

УДК 539.42

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПЫТАНИЯ ПЛАСТИН С КРАЕВЫМ НАДРЕЗОМ НА РАСТЯЖЕНИЕ

© 2017 г. **Абакумов А.И.¹, Сафронов И.И.¹, Смирнов А.С.¹,
Арабей А.Б.², Глебов А.Г.³, Есиев Т.С.⁴, Струин А.О.⁵**

¹Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики, Саров, Российская Федерация
²ПАО «Газпром», Санкт-Петербург, Российская Федерация
³Национальный исследовательский технологический университет
«МИСиС», Москва, Российская Федерация
⁴ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Москва, Российская Федерация
⁵ОАО «РосНИТИ», Челябинск, Российская Федерация

abakumov@vniief.ru

Поступила в редакцию 31.05.2017

Рассматриваются возможности применения модифицированной модели Гурсона – Твергаарда – Нидельмана, которая в рамках численного моделирования позволяет получать реализуемые в экспериментах на образцах поверхности разрушения, включающие косые поверхности. Выполнено компьютерное моделирование испытаний по статическому растяжению пластин (призматических образцов) с краевым надрезом шевронного типа – инициатором начала образования трещины. Данный тип испытаний включен в нормативные документы ПАО «Газпром» с целью предупреждения распространения протяженного вязкого разрушения в магистральных газопроводах. Образцы изготовлены из трубы класса прочности К65 диаметром 1420 мм с толщиной стенки 27,7 мм.

Ключевые слова: пластическое деформирование, вязкое разрушение образца, численное моделирование, модифицированная модель Гурсона – Твергаарда – Нидельмана, сравнение расчета с экспериментом.

Введение

Для демонстрации возможностей модифицированной модели материала Гурсона – Твергаарда – Нидельмана (GTNm), описание которой приведено в статье [1], проводятся эксперименты [2] по статическому растяжению пластин (призматических образцов) с краевым надрезом, изготовленных из трубы класса прочности К65 диаметром 1420 мм с толщиной стенки 27,7 мм. Такой вид испытания включен в нормативные документы ПАО «Газпром» [3, 4] с целью предупреждения распространения протяженного вязкого разрушения в магистральных газопроводах. При испытаниях фиксируются процессы инициирования и стабильного вязкого роста трещины в исследуемых сталях [5]. По результатам испытаний могут быть получены

энергетические характеристики трещиностойкости материала [5]. Численное моделирование позволило получить ряд дополнительных расчетных характеристик испытываемой стали.

1. Описание экспериментов

Образцы размером $70,8 \times 22,50 \times 5,75$ мм были вырезаны из сердцевины стенки трубы без последующего выпрямления (рис. 1а). Для инициирования разрушения использовался надрез шевронного типа (рис. 1б), расположенный посередине образца так, чтобы траектория зародившейся от надреза трещины была ориентирована вдоль оси трубы. Основные размеры образца показаны на рис. 1 (для упрощения на рисунке изображена не вся длина образца, а только длина его рабочей части).

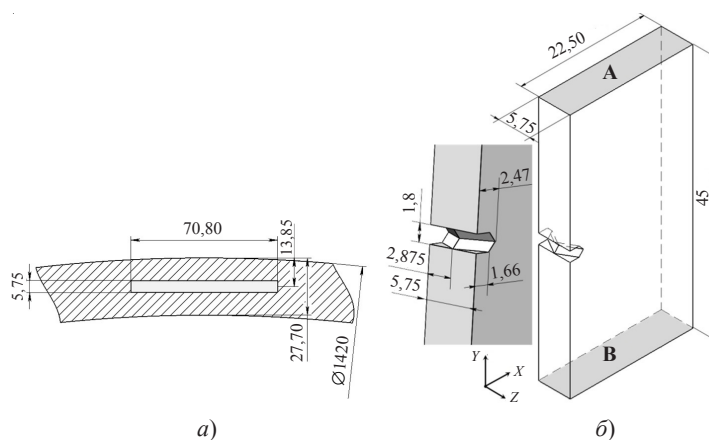


Рис. 1. Образец с краевым надрезом

В процессе испытания образцы подвергались монотонному растяжению в направлении оси Y , в результате чего в основании надреза зарождалась трещина, развитие которой завершалось разрушением образца. Испытания проводились при комнатной температуре на универсальной испытательной машине MTS Insight 100 (рис. 2).

