

УДК 539.42

DOI: 10.32326/1814-9146-2020-82-4-493-506

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПЫТАНИЯ ПАДАЮЩИМ ГРУЗОМ ВЯЗКОЙ ТРУБНОЙ СТАЛИ ПРИ ТРЕХТОЧЕЧНОМ ИЗГИБЕ

© 2020 г.

**Абакумов А.И.¹, Сафронов И.И.¹,
Смирнов А.С.¹, Арабей А.Б.², Глебов А.Г.³,
Есиев Т.С.², Сарычев Б.А.⁴**

¹*Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский
научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
Саров, Российская Федерация*

²*ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Москва, Российская Федерация*

³*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Москва, Российская Федерация*

⁴*ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»,
Магнитогорск, Российская Федерация*

abakumov@vniief.ru

Поступила в редакцию 26.11.2020

Исследуются процессы, реализуемые при стандартном испытании падающим грузом образца металла магистральных трубопроводов. Испытания являются приемочными испытаниями металла труб, которые должны обеспечивать высокую сопротивляемость трубопроводов протяженному разрушению. Проведено численное моделирование испытания падающим грузом полнотолщинного образца стали класса прочности К65 с использованием параллельной конечно-элементной компьютерной программы ДАНКО разработки РФЯЦ–ВНИИЭФ. Подробное описание формирования излома разрушения образца потребовало достаточно мелкой расчетной сетки и суперЭВМ.

Для проведения численного моделирования процесса использовались константы диаграммы деформирования, полученные на основе статических и динамических испытаний на растяжение образцов при комнатной температуре. Для описания деформирования и разрушения металла применялась модифицированная модель макровязкого разрушения сталей Гурсона – Твергаарда – Нидельмана. Модификация позволяет описывать прямые и косые срезы, а также их комбинацию при вязком разрушении маломерных объектов (стержней, пластин, оболочек).

Представлены рассчитанные зависимости перемещения вершины трещины от перемещения груза и усилия сопротивления образца от перемещения вершины трещины. Получено удовлетворительное согласие расчетов с результатами испытаний по силовой характеристике «сила–перемещение», деформированным профилям и макрогеометрии изломов образца после испытания. Результаты расчетов раскрывают механику подготовки, страгивания и распространения трещины в образце, дают распределение энергии пластического деформирования в процессе динамического разрушения.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке требований и условий применения «инструментированного» испытания падающим грузом, а также для численного моделирования протяженного разрушения в магистральном трубопроводе.

Ключевые слова: метод испытания на ударный изгиб (ИПГ, DWTT), пластическое деформирование и вязкое разрушение образца, численное моделирование, сравнение расчета с экспериментом.

Введение

Важной характеристикой металла труб магистральных трубопроводов является его сопротивляемость протяженному разрушению [1–4]. В связи с этим одним из ключевых приемочных испытаний металла труб является испытание падающим грузом (ИПГ) по ГОСТ 30456-97 [5].

Для прогноза сопротивляемости вязкой трубной стали протяженному разрушению с использованием компьютерного моделирования необходимы расчетные модели, адекватно отражающие динамический процесс страгивания и распространения трещины, в том числе и в условиях ИПГ. В настоящей статье рассматриваются вопросы численного моделирования поведения образца трубной стали в процессе ИПГ, проводится сопоставление с результатами испытаний, определяются расчетные параметры, характеризующие поведение используемых при ИПГ образцов (ИПГ-образцов).

Подробное аналитическое описание кинематики, динамики и деформации ИПГ-образца представлено в статье [6]. Отдельные аспекты ИПГ обсуждаются в [7–9]. Имеется ряд публикаций, посвященных численному моделированию ИПГ [10–13].

Отличительной особенностью настоящего исследования является применение для расчетов ИПГ модифицированной модели макровязкого разрушения сталей Гурсона – Твергаарда – Нидельмана (GTNm) [14, 15]. Модель GTNm позволяет добиться согласия с экспериментом не только по силовой характеристике образца «сила–перемещение», но и по профилю излома образца после ИПГ.

Испытание падающим грузом

Испытание на ударный изгиб (ГОСТ 30456-97) основано на разрушении «надрезанного» образца падающим грузом (ИПГ или DWTT по ASTM). Геометрия образца приведена на рис. 1. Толщина образца обычно равна толщине стенки трубы t (мм) – так называемый полнотолщинный образец.

В соответствии с ГОСТ 30456-97 в результате ИПГ определяют доли вязкой и хрупкой составляющих излома при различных температурах. Если этим ограничиться, то такие испытания оказываются малоинформативными, особенно для высоковязких сталей, для которых доля вязкой составляющей излома достигает до 100%. Поэтому в настоящее время установки для таких испытаний оснащаются акселерометром. Это позволяет, зная массу падающего груза, определять нагрузку, скорость движения и величину перемещения груза в зависимости от времени.

Для оценки результатов расчетов использованы результаты ИПГ, проведенные с применением «инструментированного» копра DWT40 ИМАТЕК на образцах, изготовленных из листов стали класса прочности К65 (Х80) с толщиной 27,7 мм. Заготовки образцов вырезали огневой резкой из листов текущего производства в по-

перечном направлении относительно направления прокатки. Надрез глубиной 5 мм наносили фрезой. Испытания проводились при температуре образца от +20 до –80 °С, использовали два образца на точку.

