для сталей более высоких категорий прочности. В других исследованиях приводится детальное описание полного сопротивления разрушению, полученное посредством использования энергии распространения DWTT [8]. С другой стороны, было продемонстрировано, что энергия DWTT может дать полное представление о сопротивлении разрушению, но разность между энергией в состоянии сдерживания и распространения для высокопрочных сталей может быть настолько мала, что она будет находиться в пределах разброса результатов заводских испытаний [2].

СТОА (угол раскрытия в вершине трещины)

СТОА в качестве параметра для описания устойчивости к распространению трещин обсуждается с 80-х годов прошлого века [9]. Первые эксперименты были поставлены в авиационно-космической промышленности на алюминиевых листах. Было отмечено, что СТОА при возникновении трещины обычно высок, но после расширения трещины очень малой длины остается стабильным на нижнем уровне (рис. 2, [10]).

К сожалению, СТОА зависит от ширины образца. Увеличение ширины образца под надрезом приводит к снижению СТОА. По сути, это означает, что необходимо найти критерий переноса, чтобы связать значение, измеренное на лабораторных образцах, с процессом расширения вязкого разрушения в трубе.

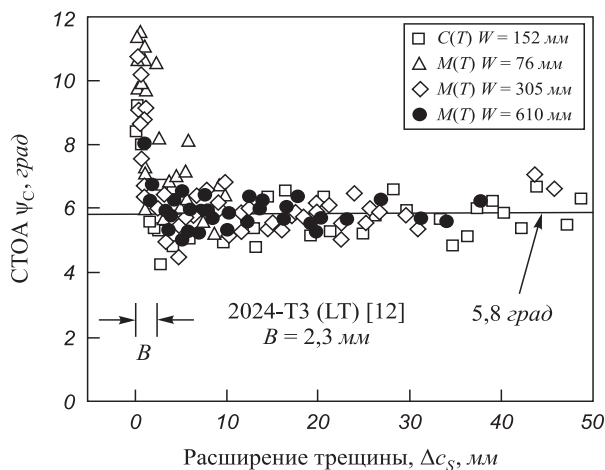


Рис. 2. Измерения СТОА в образцах алюминиевых листов [5]

Экспериментально были исследованы различные методы измерения СТОА на участке трубы.

Метод СТОА для двух образцов, предложенный в работе [11], основан на тестировании двух комплектов образцов DWTT, имеющих различную ширину образца под надрезом (за счет изменения глубины надреза). Разница в потребляемой энергии двух образцов считается энергией распространения трещины с длиной, равной разнице между двумя значениями ширины образца под надрезом. Критический СТОА рассчитывается с использованием полной энергии, измеренной в процессе испытаний. Процедура была успешно применена в отношении труб малой прочности и вязкости [12], но имеет некоторые ограничения в отношении высокопрочных труб с высокой вязкостью (энергия Шарпи > 200 Дж). Процедура была модифицирована для сокращения растущей доли энергии возникновения посредством испытаний образцов с предварительно нанесенной трещиной, щелевых образцов и образцов с шевронным надрезом (например, [13]). Эти изменения позволили достичь некоторого успеха в отношении высокопрочных сталей [14]. Однако недавние исследования продемонстрировали сохранение большой неопределенности в расчетах СТОА в зависимости от используемых параметров (на примере расчетов между $3,1^\circ$ и $11,6^\circ$) [15].

В методике одиночного образца для определения СТОА используются результаты испытаний SEB (испытания на изгиб образца с односторонним надрезом) [16]. Также как в методе двух образцов, неопределенность в расчетах возникает в результате использования различных параметров вращения пластичного шарнира, геометрической константы и напряжения динамического течения. Чтобы преодолеть определенные проблемы, был разработан метод упрощенного одиночного образца, в котором не требуется использование напряжения динамического течения, которое не может быть определено непосредственно, поэтому используется оценочное значение [17].

Активно исследовалась возможность замены испытываемых образцов DWTT, например двухконсольными образцами, которые были предложены различными авторами [18, 19]. Данная конструкция имеет ряд преимуществ, так как отличается большой шириной и не требует выравнивания, однако испытательная установка сложна по сравнению с установкой DWTT. Деформация в вершине трещины измеряется посредством цифровых и видеокамер высокого разрешения. Перед проведением испытаний на образец должна быть нанесена трещина. Авторы работы [19] утверждают, что они обнаружили существенные различия в измеренных значениях СТОА вследствие неровных кромок трещины и трудностей при идентификации вершины трещины. Они пришли к выводу, что для улучшения результатов этого метода необходимы дополнительные исследовательские работы.

Методы оценки СТОА одного образца требуют использования чувствительных приборов и детального анализа для получения значения СТОА, что предполагает возникновение проблем при использовании этих методов в процессе производственных испытаний. Кроме того, для высокопрочной стали отмечаются значительные отклонения при сравнении результатов лабораторных и полномасштабных испытаний. По сути, это означает, что такой подход не решает проблемы именно высокопрочных сталей [20]. Наконец, для применения данной методики могут потребоваться эмпирические корреляции.

Инструментированные испытания на ударную вязкость по Шарпи

В работе [21] продемонстрировано улучшение прогнозирования модели ВТС для современных высокопрочных сталей с использованием результатов испытаний на ударную вязкость по Шарпи и с применением поправочного коэффициента (рис. 3). Для вывода этого поправочного коэффициента были исследованы результаты измерительных ударных испытаний для разделения энергии возникновения и распространения.