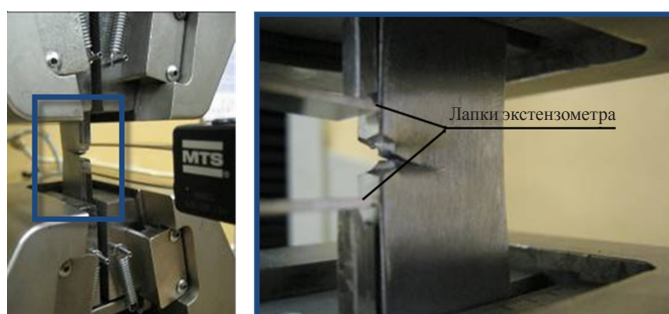


Рис. 2. Внешний вид установленного в захватах испытательной машины образца с краевым надрезом

В процессе испытания регистрировались нагрузка и перемещение берегов надреза (раскрытие трещины), определяемое с помощью экстензогра. «Лапки» экс-

тензометра опирались на накладные ножи, закрепляемые на боковой грани образца (см. рис. 2). После разрушения исследовались реализуемые в экспериментах характер деформирования образцов, траектория трещины, поверхность разрушения, форма среза в изломе (рис. 3).



Рис. 3. Вид образцов после испытаний

2. Результаты численного моделирования

Численное моделирование растяжения образца с краевым надрезом осуществлялось путем приложения кинематической нагрузки к торцу образца (поверхность А на рис. 1б) в направлении оси Y при отсутствии смещения в боковом направлении. Другой торец образца (поверхность В на рис. 1б) находился в условиях жесткого защемления.

При численном моделировании образца было использовано $\approx 2,7$ млн восьми-узловых конечных элементов с размером грани $\approx 0,1$ мм в зоне прохождения трещины. Фрагмент конечно-элементной дискретизации образца приведен на рис. 4.

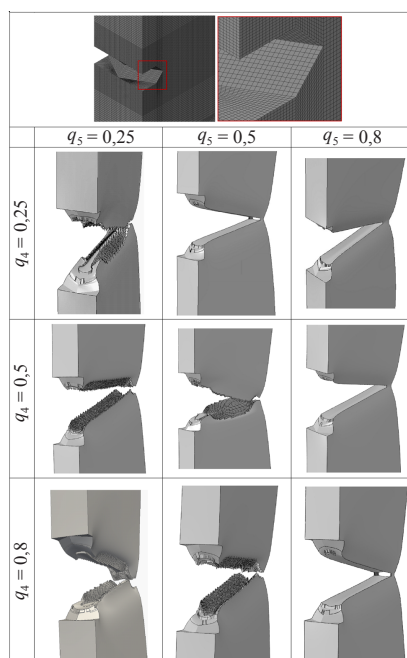


Рис. 4. Фрагмент конечно-элементной дискретизации образца. Характер деформирования и разрушения образца при различных значениях параметров q_4 и q_5

Выбор размера конечного элемента основывался на получении результата по траектории трещины и вида поверхности разрушения, не зависящего от уменьшения этого размера.

В ходе компьютерного эксперимента с использованием модели GTNm было установлено, что характер деформирования и разрушения образца существенным образом зависит от параметров q_4 и q_5 сдвиговой компоненты эволюции пористости в модели материала GTNm [1] (см. рис. 4). На рис. 5 видно соответствие результатов расчета (кривые с точками) с экспериментальными данными (сплошные кривые) при заданных значениях параметров q_4 и q_5 , которые определяют траекторию трещины и вид поверхности разрушения.