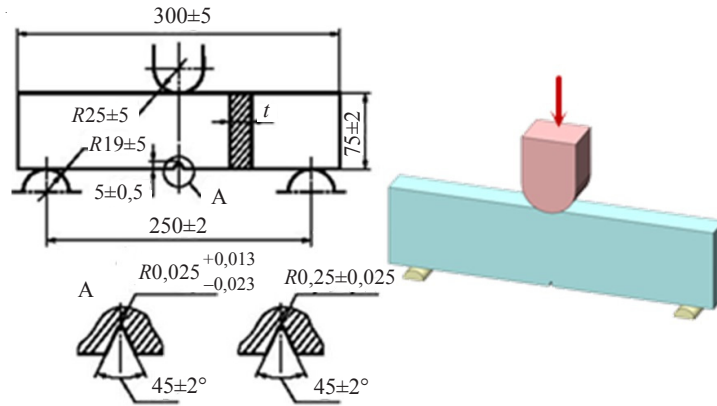


Рис. 1. Геометрия ИПГ-образца и схема нагружения по ГОСТ 30456-97

Параметры модели деформирования и разрушения трубной стали

Для проведения численного моделирования процесса ИПГ использованы константы диаграммы деформирования, полученные на основе статических и динамических (на установке, использующей разрезные стержни Гопкинсона [16]) испытаний на растяжение-сжатие цилиндрических образцов из стали К65 при комнатной температуре. Диаграмма деформирования стали К65 в истинных координатах в условиях статического нагружения приведена на рис. 2.

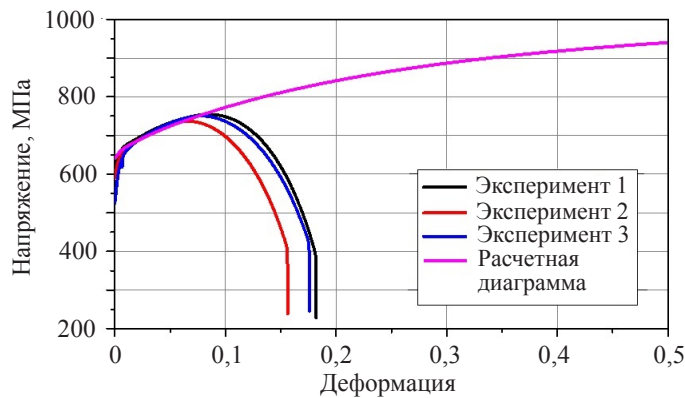


Рис. 2. Статическая диаграмма деформирования стали К65 в истинных координатах

Аналитическое представление расчетной диаграммы, согласно [14], имеет вид:

$$\sigma_T^S = \sigma_T^0 [1 + A(\epsilon_M^p)^n] [1 + B\{1 - \exp(-\beta\epsilon_M^p)\}], \quad (1)$$

где $\sigma_T^0 = 640$ МПа – начальный предел текучести, ϵ_M^p – среднее изменение пластической деформации. Величины $A = 0,2$, $B = 0,3$, $n = 0,4$, $\beta = 5$ – константы модели материала.

Зависимость предела текучести от скорости деформации $\dot{\epsilon}_M^p$ и температуры адиабатного разогрева T_a за счет диссипации пластической деформации принята в виде [9]

$$\sigma_T = \sigma_T^S [1 + L \{ \lg(1 + \dot{\varepsilon}_M^p / \dot{\varepsilon}_0^p) \}^k] [1 - (T^*)^m]. \quad (2)$$

Здесь $T^* = (T_a - T_t) / (T_m - T_t)$, $T_t = 0$ °C, $T_m = 1500$ °C, $L = 0,018$, $k = 1$, $m = 0,8$, $\dot{\varepsilon}_0^p = 1$ с⁻¹.

В качестве определяющих соотношений, как уже говорилось, используется модифицированная модель макровязкого разрушения сталей Гурсона – Твергаарда – Нидельмана (GTNm), описание которой приведено в статье [14]. Согласно [14, 15], в расчетах приняты следующие параметры модели GTNm: упругие константы $E = 210$ ГПа, $\nu = 0,3$; поверхность Гурсона $q_1 = 1,5$, $q_2 = 1$, $q_3 = 2,25$; эволюция пористости $f_0 = 0$, $f_c = 0,07$, $f_F = 0,37$, $f_N = 0,01$, $\varepsilon_N = 0,3$, $s_N = 0,1$; сдвиговый компонент $m = 2$ (вид зависимости Ксю), $q_4 = 0,8$ и $q_5 = 0,25$.

Конечно-элементная модель

Компьютерное моделирование процесса деформирования образца в условиях ИПГ проводилось с использованием параллельной конечно-элементной компьютерной программы ДАНКО [17]. Конечно-элементная модель изображена на рис. 3.

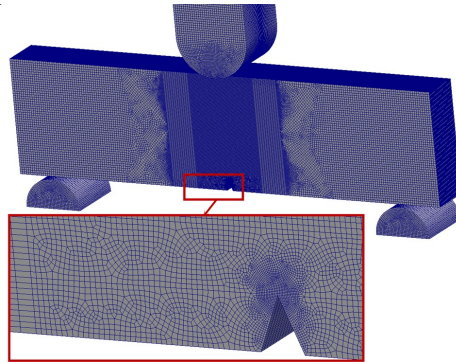


Рис. 3. Конечно-элементная модель ИПГ

Размер грани конечного элемента в зоне вероятного продвижения трещины составлял 0,5 мм, а в зоне формирования и старта трещины – 0,15 мм. Общее количество конечных элементов ≈ 2 млн. Выбор размера конечного элемента основывался на необходимости детального описания процесса разрушения и макрогеометрии излома ИПГ-образца, а также на сходимости получаемого решения. В расчетах учитывалась сила трения Кулона между контактирующими поверхностями с коэффициентом трения 0,2.