Совершенствование методов

Наибольшие усилия были направлены на совершенствование модели ВТС, которая рассматривает сопротивление разрушению и задающую силу, как несвязанные процессы и позволяет делать надежные прогнозы для низкосортных сталей. Большинство авторов работало с поправочными коэффициентами для отработки модели относительно разброса в прогнозах.

Адаптация модели ВТС CSM (BTC-CSM)

Итальянская компания CSM (Centro Sviluppo Materiali) предложила использование поправочного коэффициента 1,7 для труб класса X100 [22]. Коэффициент является чисто эмпирическим и выведен на основе

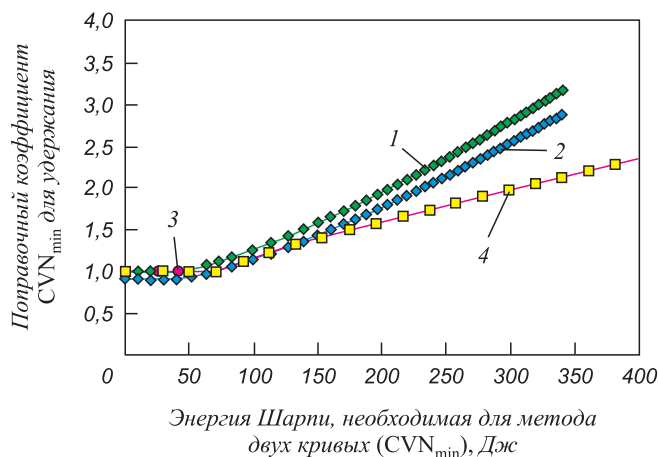


Рис. 3. Различные поправочные коэффициенты, разработанные на основе энергии Шарпи для удержания пластического разрушения с TCM:

- 1 – Уравнение Wilkovski 1977 для сталей марки X70 и ниже;
- 2 – Уравнение Wilkovski со статистической коррекцией на основе полномасштабных испытаний сталей марки X70 и ниже;
- 3 – Данные Feamehough 1977; 4 – Уравнение Leis 2000

сравнения рассчитанных и фактических значений работы удара KV основного металла труб, на которых произошла остановка разрушения в ходе полномасштабных испытаний. В свое время этот коэффициент казался пригодным, однако позже выяснилось, что даже такой высокий поправочный коэффициент приводит к неточному прогнозированию удержания.

Адаптация модели BTC Leis (BTC-LEIS)

Посредством разделения доли энергии возникновения и распространения при испытаниях на ударную вязкость по Шарпи Leis [23] вывел формулу расчета необходимой работы удара KV для сталей с энергией удара выше 100 Дж, представленную ниже:

$$CVN_{BTC-LEIS} = CVN_{BTC} + 0,002CVN_{BTC}^{2,04} - 21,18, \quad (1)$$

где показано увеличение необходимой прочности соответственно увеличению значений, рассчитанных с использованием оригинальной модели BTC. Автор сообщил о повышении качества прогнозирования по сравнению с оригинальной моделью.

Адаптация модели BTC Wilkowski (BTC-WILK)

На основе инструментированных испытаний DWTT и на ударный изгиб Шарпи с V-образным надрезом, Wilkowski [24] разработал формулу, аналогичную Leis, для коррекции изначально рассчитанной энергии удержания BTC, если энергия превышает определенный уровень:

$$BTC_{WILK} = 0,056(0,1018CVN_{BTC} + 10,29)^{2,597} - 16,8. \quad (2)$$

По результатам корреляции инструментированных испытаний DWTT на модифицированных образцах,

которые снижают энергию возникновения трещин, и испытаний на ударный изгиб Шарпи с V-образным надрезом, оценивалась доля обеих энергий при ударных испытаниях.

Модель Комитета по высокопрочным трубам (HLP)

Комитет по высокопрочным трубам (HLP) Японии [25] разработал имитационную модель, представляющую собой динамический вариант метода BTC, для расчета длины распространения трещины. Этот метод, как сообщается, показал хорошие результаты прогнозирования для сталей до X80 класса. Дополнительной особенностью этого метода является замена энергии Шарпи (работы KV) энергией DWTT с предварительно нанесенной трещиной. Переоценка результатов испытаний по распространению разрушения для высокопрочных сталей (в основном, X100 и выше) показала некоторое улучшение качества прогнозирования, особенно в отношении скорости разрушения (рис. 4). С другой стороны, энергия удержания не была корректно рассчитана, как в случае с оригинальной моделью BTC.

Модель Sumitomo

На основе исследования неопределенности ключевых переменных, которые влияют на прогнозирование модели HLP, были разработаны новые уравнения для кривой скорости распространения трещины [26]. За счет этой корректировки было достигнуто дальнейшее повышение качества прогнозирования скорости распространения трещины. После переоценки результатов испытаний X100 появилась возможность объяснения результатов неточного прогнозирования процесса распространения. Авторы пришли к выводу, что при использовании их модели и нахождения объяснения внезапному распространению может быть спрогнозирован процесс удержания распространения трещин в стали X100.