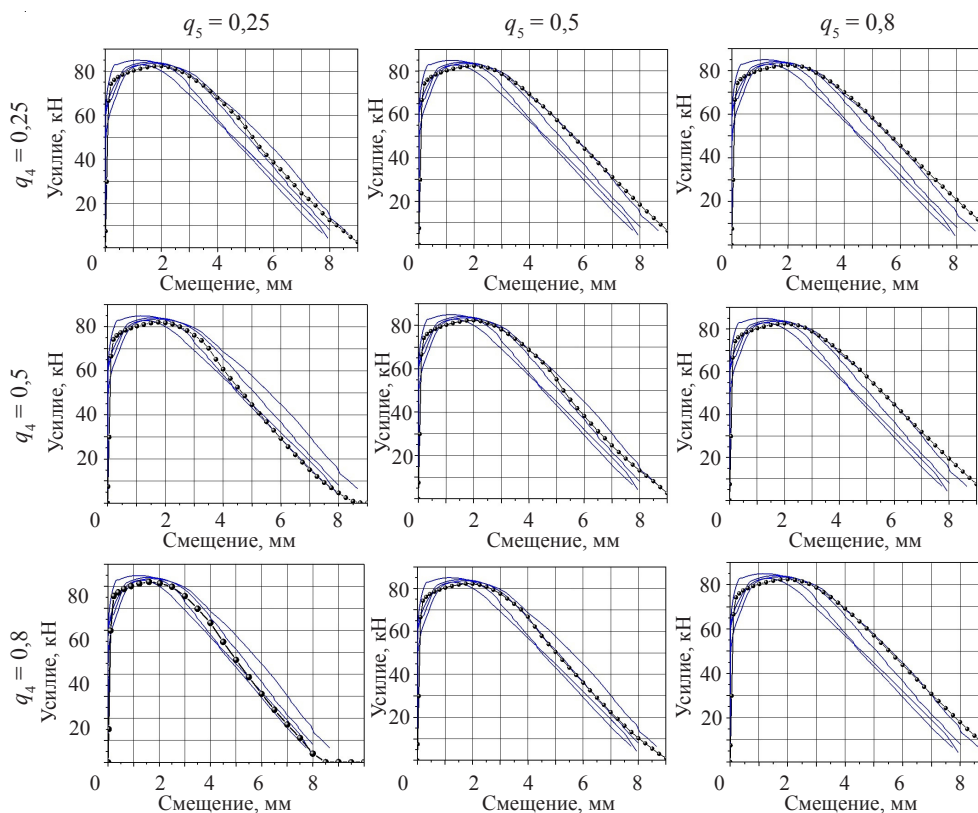


Рис. 5. Зависимости усилие растяжения – смещение торца образца для различных значений q_4 и q_5

Примеры построенных с помощью 3D-сканирования изображений образцов после испытания свидетельствуют, что наряду со строго определенными закономерностями, проявляющимися в характере деформирования и разрушения вязкого материала и учитываемыми разработанной моделью GTNm [1], реализация той или иной формы среза в изломе разрушенных при испытании образцов во многом определяется влиянием случайных факторов (рис. 6)*.

* Процедура представления образца в формате 3D основана на бесконтактной трехмерной оптической системе ATOS II XL (Advanced Topometric Sensor), позволяющей с высокой точностью оцифровывать объект любой сложности и получать его компьютерную модель.

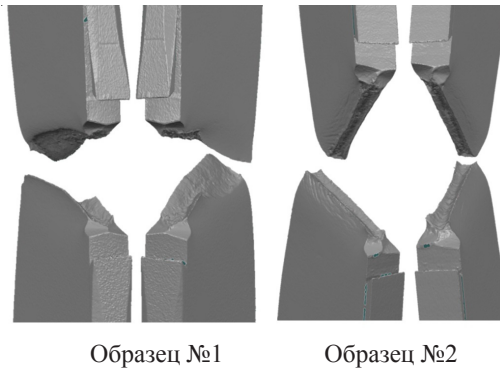


Рис. 6. Конечное состояние двух образцов (результат 3D-сканирования)