Результаты расчетов

Для численного моделирования рассматривалось поведение ИПГ-образца с температурой $T_0 = +20$ °C при его нагружении падающим грузом массой 2500 кг со скоростью удара $V_0 = 6,5$ м/с.

На рис. 4 приведены зависимости усилия сопротивления образца от величины перемещения падающего груза по результатам расчетов и испытаний. Начальные упругие участки опытных кривых содержат два участка частичной разгрузки. Это связано с отражением упругих волн от поверхности контакта ударника с образцом (датчик измерения ускорения размещен на удаленном от удара конце протяженного ударника).

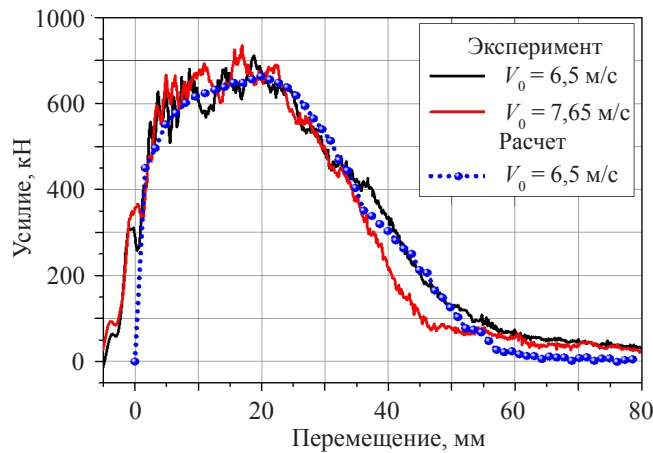


Рис. 4. Зависимость усилия сопротивления образца от величины перемещения падающего груза

Работа, совершенная ударником, рассчитывается как площадь под кривой «усилие–перемещение». Она производит упругопластическое деформирование и разрушение образца, придает скорость образцу, а также тратится на трение контактирующих деталей. По экспериментальным данным работа ударника составляет 27 кДж. До достижения максимального усилия совершается работа 12,3 кДж (около 50%). Если считать, что трещина начинает продвигаться после прохождения максимума силы, то средняя удельная энергия, затрачиваемая на продвижение трещины, составит 7,6 Дж/мм².

На рис. 5 приведены экспериментальный и расчетный изломы образца. Расчетное расслоение по толщине листа было получено введением критерия хрупкого разрушения в поперечном направлении по предельному напряжению с учетом эволюции повреждения. Поперечное напряжение возникает при образовании шейки в растягиваемом образце [6]. Оно расслаивает образец в «слабых» плоскостях проката до пробоя трещины в этой области.



Рис. 5. Вид поверхности разрушения

На рис. 6 сопоставлены экспериментальный и расчетный боковой профиль образца после испытания.

Имея оцифрованную геометрию образца после испытания, можно провести сравнение поперечных сечений образца в опыте и расчете (рис. 7). Здесь внешний контур сечения образца после испытания обведен черной линией; на расчетном

сечении приведено поле пластических деформаций (красный цвет соответствует деформации более 30%).

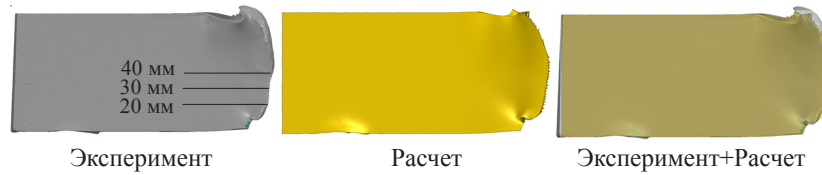


Рис. 6. Остаточное состояние части разрушенного образца

Положение сечения по высоте образца	Поперечное сечение образца
20 мм	
30 мм	
40 мм	

Рис. 7. Расчетное и экспериментальное поперечное сечение образца по высоте

Сопоставляя расчетные данные с данными испытаний, можно отметить, что наблюдается удовлетворительное согласие по силовой характеристике «сила–перемещение», деформированным профилям и макрогеометрии изломов образца после испытания. Результаты расчетов позволяют получить дополнительную информацию по поведению ИПГ-образца. На рис. 8 представлено рассчитанное состояние образца в различные моменты времени продвижения груза.

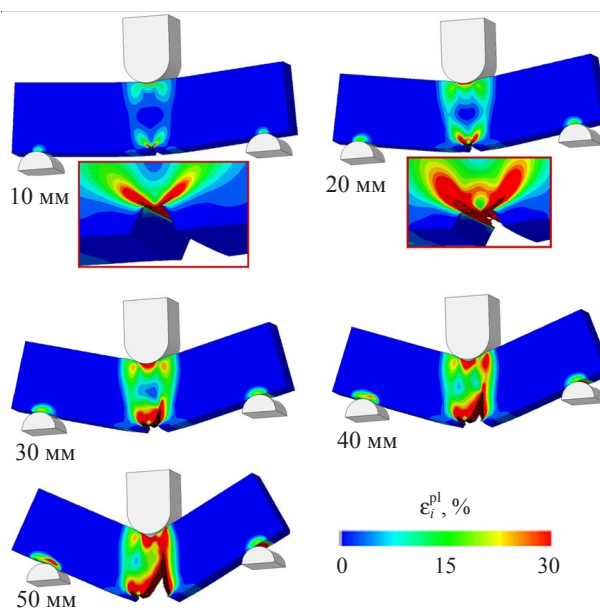


Рис. 8. Состояние образца при различных величинах перемещения груза

Сопоставляя состояние образца с положением груза на графике рис. 4, можно заметить следующее:

- на перемещении 10 мм начинается формирование единственной трещины; к этому моменту заканчивается резкое изменение усилия сопротивления;
- на 20 мм происходит страгивание трещины; сопротивление образца достигает максимального значения;
- на 30 мм трещина проходит четверть ширины образца; идет спад сопротивления образца;
- на 40 мм трещина достигает половины ширины образца; сопротивление образца снижается до половины максимально достигнутого усилия;
- на 50 мм трещина прошла три четверти ширины образца; сопротивление образца снизилось до 15% от максимально достигнутого усилия.