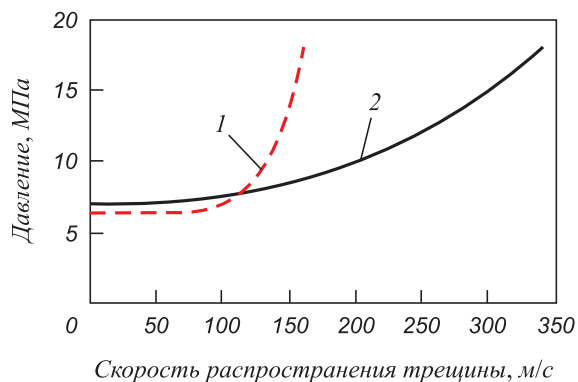


Рис. 4. Сравнение кривых скорости распространения трещины на основе метода Бателли и уравнения HLP [25]. Прогнозируемые кривые скорости распространения трещины в трубе при испытаниях ECSC. Экспериментально измеренная скорость распространения трещины составила около 310 м/с:
1 – Battelle (Eq. 1); 2 – HLP (Eq. 5)

Дальнейшие разработки

Leis поставил вопрос о том, является ли традиционно используемая ударная вязкость объективным параметром для сравнения труб, которые обладают способностью удерживать разрушения и тех труб, которые такой способностью не обладают [27]. Вместо этого, по аналогии с возникновением разрушения, можно предположить, что после достижения определенного уровня вязкости разрушение контролируется напряжением пластического течения. Если предположить, что это так, то разрушение будет определяться распространением неустойчивости растяжения, а не бегущей трещиной. Как следствие, для описания свойств могут потребоваться совершенно другие методы испытаний. Будет интересно посмотреть, подтвердят ли эти идеи будущие исследования.

Экспериментальные исследования

Были проведены исследования металла труб, аналогичных тем, которые использовались при полномасштабных испытаниях распространения разрушения [3]. Были исследованы различные типы материалов в отношении восприимчивости к растрескиванию, которые были последовательно пронумерованы, как 1, 2 и 3.

Поскольку инструментированные испытания падающим грузом BDWT могут стать альтернативой испытаниям на ударную вязкость по Шарпи даже при наличии конкретных проблем, касающихся интерпретации энергии, были проведены исследования для получения более полного представления об этих испытаниях. Для этой цели измерительная испытательная установка была оборудована лазерной системой для непрерывного измерения положения молота на протяжении всех испытаний и системой высокоскоростного видеоконтроля для отслеживания изменений трещины и образца.

Для оптимизации процесса возникновения трещины на образцы были нанесены прессованные и шевронные надрезы и трещины. Кривые температуры перехода регистрировались как для инструментированных испытаний падающим грузом BDWT, так и для испытаний на ударную вязкость по Шарпи.

Вначале испытания Шарпи и инструментированные испытания падающим грузом BDWT проводились и

оценивались с использованием «традиционного» метода. В дополнение к этому, для каждого образца были определены показатели поперечного уширения и разделения.

Испытания на ударную вязкость по Шарпи были проведены в соответствии с ASTM (рис. 5, б) и ISO (рис. 5, а) с помощью копра для испытания на удар с энергией 600 Дж. Заштрихованные символы обозначают неповрежденные образцы, пустые символы – поврежденные образцы. Первым и наиболее очевидным наблюдением является то, что большинство образцов оставались неповрежденными вплоть до температуры $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Даже при уровнях энергии 150 Дж (см. рис. 5, а, треугольники) образцы, по крайней мере, из одного материала, не разрушались. С другой стороны, при испытаниях по ASTM присутствуют два разрушенных образца (отмечены стрелками на рис. 5, б), которые в процессе разрушения продемонстрировали значительно более низкие значения энергии, чем неповрежденные образцы при испытаниях при одинаковой температуре. Разность зарегистрированных в процессе испытаний значений энергии между неповрежденными и поврежденными образцами достигает коэффициента 1,7. Это наблюдение не относится к высокопрочному материалу, для которого большинство образцов были повреждены при испытаниях по ASTM и где разница между значениями энергии поврежденных и неповрежденных образцов не так ярко выражена, как описано выше. Обычно, как и ожидалось, в испытаниях по ASTM отмечались более высокие значения энергии в зоне работы разрушения. Глядя на диаграммы, можно оценить испытываемый материал по зонам перехода в указанном диапазоне температур. В действительности, вплоть до температур $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, разрушения либо полностью отсутствовали, либо отмечалось 100 % количества вязкой составляющей. Первые признаки хрупкого разрушения были заметны при $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ для всех материалов при испытаниях по ISO, при $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ при испытаниях по ASTM для высокопрочных материалов и $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ для других материалов, исключая два примера при $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для большинства образцов, оценка показателей поперечного уширения и индекса расщеплений (количество расщеплений на 1 мм в поперечном сечении образца) была невозможна. Тем не менее, при осмотре поверхнос-

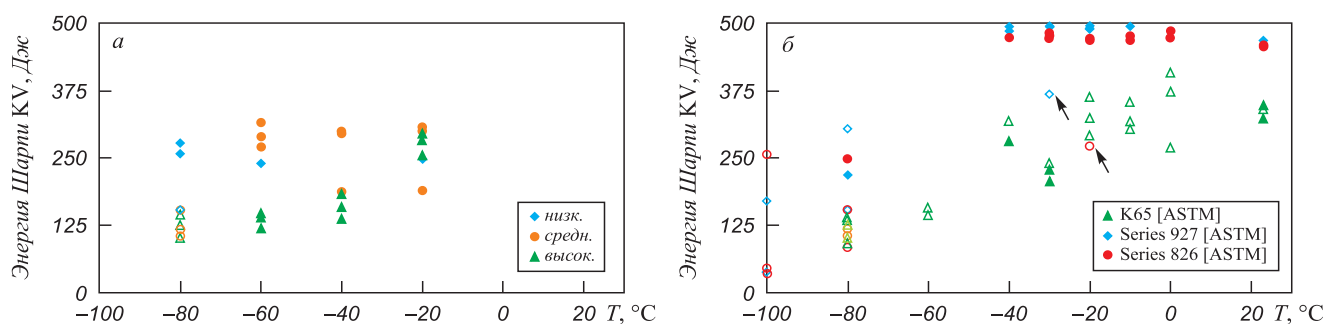


Рис. 5. Результаты испытаний на ударную вязкость по Шарпи

тей разрушения можно было выявить, как изменяется плотность расщеплений на различных образцах.