Сравнение экспериментальной и расчетной форм конечного состояния двух образцов приведено на рис. 7, 8. Сравнение проводилось по сечению А–А (плоскость сечения показана черной линией). Для сравнения в одном случае расчет выполнен со значениями параметров модели $q_4 = 0,8$ и $q_5 = 0,25$, а в другом – $q_4 = 0,25$ и $q_5 = 0,8$. Из рис. 7 видно достаточно хорошее согласование расчетных и экспериментальных результатов, полученных для образца №1, для которого в расчете были использованы значения $q_4 = 0,8$ и $q_5 = 0,25$. Несколько худший результат получен при сравнении результата расчета с экспериментом для образца №2, хотя характер и форма профиля трещины близки (рис. 8). В этом расчете использованы значения $q_4 = 0,25$ и $q_5 = 0,8$.

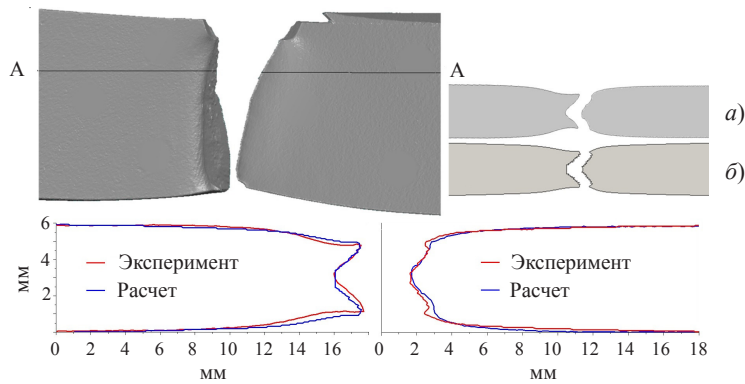


Рис. 7. Сравнение экспериментальной (а) в сечении А–А и расчетной (б) форм конечного состояния образца №1

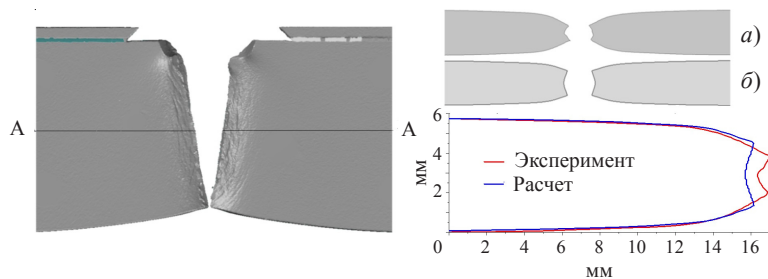


Рис. 8. Сравнение экспериментальной (а) в сечении А–А и расчетной (б) форм конечного состояния образца №2

Вид поверхности трещины, полученной при $q_4 = 0,8$ и $q_5 = 0,25$, с послойным представлением продольных сечений разрушенного образца приведен на рис. 9. Показаны поля пластической деформации, достигающей 60%.

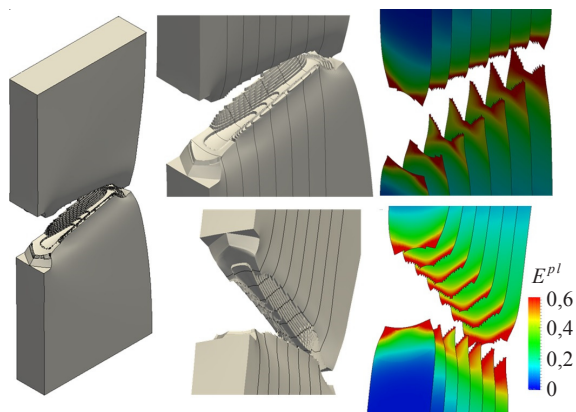


Рис. 9. Расчетная форма образца после разрыва

Результаты численного моделирования деформирования и разрушения образца с надрезом при его растяжении позволяют выявить некоторые весьма важные особенности его поведения.