На рис. 9 представлены рассчитанные зависимости перемещения вершины трещины от перемещения груза и усилия сопротивления образца от перемещения вершины трещины. Можно выделить три фазы процесса деформирования образца (рис. 9а): первая фаза процесса характеризуется общим деформированием образца без образования трещины; в течение второй фазы процесса в зоне надреза происходит формирование двух одинаковых симметричных трещин (см. рис. 8); третья фаза – распространение единственной трещины (выбранной из двух образовавшихся) по ширине образца. На второй фазе продолжается рост усилия сопротивления образца при увеличении длины трещины до 5 мм (рис. 9б). Затем разрушение образца происходит по одной из двух начальных трещин, и усилие сопротивления образца начинает уменьшаться. На участке второй фазы груз проходит путь почти в 3 раза больший, чем вершина трещины. При переходе на участок третьей фазы вершина трещины перемещается быстрее груза в 1,66 раза. В первом приближении участок третьей фазы можно считать линейным. Здесь трещина распространяется практически под постоянной удельной нетто-силой ≈ 10 кН/мм (отношение усилия к ширине неразрушенной части образца). Пример сопоставления кадров скоростной видеосъемки бегущей трещины и силовой характеристики ИПГ-образца приведен в статье [18].

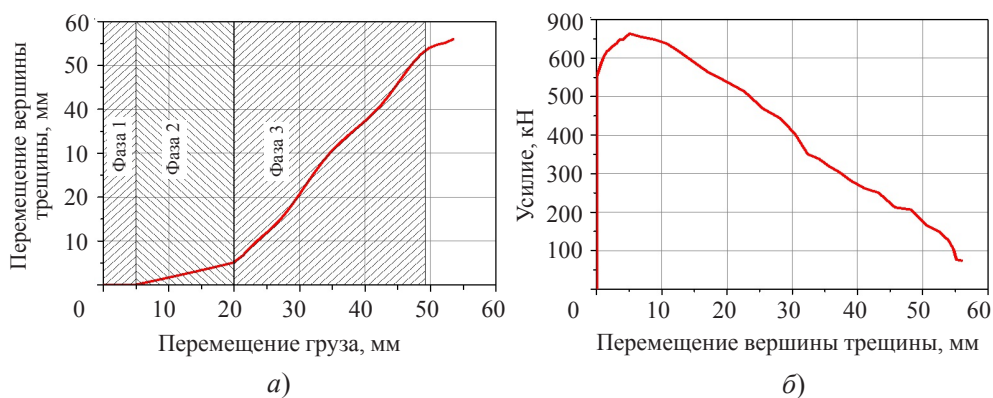


Рис. 9. Зависимости перемещения вершины трещины от перемещения груза (а) и усилия сопротивления образца от перемещения вершины трещины (б)

Рассмотрим распределение энергии пластического деформирования в образце в процессе его нагружения. С этой целью образец был условно поделен на объемы (рис. 10). Зона возможной траектории трещины была представлена 15 объемами

(толщина объема 5 мм) и еще два объема (16 и 17) располагались в зонах общего деформирования образца.

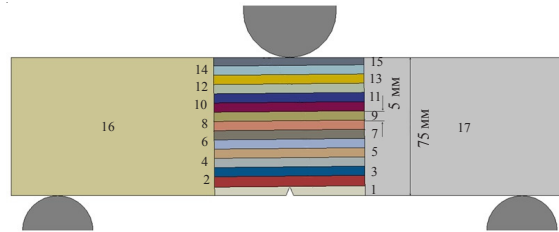


Рис. 10. Нумерация условных объемов в образце

На рис. 11 приведены графики вклада в величину энергии пластического деформирования каждого из рассматриваемых объемов в зависимости от положения вершины трещины. Из рисунка можно видеть, что при подготовке и движении трещины пластически деформируются все объемы. Объемы 2–11 вносят примерно одинаковый вклад 0,9–1,1 кДж (трещина проходит путь 50 мм). Большой вклад объемов 12–15 связан с их расплющиванием падающим грузом.

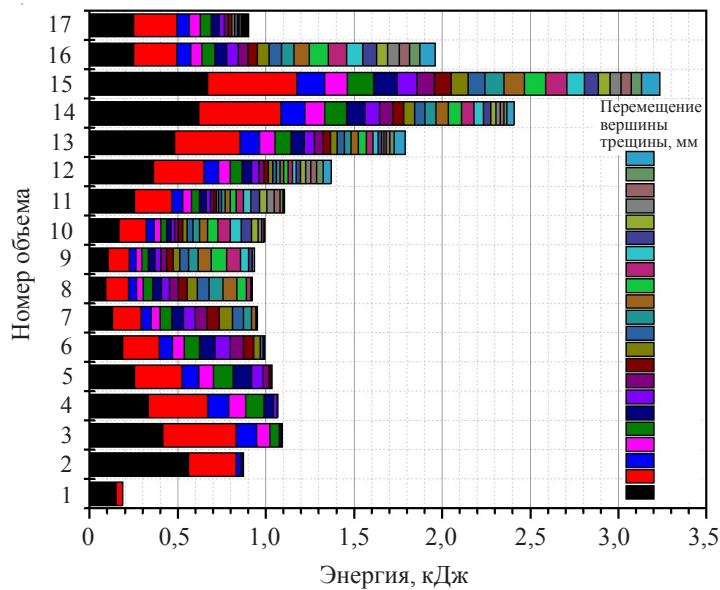


Рис. 11. Вклад в величину энергии пластического деформирования выделенного объема в зависимости от положения вершины трещины