Были проведены стандартные испытания падающим грузом BDWT надрезанного образца с оценкой повреждений по API5L (рис. 6). Как и ожидалось, по сравнению с испытаниями на ударную вязкость по Шарпи, вследствие большего размера образца BDWT, возникают большие ограничения и кривая перехода несколько смещается в сторону более высоких температур. Различия между тремя материалами менее выражены, чем при испытаниях по Шарпи, хотя материалы с высокой и средней плотностью расщеплений демонстрируют несколько меньшие значения количества вязкой составляющей при одинаковой температуре. Материал с низкой плотностью расщеплений соответствует стандартным требованиям до -40°C , тогда как другие материалы квалифицируются только при температурах выше -10°C . Что касается потребляемой энергии, в ходе испытаний не было отмечено значительного отличия между испытываемыми материалами. Значения колебались в пределах полосы разброса без каких-либо явных тенденций. Метод подготовки трех надрезов, а именно прессованного, шевронного и предварительной трещины, использовался для оценки процесса образования трещины.

Прессованный надрез обычно предполагает стандартный надрез, который наносится на образец прессом с относительно тупой насадкой. Эта процедура приводит к пластификации непосредственно перед надрезом, что может привести к более высокой устойчивости к образованию трещины, особенно в высокопрочных сталях. Для компенсации этого допускается использование шевронных надрезов для облегчения процесса возникновения трещины. Чтобы усилить этот эффект, но только в исследовательских целях, поскольку это не предусмотрено нормами и стандартами, на образец для испытания падающим грузом BDWTT может быть предварительно нанесена усталостная трещина. Если необходимо избежать пластификации материала перед надрезом, эта проблема решается использованием острого надреза с минимальным сопротивлением про-

цессу возникновения трещины. Теоретически, процесс распространения трещины с точки зрения поверхности повреждения и потребляемой энергии не должен значительно зависеть от типа надреза. Если это предположение верно, то энергия возникновения, а также полная энергия могут снижаться в образцах с шевронными надрезами и образцах с усталостной трещиной, в то время как энергия распространения останется постоянной.

В качестве примера выше приведены результаты испытаний материала с небольшим количеством расщеплений (рис. 7). В отличие от теории, шевронный надрез демонстрирует наименьшую энергию на этапах возникновения и распространения трещины. Хотя это более выражено на этапе возникновения, эти испытания показали, что этап распространения также зависит от типа надреза. С другой стороны, за исключением материала со средними показателями, поверхность разрушения полностью независима от типа надреза.

Что касается возможных связей между количеством расщеплений в изломе и потребляемой энергией или деформируемостью образцов, никакой четкой тенденции отмечено не было. Расщепления выявлялись в верхней области переходного режима (переходной кривой), когда количество вязкой составляющей в изломе образца превышало 75 %. Материалы с расчетными средними и высокими показателями расщеплений продемонстрировали явные расщепления на поверхности разрушения, в то время как другие были практически свободны от расщеплений. Фактические показатели расщепления материала с высокими и средними значе-

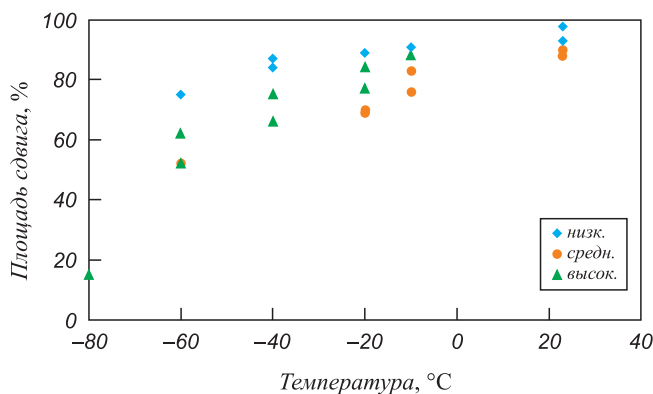


Рис. 6. Результаты испытаний падающим грузом BDWT надрезанного образца

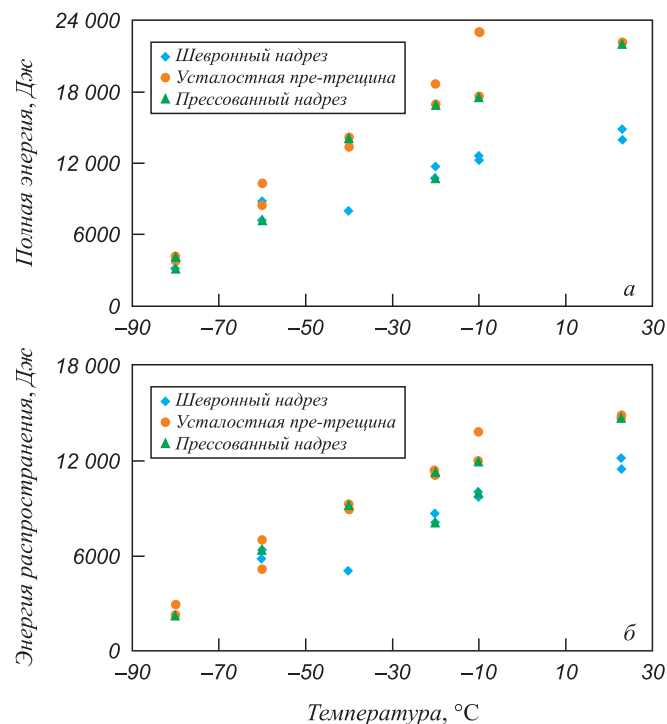


Рис. 7. Сравнение образцов с прессованным, шевронным надрезом и образцов с усталостной трещиной по результатам испытаний BDWT

ниями были относительно сходными в общей полосе разброса, однако вид поверхностей несколько отличался. Расщепления в материале с высокими показателями отличались несколько более острым углом к внешней поверхности. Несмотря на описанные различия, не обнаружилось четкой связи ни с поперечным уширением, которое осталось совершенно незатронутым процессом расщеплений и зависело только от количества вязкой составляющей в изломе образца, ни с самой потребляемой энергией.