На рис. 10а показано распределение параметра Лоде в образце при его растяжении. Этот параметр меняется от 0 до 1 в сжатой зоне и от -1 до 0 в растянутой зоне образца. Сжатой зоне на рис. 10 соответствует изображение б, растянутой – изображение в. Представленное на рис. 10г распределение давления растяжения в образце (для срединной плоскости сечения) позволяет выделить наличие зоны с локально высоким давлением растяжения, величина которого достигает значения ~ 795 МПа, сопоставимого с пределом прочности металла трубы. Примечательно, что эта зона всегда располагается впереди вершины трещины, по-видимому, способствуя разрушению материала и продвижению трещины.

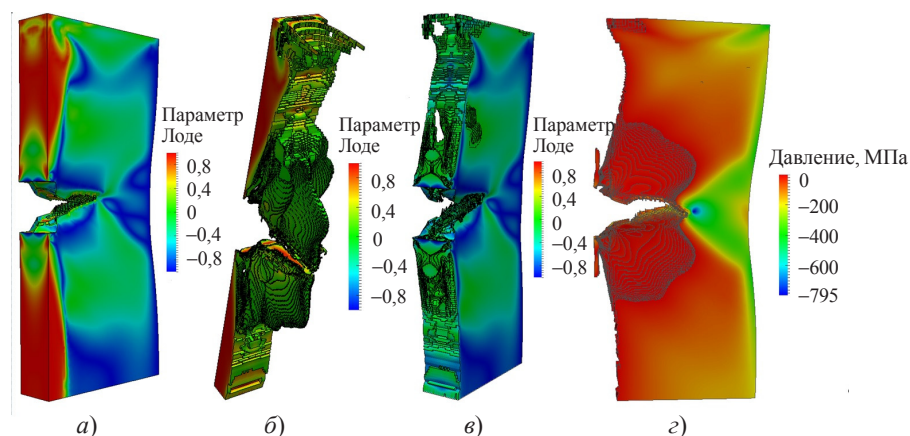


Рис. 10. Распределение параметра Лоде и давления растяжения в образце

Представленная на рис. 11 зависимость смещения вершины трещины от смещения торца образца при растяжении показывает, что появление трещины наблю-

дается после смещения торца на величину $\sim 2,5$ мм. После старта трещины ее рост примерно в 3 раза превышает смещение торца образца. При этом зависимость смещения вершины трещины от смещения торцов образца приближается к линейной. Это вызвано тем, что после старта трещины наблюдается линейный спад усилия растяжения образца в зависимости от смещения его торцов (см. рис. 5).

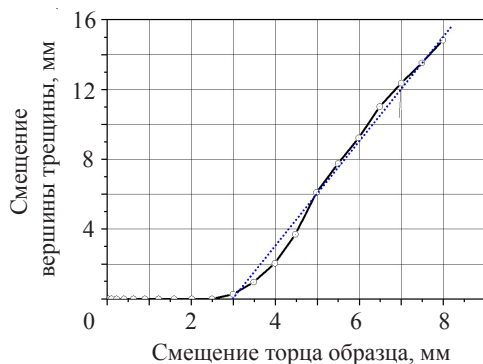


Рис. 11. Расчетная зависимость смещения вершины трещины от смещения торца образца (пунктирная линия – линейная аппроксимация)

Поверхность разрушения при прохождении трещиной 12 мм пути показана на рис. 12. Для удобства анализа компьютерное изображение разрушенного по надрезу образца показано в разных плоскостях. Из рис. 12 видно, что устье трещины имеет вытянутую треугольную форму.