Не рассматривая вклад объемов 1 и 2, который связан с подготовкой и страгиванием трещины, можно отметить наличие минимума энергии деформирования между объемами 8 и 9. Это связано с тем, что они расположены на границе, отделяющей растянутую область образца от сжатой области в процессе его изгиба. Эту границу можно видеть на рис. 12, на котором приведено распределение параметра Лодэ μ , характеризующего степень растяжения ($-1 \leq \mu < 0$) и сжатия образца ($0 < \mu \leq 1$).

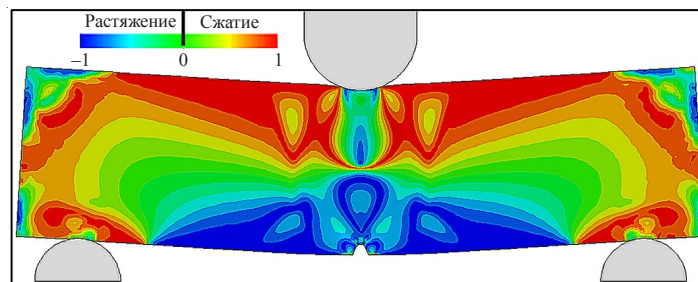


Рис. 12. Распределение параметра Лоде при перемещении груза на 10 мм

Влияние на развитие трещины растянутой и сжатой областей образца заметно на зависимости скорости движения вершины трещины от перемещения вершины трещины, приведенной на рис. 13. Здесь вблизи середины первой половины образца скорость вершины достигает максимального значения, равного 11,5 м/с, и достигнув границы раздела областей сжатия и растяжения, скорость движения вершины трещины снижается почти вдвое – до 6,5 м/с. Затем скорость роста трещины возрастает до 10 м/с. Два указанных периода возрастания-убывания скорости движения вершины коррелируют с двумя центральными расслоениями по толщине листа в испытании (см. рис. 5).

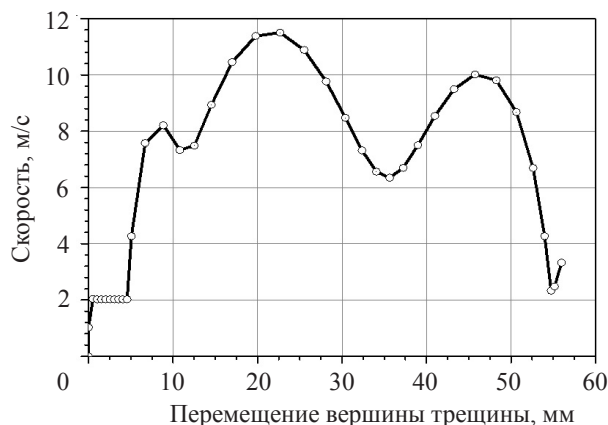


Рис. 13. Зависимость скорости движения вершины трещины от ее перемещения

Для получения оценки затрат энергии на продвижение трещины на рис. 14 приведена зависимость энергии пластического деформирования всего образца и объемов с 1 по 15 от величины перемещения вершины трещины. При этом следует отметить, что практически вся энергия пластического деформирования сосредоточена в объемах 1–15 и составляет $\approx 90\%$ от энергии всего образца. Из рис. 14 видно, что на предварительное деформирование и срагивание трещины (до 5 мм) затрачивается примерно половина энергии (10 кДж). Продифференцировав зависимость энергии от перемещения вершины трещины для объемов 1–15 и поделив результат на начальную толщину образца, можно получить величину удельной энергии, затрачиваемой на продвижение трещины на единицу пути. Полученная зависимость приведена на рис. 15, на котором видно, что после формирования двух симметричных трещин затраты энергии падают с ≈ 15 Дж/мм², до ≈ 7 Дж/мм² при смещении трещины на 35 мм. При дальнейшем продвижении трещины на верхнюю половину образца затраты энергии уменьшаются до 2,5 Дж/мм².

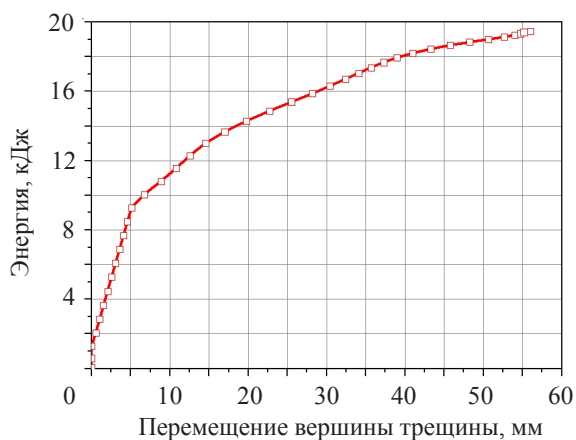


Рис. 14. Зависимость энергии пластического деформирования объемов 1–15 от величины перемещения вершины трещины