В целях достижения более глубокого понимания процесса развития трещины при испытаниях падающим грузом BDWT, на установке падающего груза было смонтировано дополнительное оборудование. Лазерная система использовалась для постоянного измерения положения молота на всем протяжении испытаний. Важная информация, типа скорости движения молота, необходима для расчета потребляемой энергии. Как правило, это достижимо и без измерения фактической скорости посредством построения графика силы относительно времени и последующего расчета по формуле

$$\Delta E_0 = E_a \left(1 - \frac{E_a}{4E_0} \right) = \bar{v} \int_0^{\tau} P(t) dt, \quad (3)$$

где скорость приближенно определяется:

$$\bar{v} = \frac{1}{2} (v_0 + v_f) = v_0 \left(1 - \frac{E_a}{4E_0} \right). \quad (4)$$

Значения энергии, рассчитанные по формуле (3), и фактическая скорость отличаются не более, чем на

1 %. Поскольку это было проверено в ряде испытаний, в дальнейшем для расчетов использовалась данная формула.

Как правило, при невозможности точного определения места возникновения трещины, с хорошим приближением можно предположить, что трещина возникает в точке максимальной силы, а образец разрушается, когда сигнал равен нулю. Зона перед максимальным значением представляет энергию возникновения, а прочие – энергию распространения. При сопоставлении энергии распространения трещины с количеством вязкой составляющей в изломе образца часто встречается большой разброс. Потенциальной причиной этого разброса является расхождение между сегментом поверхности разрушения, который используется для оценки количества вязкой составляющей, и сегментом графика силы относительно времени, которые не совпадают, как описано выше. Можно попробовать свести к минимуму этот разброс посредством расчета энергии распространения, относящейся к тому сегменту образца, где происходит фактическая оценка поверхности разрушения. Видеоизображения могут помочь для определения времени начала и завершения на графике.

На рис. 8 представлен график силы относительно времени и соответствующие кадры, записанные видеосистемой в эквивалентное время. Изображения ясно демонстрируют, что стабильная одиночная трещина развивается позднее, чем кривая достигает своего максимума. Первые признаки образования трещины появляются в сегменте, отмеченном на графике оранжевым цветом. Соответствующее изображение показано слева. Изоб-

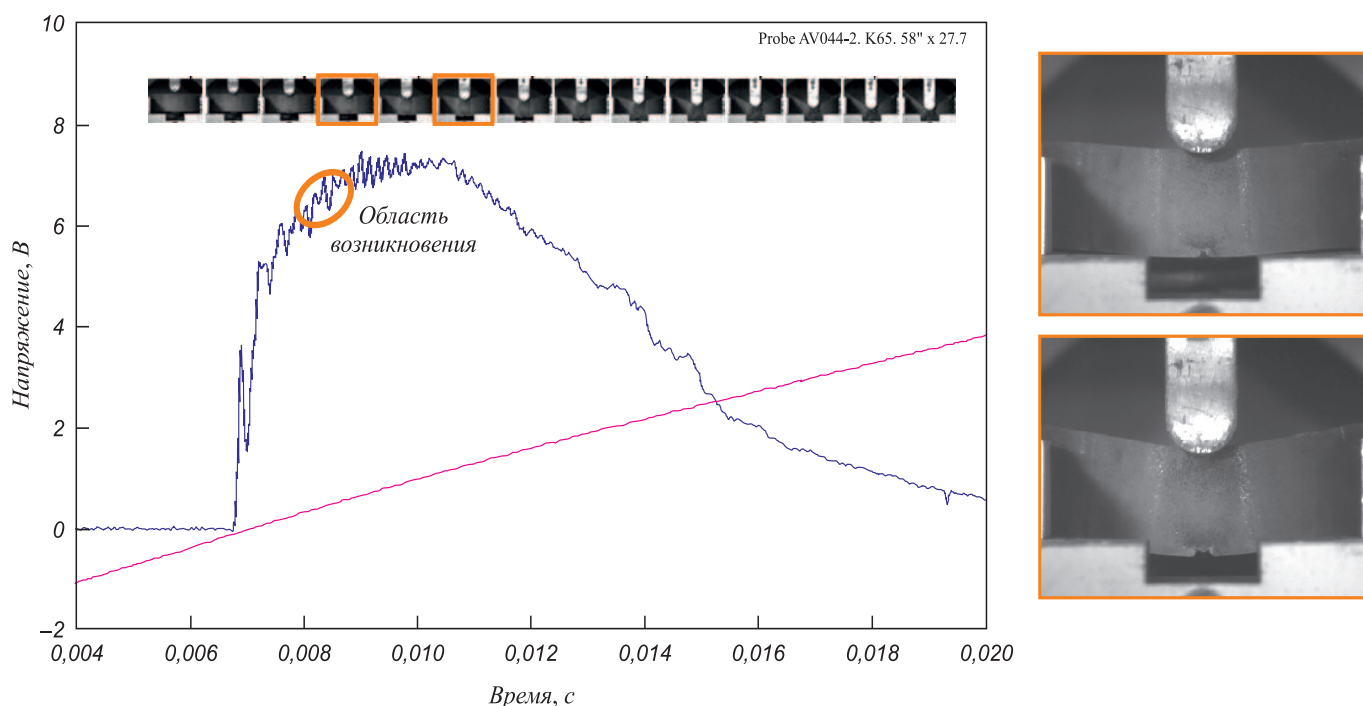


Рис. 8. График силы относительно времени и синхронизированные изображения процесса развития трещины в образце

ражение справа показывает первые признаки развития стабильной трещины и соответствует началу линейного сегмента графика. Еще один важный вывод связан с концом линейного сегмента графика: как можно видеть на цифровых изображениях, образец на тот момент не разрушен. На самом деле, на тот момент образец не затронут на одну треть своей ширины. С другой стороны, от этой точки и далее происходит значительное отклонение образца. Это приводит к неопределенному напряженному состоянию, в котором опоры, трение и молот оказывают сильное влияние на потребляемую энергию в отличие от трещины, являющейся единственным потребителем энергии. Таким образом, этот сегмент графика силы относительно времени не следует учитывать при расчетах энергии распространения.

Графики силы относительно времени для трех испытываемых материалов были пересмотрены в соответствии с описанной выше методикой. Как и следовало ожидать, новые расчеты привели к меньшим значениям энергий распространения. С другой стороны, удельная энергия оказалась как выше, так и ниже удельной энергии, рассчитанной «традиционным» способом, в зависимости от кривой каждого испытания падающим грузом BDWT. Серии испытаний, завершённые к настоящему времени, не позволяют сделать однозначного статистического вывода относительно разброса. Этот вопрос должен быть изучен в предстоящих исследованиях. На рис. 9 представлена расчетная энергия в зависимости от количества вязкой составляющей. На этом графике видно, что энергия в образцах с высокой плотностью расщеплений обозначает нижнюю границу по сравнению с другими материалами.

Корреляция с результатами полномасштабных испытаний

Как упоминалось выше, исследуемый в настоящей статье материал был проверен в ходе полномасштабных

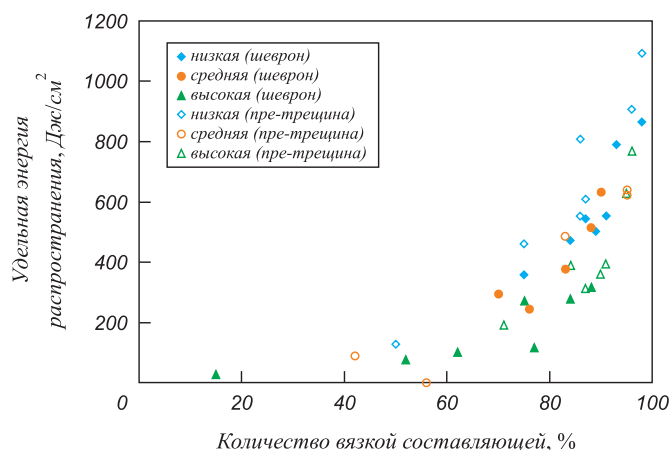


Рис. 9. Энергия распространения, рассчитанная по стадии стабильного распространения трещины в процессе испытаний падающим грузом BDWT

испытаний распространения разрушения. Использовались трубы класса K65 с наружным диаметром 1420 мм и толщиной стенки 27,7 мм. В испытываемую плетть подавался сжатый воздух под давлением 150 бар, испытания проводились при температуре -10°C .

На основе метода ВТС была рассчитана работа удара KV, необходимая для остановки разрушения, которая составила приблизительно 150 Дж. Поскольку было известно, что оригинальная модель ВТС недооценивает необходимую способность к удержанию, применялся рекомендованный поправочный коэффициент 1,43, что повысило требуемую энергию удара примерно до 200 Дж. Как видно на рис. 10, все испытываемые трубы, за исключением одной, должны были обеспечить удержание распространения разрушения. В действительности, большинство труб не смогли этого обеспечить, за исключением двух труб, которые справились с этой задачей. Работа удара KV составляла более 300 Дж. С другой стороны, две не прошедших испытание трубы подвергались воздействию энергии удара 310 Дж.

Эти результаты показывают, что точное прогнозирование по методу ВТС невозможно, даже при использовании рекомендованного поправочного коэффициента. Очевидно, что из-за относительно высокого давления необходимая работа удара KV была очень высокой (по сравнению с исходными уровнями ниже 100 Дж) и должен быть поставлен вопрос о значимости и применимости такой высокой энергии удара.

С другой стороны, полные энергии DWTT, предположительно, допускают установление различий между трубами, способными обеспечить удержание, и трубами, которые неспособны на это (рис. 11). Интересно, что эти семь труб находились в очень узкой полосе разброса относительно работы удара KV, в то время как максимальный разброс энергии DWTT составлял около 50 %. Результаты испытаний показали, что трубы с полной удельной энергией около 800 Дж/см² не смогли удержать распространение разрушения, а трубы с энергией DWTT более 1000 Дж/см² способны удержать