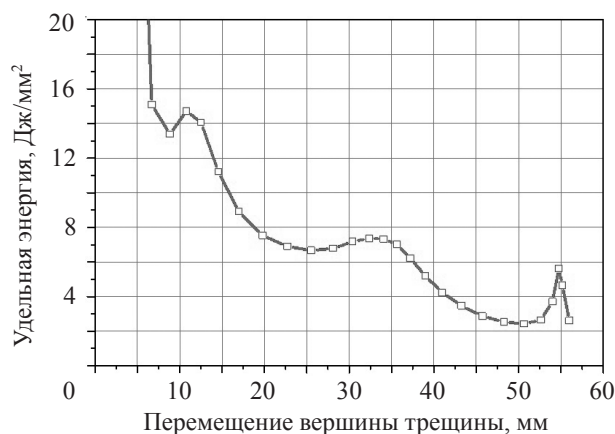


Рис. 15. Зависимость удельной энергии пластического деформирования от перемещения вершины трещины

В целом тенденцию к уменьшению удельной энергии можно связать с уменьшением живого сечения образца, а «задержку» в падении затрат энергии в области 35 мм трещины – с наличием слабо деформированной средней части образца (см. рис. 12, 13). Метод расчета энергоемкости разрушения, основанный на диаграмме деформирования трубного металла и измерениях зоны пластических деформаций по траектории разрушения, представлен в [19, 20].

Заключение

С использованием программного кода ДАНКО и модифицированной модели макровязкого разрушения Гурсона – Твергаарда – Нидельмана (GTNm) выполнено численное моделирование поведения образца с надрезом из металла класса прочности К65 магистральных трубопроводов при испытании падающим грузом.

Сопоставление силовых характеристик «сила–перемещение», деформированных профилей и макрогеометрии изломов образца после испытания (участки отрыва, откосы среза, расщелины расслоя, область долома) показало удовлетворительное согласие расчетов с данными испытаний при комнатной температуре.

Полученные расчетные данные раскрывают механику подготовки, срагивания и распространения трещины в образце – продвижение трещины в зависимости от времени, от перемещения и усилия падающего груза; распределение по зонам энергии пластического деформирования образца в процессе его нагружения; изменение энергии пластического деформирования в ходе продвижения трещины.

Проведенное численное моделирование деформирования ИПГ-образца показало, что получение экспериментальной информации о движении трещины во времени существенно повышает информативность эксперимента с точки зрения исследования трещиностойкости металла.

Результаты исследования могут быть использованы при разработке требований и условий применения «инструментированного» ИПГ, а также для численного моделирования протяженного разрушения в магистральном трубопроводе.

Список литературы

1. Матросов Ю.И., Литвиненко Д.А., Голованенко С.А. *Сталь для магистральных газопроводов*. М.: Металлургия, 1989. 288 с.
2. Арабей А.Б. Развитие технических требований к металлу труб магистральных газопроводов. *Изв. вузов. Черн. мет.* 2010. №7. С. 3–10.
3. *СТО Газпром 2-4.1-741-2013. Технические требования к основному металлу труб К65 (X80) и методы их контроля*. М.: «ОАО Газпром», 2015. 25 с.
4. *Р Газпром 133-2013. Методики оценки сопротивления протяженному вязкому разрушению высокопрочных сталей на основе комплексных испытаний основного металла труб в заводских и лабораторных условиях*. М.: «ОАО Газпром», 2015. 185 с.
5. *ГОСТ 30456-97. Металлопродукция. Прокат листовой и трубы стальные. Методы испытания на ударный изгиб*. М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. 14 с.
6. Штрель М.А., Арабей А.Б., Глебов А.Г., Абакумов А.И., Есиев Т.С., Струин А.О., Сарычев Б.А. Силы и деформации при испытании падающим грузом (ИПГ – DWTT). *Деформация и разрушение материалов*. 2016. №9. С. 36–47.
7. Hwang B., Lee S., Kim Y.M. et al. Analysis of abnormal fracture occurring during drop-weight tear test of high-toughness line-pipe steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2004. Vol. 368. No 1-2. P. 18–27.
8. Rudland D.L., Wilkowski G.M., Feng Z., Wang Y.-Y., Horsley D., Glover A. Experimental investigation of CTOA in linepipe steels. *Engineering Fracture Mechanics*. 2003. Vol. 70. No 3-4. P. 567–577.
9. Wilkowski G., Shim D.-J., Hioe Y., Kalyanam S., Brust F. How new vintage line-pipe steel fracture properties differ from old vintage line-pipe steels. *Proceedings of the 9th International Pipeline Conference IPC2012*. September 24–28, 2012. Calgary, Alberta, Canada. 2012. P. 507–514. DOI: 10.1115/IPC2012-90518.
10. Simha C.H.M., Xu S., Tyson W.R. Non-local phenomenological damage-mechanics-based modeling of the drop-weight tear test. *Engineering Fracture Mechanics*. 2014. Vol. 118. P. 66–82. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2014.01.009.
11. Yu P.S., Ru C.Q. Analysis of energy absorptions in drop-weight tear tests of pipeline steel. *Engineering Fracture Mechanics*. 2016. Vol. 160. P. 138–146. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2016.04.007.
12. Nonn A., Kalwa C. Analysis of dynamic ductile fracture propagation in pipeline steels: a damage mechanics' approach. *6th International Pipeline Technology Conference*. 6–9 October 2013. Ostend, Belgium. 2013. P. 1–20. DOI: 10.13140/2.1.4370.3046.
13. Scheider I., Nonn A., Völling A., Mondry A., Kalwa C. A damage mechanics based evaluation of dynamic fracture resistance in gas pipelines. *Procedia Materials Science*. 2014. Vol. 3. P. 1956–1964. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.06.315>.
14. Абакумов А.И., Сафронов И.И., Смирнов А.С., Арабей А.Б. Численная модель макровязкого разрушения современных сталей магистральных газопроводов. *Проблемы проч-*

ности и пластичности. 2017. Т. 79. №3. С. 301–311. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2017-79-3-301-311>.