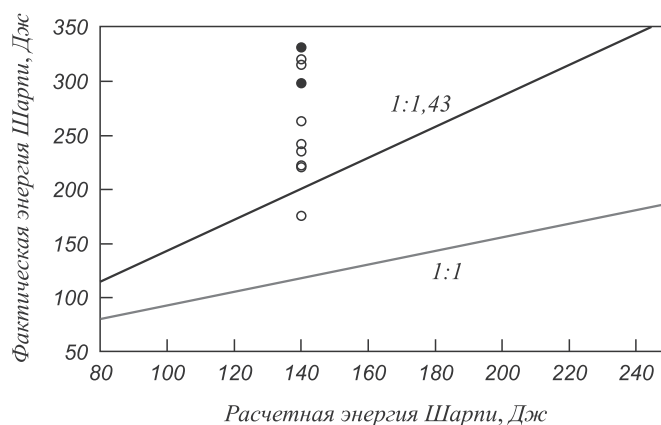


Рис. 10. Фактическая энергия Шарпи относительно энергии, рассчитанной по методу ВТС:
○ – отсутствие удержания; ● – удержание

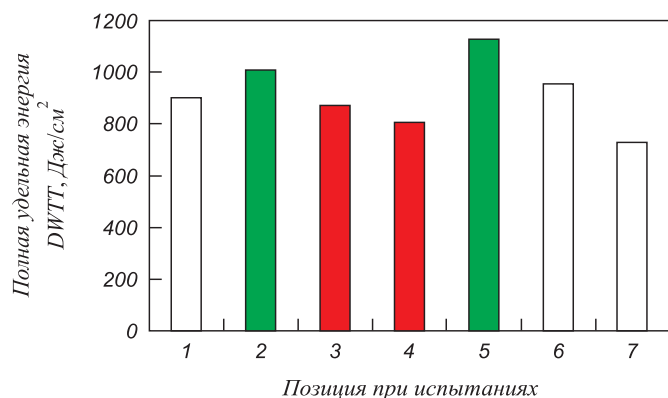


Рис. 11. Полная удельная энергия DWTT труб, проходящих испытания на стойкость к распространению разрушения:

□ – не задействована; ■ – остановка разрушения; ■ – распространение разрушения

разрушение при указанных условиях испытаний. Очевидно, что эти чисто эмпирические наблюдения действительно только для базовых условий испытаний. Тем не менее, они подтверждают, что результаты DWTT более пригодны для описания стойкости к разрушению высокопрочных сталей.

Итоги и выводы

Выход за рамки данных полномасштабных испытаний по распространению разрушения, на основе которых были выведены эти эмпирические или полуэмпирические модели, увеличивает вероятность получения объективных прогнозов. Было подтверждено, что дело обстоит именно так, особенно для высокопрочных сталей (категории X80 и выше).

Данные исследования были проведены, чтобы понять и разрешить скрытые проблемы. В рамках этой области предметом исследования стали другие испытательные методики и уточненные существующие модели. На сегодняшний день эти усилия не принесли новых решений, способных решить проблему.

Многообещающим альтернативным методом, заменяющим испытания на ударную вязкость по Шарпи для определения стойкости материала к распространению вязкого разрушения, предположительно становятся испытания падающим грузом DWTT, которые сочетают в себе некоторые преимущества в отношении энергии удара (например, пригодность для производственных испытаний) со свойствами, которые могут помочь преодолеть ограничения испытаний на ударную вязкость (связка: ширина образца, полная толщина стенки и возможность разделить энергию зарождения и энергию распространения трещины).

В этой связи было проведено исследование сталей класса прочности K65, прошедших полномасштабные полигонные испытания. Публикации, касающиеся этих испытаний, подтверждают обнаружение взаимосвязи между образованием расщеплений и неспособностью

труб к удержанию разрушения. Таким образом, лабораторные испытания, проведенные в рамках этой работы, были направлены на выявление возможных доказательств снижения прочности или деформируемости материала, подверженного расщеплениям. Результаты могут быть суммированы следующим образом:

- обнаружена заметная тенденция относительно образца, неразрушенного в ходе испытаний по Шарпи. Разница в работе удара KV между разрушенными и неразрушенными образцами проявлялась при более высоких температурах, тогда как при переходе к более низким температурам эти параметры выравнивались;
- переход к низким температурам при испытаниях на ударную вязкость по Шарпи приводил к снижению работы удара KV без разрушения образца до температуры $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- испытания по ASTM продемонстрировали еще более высокие энергии удара на уровне около 500 Дж. Вызывает большие сомнения, что эти высокие значения не представляют никакого интереса;
- энергия разрушения образцов BDWT позволяет лучше определять различия между трубами со способностью удержания разрушения и трубами без этой способности;
- нанесение на образцы шевронных надрезов и усталостных трещин не снижает устойчивости к образованию трещин, а проведенная серия испытаний не выявила каких-либо преимуществ при использовании этих трудозатратных и дорогостоящих методов предварительного нанесения надрезов;
- не существует прямой связи между плотностью расщеплений, выявляемых при лабораторных испытаниях, и способностью труб к остановке разрушения при полномасштабных полигонных испытаниях. В частности, энергия разрушения образцов BDWT и поперечное уширение этих образцов демонстрируют значительный разброс при сопоставимых значениях плотности расщеплений;
- для расчета энергии распространения трещины должен быть выделен участок графика зависимости силы от времени движения бойка, соответствующий стадии стабильного распространения трещины. Чтобы прийти к сопоставимым результатам, необходимо либо точно соблюдать это условие, либо разработать общую процедуру оценки вне зависимости от оператора испытаний.

На основе этих выводов, вопрос о пригодности испытаний на ударную вязкость по Шарпи для прогнозирования способности к удержанию разрушения для высокопрочных материалов встает еще более остро. Дальнейшая работа будет направлена на развитие ис-

пытаний падающим грузом BDWT, как перспективной альтернативе, определенной по результатам этой работы. Недостаток на данный момент заключается в том, что инструментированные испытания в настоящее время не стандартизированы, а оптимизация оценки энергии распространения требуют либо дополнительного развития инструментальной методики испытаний, либо четкой регламентации процедуры их проведения. Последнее в некоторых случаях может быть затруднено, когда участок стабильного развития трещины невозможно с легкостью идентифицировать на самом графике. В дополнение к испытаниям, значительное внимание будет уделено моделированию методом конечных элементов, которое может оказать неоценимую помощь в понимании результатов испытаний. Первые результаты будут опубликованы в ближайшее время [28]. Кроме того, будет выполнена оценка динамической трещиностойкости методом испытания падающим грузом BDWT и соответствующие измерения отклонений. Ожидается появление дополнительной информации, которая поможет достоверно прогнозировать способность к остановке разрушения для высокопрочных материалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Eiber R.J., Bubenik T.A., Maxey W.A. 1993. Battelle Columbus.
2. Demofonti G., Mannucci G. Roovers P. 3R International, Special Edition. 1. 2008.
3. Pyshmintsev I.Y., et al. Pipeline Technology Conference, Ostend, 2009, paper Ostend. 2009-078.
4. Pussegoda L. et al. 6th International Pipeline Conference, IPC 2006. Calgary, Alberta, Canada, 2006. Paper IPC06-10231.
5. Wilkowski G. American Gas Association / European pipeline Research Group Seminar IV, 1981.
6. Wilkowski G. and Eiber R. ASM. ISBN 0-87170-027-1. 1978. P. 201 – 226.
7. Wilkowski G., Rudland D., Xu H. and Sanderson N. 6th International Pipeline Conference, IPC 2006, Calgary, Alberta, Canada, 2006, paper IPC06-10350.
8. Wilkowski G. et al.: Recent Development On Determining Steady-State Dynamic Ductile Fracture Toughness from Impact Tests. Proceedings of 3rd International Pipeline Technology Conference, Brugge, Belgium. May 21 – 24, 2000. V. 1, 2000. P. 359 – 386.
9. Kanninen M.F. Joint final report by SwRI, CSM and Snam to the PRC, 1991.
10. Newman J.C. Jr., James M.A. and Zerbst U. Eng. Fracture Mechanics, 70. 2003. P. 371 – 385.
11. Demofonti G., Buzzichelli G., Venzi S. and Kanninen M. 2nd International Pipeline Technology Conference. V. II. Ostend, Belgium. 1995. P. 503 – 512.
12. O'Donoghue P.E., Kanninen M., Leung C. et al. Int. Journal Pressure Vessels and Piping, 70. 1997. P. 11 – 25.
13. Rudland D., Wilkowski G., Feng Z. et al. Eng. Fracture Mechanics, 70. 2003. P. 567 – 577.
14. Xu S., Bourchard R. and Tyson W. 5th International Pipeline Conference, IPC 2004. Calgary, Alberta, Canada. 2004. Paper IPC04-0192.
15. Xu S. and Tyson W. 7th International Pipeline Conference, IPC 2008. Calgary, Alberta, Canada. 2008. Paper IPC08-64060.
16. Martinelli A. and Venzi S. Eng. Fracture Mechanics, 53. 1996. P. 263 – 277.
17. Xu S., Bourchard R. and Tyson W. Eng. Fracture Mechanics, 74. 2007. P. 2459 – 2464.
18. Hashemi S., Howard I., Vates J. et al. 5th International Pipeline Conference, IPC 2004. Calgary, Alberta, Canada. 2004. Paper IPC04-0610.
19. Darcis P. et al. 6th International Pipeline Conference, IPC 2006. Calgary, Alberta, Canada. 2006. Paper IPC06-10172.
20. Fonzo A., Meleddu A., Demofonti G. et al. 6th International Pipeline Conference, IPC 2006. Calgary, Alberta, Canada. 2006. Paper IPC06-10331.
21. Leis B. 3rd IPTC.
22. Mannucci G. et al. 13th Biennial Joint Technical Meeting, New Orleans, USA. 2001.
23. Leis B., Eiber R., Carlson L. and Gilroy-Scott A. International Pipeline Conference. V. II. 1998. ASME.
24. Papka S. et al. 13th International Offshore and Polar Engineering Conference. Hawaii. 2003.
25. Makino H. et al. ISIJ International, 41. 2001. P. 381.
26. Makino H., et al. 7th International Pipeline Conference, IPC 2008. Calgary, Alberta, Canada. 2008. Paper IPC08-64078.
27. Leis B., Zhu X.-K., Forte T. et al. E. ICF, Turin. 2005.
28. To be published: Nonn A. and Kalwa C.: Modelling of Damage Behaviour of High Strength Pipeline Steel. European Conference on Fracture, 2010.

© 2012 г. М. Эрделен-Пепплер, Х.-Г. Хилленбранд,
С. Кальва, Г. Кнауф
Поступила 10 ноября 2011 г.

УДК 669.018.298.3

А.Б. Арабей¹, И.Ю. Пышминцев², В.М. Фарбер³, В.А. Хотинов³, А.О. Струин²

¹ОАО «Газпром»

²ОАО «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности»

³Уральский федеральный университет

ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ КЛАССА ПРОЧНОСТИ X80 (K65)

Надежность эксплуатации магистральных трубопроводов для транспортировки энергоносителей определяется комплексом свойств основного металла труб и сварных соединений. Разработка новых сталей, исполь-

зование современных технологий позволили получать высокопрочный лист и, соответственно, сварные трубы с исключительно высоким уровнем вязко-пластических характеристик [1, 2]. Это определило повышенное вни-