15. Абакумов А.И., Сафронов И.И., Смирнов А.С., Арабей А.Б., Глебов А.Г., Есиев Т.С., Струин А.О. Численное моделирование испытания пластин с краевым надрезом на растяжение. *Проблемы прочности и пластичности*. 2017. Т. 79. №4. С. 462–470. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2017-79-4-462-470>.

16. Weinong W. Chen, Bo Song. *Split Hopkinson (Kolsky) Bar: Design, Testing and Applications*. Mechanical Engineering Series. Springer, 2011. 388 p. DOI: 10.1007/978-1-4419-7982-7.

17. *Аттестационный паспорт программного средства «ДАНКО+ГЕПАРД» для расчета напряженно-деформированного состояния элементов сложных пространственных конструкций*. Рег. № 332 от 12.09.2013 г. Ростехнадзор, ФБУ «НТЦ ЯРБ».

18. Эрделен-Пепплер М., Хилленбранд Х.-Г., Кальва С., Кнауф Г. Исследование применимости прогнозируемой способности к удержанию распространения разрушения для высокопрочного трубопровода в условиях низких температур. *Изв. вузов. Черн. мет.* 2012. №3. С. 3–12. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2012-3-3-12>.

19. Пышминцев И.Ю., Арабей А.Б., Есиев Т.С., Струин А.О., Валов М.А., Насыбулина Е.Р. Энергоемкость разрушения трубных сталей класса прочности К65 (X80). *Наука и техника в газовой промышленности*. 2011. №4. С. 63–72.

20. Струин А.О. Повышение сопротивляемости разрушению труб большого диаметра классов прочности К60, К65 из малоуглеродистых феррито-бейнитных сталей. *Дис... канд. техн. наук*. Челябинск, 2014. 151 с.

References

1. Matrosov Yu.I., Litvinenko D.A., Golovanenko S.A. *Stal dlia magistralnykh gazoprovodov [Steel for Main Pipelines]*. Moscow. Metallurgiya Publ. 1989. 288 p. (In Russian).

2. Arabey A.B. Razvitie tekhnicheskikh trebovaniy k metallu trub magistralnykh gazoprovodov [Specification requirements evolution for the line-pipe metal]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya [Izvestiya. Ferrous Metallurgy]*. 2010. No 7. P. 3–10 (In Russian).

3. *STO Gazprom 2-4.1-741-2013. Tekhnicheskie trebovaniya k osnovnomu metallu trub K65 (X80) i metody ikh kontrolya [Technical Requirements for Base Metal of Pipes of K65 (X80) and Methods of their Control]*. Moscow. “ОАО Guzprom” Publ. 2015. 25 p. (In Russian).

4. *R Gazprom 133-2013. Metodiki otsenki soprotivleniya protyazhennosti viazkomu razrushe-niyu vysokoprochnykh staley na osnove kompleksnykh ispytaniy osnovnogo metalla trub v zavod-skikh i laboratornykh usloviyakh [R Gazprom 133-2013. Evaluation Methods for Resistance to the Longest Viscous Fracture of High Strength Steels Based on the Comprehensive Tests of Basic Metal Pipes under Factory and Laboratory Conditions]*. Moscow. “ОАО Guzprom” Publ. 2015. 185 p. (In Russian).

5. *GOST 30456-97. Metalloproduksiya. Prokat listovoy i trubny stalnyye. Metody ispytaniyya na udarny izgib [Metal Products. Shock Bending Testing Methods]*. Moscow. ИПК Izdatelstvo standartov Publ. 2003. 14 p. (In Russian).

6. Shtremel M.A., Arabey A.B., Glebov A.G., Abakumov A.I., Esiev T.S., Struin A.O., Sarychev B.A. Sily i deformatsii pri ispytanii padayushchim gruzom (IPG-DWTT) [Forces and deformations during drop-weight test]. *Deformatsiya i razrushenie materialov [Deformation & Fracture of Materials]*. 2016. No 9. P. 36–47 (In Russian).

7. Hwang B., Lee S., Kim Y.M. et al. Analysis of abnormal fracture occurring during drop-weight tear test of high-toughness line-pipe steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2004. Vol. 368. No 1-2. P. 18–27.

8. Rudland D.L., Wilkowski G.M., Feng Z., Wang Y.-Y., Horsley D., Glover A. Experimental investigation of CTOA in linepipe steels. *Engineering Fracture Mechanics*. 2003. Vol. 70. No 3-4. P. 567–577.

9. Wilkowski G., Shim D.-J., Hioe Y., Kalyanam S., Brust F. How new vintage line-pipe steel fracture properties differ from old vintage line-pipe steels. *Proceedings of the 9th International Pipe-line Conference IPC2012*. September 24–28, 2012. Calgary, Alberta, Canada. 2012. P. 507–514. DOI: 10.1115/IPC2012-90518.

10. Simha C.H.M., Xu S., Tyson W.R. Non-local phenomenological damage-mechanics-based modeling of the drop-weight tear test. *Engineering Fracture Mechanics*. 2014. Vol. 118. P. 66–82. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2014.01.009.
11. Yu P.S., Ru C.Q. Analysis of energy absorptions in drop-weight tear tests of pipeline steel. *Engineering Fracture Mechanics*. 2016. Vol. 160. P. 138–146. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2016.04.007.
12. Nonn A., Kalwa C. Analysis of dynamic ductile fracture propagation in pipeline steels: a damage mechanics' approach. *6th International Pipeline Technology Conference*. 6–9 October 2013. Ostend, Belgium. 2013. P. 1–20. DOI: 10.13140/2.1.4370.3046.
13. Scheider I., Nonn A., Völling A., Mondry A., Kalwa C. A damage mechanics based evaluation of dynamic fracture resistance in gas pipelines. *Procedia Materials Science*. 2014. Vol. 3. P. 1956–1964. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.06.315>.
14. Abakumov A.I., Safronov I.I., Smirnov A.S., Arabey A.B. Chislennaya model makro-vyazkogo razrusheniya sovremennykh staley magistralnykh gazoprovodov [A numerical model of macro-viscous failure of modern steels of gas mains]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2017. Vol. 79. No 3. P. 301–311. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2017-79-3-301-311> (In Russian).
15. Abakumov A.I., Safronov I.I., Smirnov A.S., Arabey A.B., Glebov A.G., Esiev T.S., Struin A.O. Chislennoe modelirovanie ispytaniya plastin s kraevym nadrezom na rastyazhenie [Numerically modeling tensile tests of plates with a lateral notch]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2017. Vol. 79. No 4. P. 462–470. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2017-79-4-462-470> (In Russian).
16. Weinong W. Chen, Bo Song. *Split Hopkinson (Kolsky) Bar: Design, Testing and Applications*. Mechanical Engineering Series. Springer, 2011. 388 p. DOI: 10.1007/978-1-4419-7982-7.
17. Attestatsionny pasport programmogo sredstva "DANKO+GEPARD" dlia rascheta napriazhenno-deformirovannogo sostoyaniya elementov slozhnykh prostranstvennykh konstruksiy [Certification Passport of the Software Tool "DANKO+GEPARD" for Calculating the Stress-Strain State of Elements of Complex Spatial Structures]. Reg. No 332. 12.09.2013. Rostekhnadzor, FBU "NTTs YaRB" (In Russian).
18. Erdelen-Peppler M., Khillenbrand Kh.-G., Kal'va C., Knauf G. Issledovanie primenimosti prognoziruemoy sposobnosti k uderzhaniyu rasprostraneniya razrusheniya dlya vysokoprochnogo truboprovoda v usloviyakh nizkikh temperatur [Implementation research on predicted capability to suppress destruction propagation for high-strength main pipeline at low temperatures]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya [Izvestiya. Ferrous Metallurgy]*. 2012. No 3. P. 3–12 (In Russian).
19. Pyshmintsev I.Yu., Arabey A.B., Esiev T.S., Struin A.O., Valov M.A., Nasybulina E.R. Energoemkost razrusheniya trubnykh staley klassa prochnosti K65 (Kh80) [Capacity of the pipe steel destruction for strength grade K65 (X80)]. *Nauka i tekhnika v gazovoy promyshlennosti*. 2011. No 4. P. 63–72 (In Russian).
20. Struin A.O. Povyshenie soprotivlyaemosti razrusheniyu trub bolshogo diametra klassov prochnosti K60, K65 iz malouglerodistykh ferrito-beynitnykh staley [Increasing resistance to destruction of large-diameter pipes of strength class K60, K65 from low-carbon ferrite-bainite steels]. *PhD Tesis*. Chelyabinsk. 2014. 151 p. (In Russian).

NUMERICAL SIMULATION OF A DROP WEIGHT TEST OF DUCTILE PIPE STEEL

**Abakumov A.I.¹, Safronov I.I.¹, Smirnov A.S.¹, Arabey A.B.²,
Glebov A.G.³, Esiev T.S.², Sarychev B.A.⁴**

¹*Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics,
Sarov, Russian Federation*

²*Gazprom VNIIGAZ LLC, Moscow, Russian Federation*

³*National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russian Federation*

⁴*Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russian Federation*

The processes in the metal sample of a supply pipeline realized under drop-weight tests (DWT, or DWTT according to ASTM) are studied. DWT is a proof test of the pipeline metal that should ensure high resistance of the pipeline against extensive destruction.

Numerical simulation of DWT with the steel sample of full thickness was performed; the steel had K65 strength grade. Parallel finite-element computer code DANCO developed in RFNC-VNIIEF was used for simulations. A detailed description of the rupture formation process required a fine-enough mesh and a supercomputer.

To carry out the numerical simulation of the process, the constants of the deformation diagram were used, obtained on the basis of static and dynamic tensile tests of samples at room temperature. A modified Gurson–Tvergaard–Niedelman (GTNm) model for macro-viscous steel destruction (ductile failure) was used to describe the strain and the destruction of the metal. The modification makes it possible to describe direct and oblique cuts and their combinations in case of ductile failure of small-size objects (rods, plates, shells).

The calculated dependences of the movement of the crack tip on the movement of the load and the resistance force of the sample on the movement of the crack tip are presented. We have got a good agreement between the computations and experimental data with regard to the “force–displacement” strength parameter, the deformed profiles and macro-geometry of the ruptured sample after the tests. The computation results reveal the mechanics of the crack origination, start and propagation in the sample, describe the plastic-flow energy distribution in the process of dynamic destruction. The results of the work can be used in the development of the requirements and of the implementation conditions of the “tooled” DWT, and for numerical simulation of the extensive destruction at the main pipeline.

Keywords: drop-weight test (DWT, DWTT), plastic flow and ductile failure of the sample, numerical simulation, comparison of the computational and experimental results.