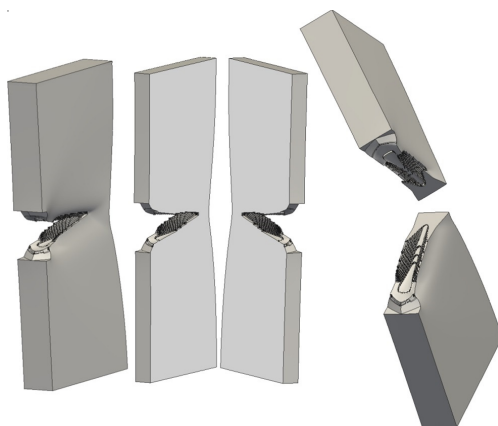


Рис. 12. Расчетный вид излома при прохождении трещиной 12 мм пути

На рис. 13 представлена зависимость энергии деформирования образца от смещения вершины трещины. Анализируя эту зависимость, можно отметить, что на распространение трещины по всей толщине образца затрачивается энергия, равная ~ 200 Дж, что составляет чуть меньше половины от всей энергии (430 Дж), расходуемой на деформирование образца до полного разрушения. После охвата фронтом трещины всей толщины образца зависимость энергии деформирования становится близка к линейной (участок между 3,5 мм и 9,5 мм). На этом участке наклон кривой к оси абсцисс характеризует энергию, затрачиваемую на продвижение единицы длины трещины. Для приведенного на рис. 13 графика эта величина составляет 121 Дж на 1 см. Отношение этой величины к начальной толщине образца $h_0 = 5,75$ мм, рав-

ное 210 Дж/см^2 , может служить мерой удельной энергии деформирования при распространении трещины.

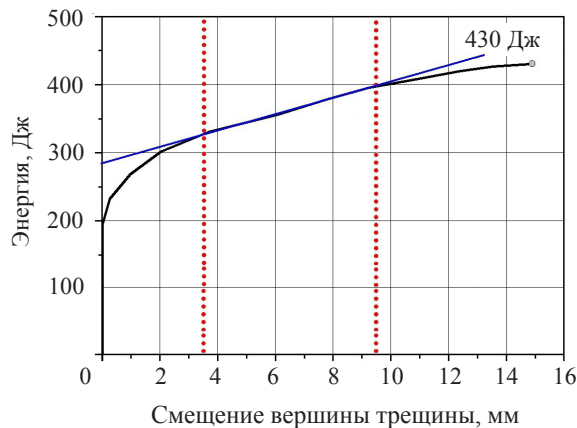


Рис. 13. Зависимость энергии деформирования образца от смещения вершины трещины

Заключение

Путем сравнения результатов компьютерного расчета с экспериментальными данными по растяжению пластин с краевым надрезом были подобраны константы модели GTNm для стали класса прочности K65, позволившие численно воспроизвести процессы деформирования и разрушения образца с образованием характерного для экспериментальных условий косоугольного среза в изломе. Данный тип испытаний включен в нормативные документы ПАО «Газпром» с целью предупреждения распространения протяженного вязкого разрушения в магистральных газопроводах.

Реализуемая на практике форма среза в изломе образцов имеет случайный характер. Получено, что зависимость смещения вершины трещины от смещения торца образца близка к линейной. Это позволяет оценить характеристики распространения трещины по данным испытаний.

При использовании зависимости энергии деформирования образца от смещения вершины трещины может быть получена величина удельной энергии при распространении трещины вдали от зон старта трещины и долома образца.

Список литературы

1. Абакумов А.И., Сафронов И.И., Смирнов А.С., Арабей А.Б. Численная модель макровязкого разрушения современных сталей магистральных газопроводов. *Проблемы прочности и пластичности*. 2017. Т. 79. №3. С. 301–311.
2. Струин А.О., Пышминцев И.Ю., Мартынова Н.А., Насыбулина Е.Р., Валов М.А. Оценка трещиностойкости трубных сталей X80. *Производство, испытания и практическое использование труб большого диаметра категории прочности X80/X90*: Сб. тр. Междунар. конф. 6–8 апреля 2011 г., Москва.
3. Р Газпром 133-2013. *Методики оценки сопротивления протяженному вязкому разрушению высокопрочных сталей на основе комплексных испытаний основного металла труб в заводских и лабораторных условиях*. 23 с.
4. СТО Газпром 2-4.1-741-2013. *Технические требования к основному металлу труб K65 (X80) и методы их контроля*. 25 с.

5. Струин А.О. *Повышение сопротивляемости разрушению труб большого диаметра классов прочности K60, K65 из малоуглеродистых феррито-бейнитных сталей*: Дис... канд. техн. наук. Национальный технологический университет, Челябинск. 2014. 151 с.

References

1. Abakumov A.I., Safronov I.I., Smirnov A.S., Arabey A.B. Chislennaya model makrovyazkogo razrusheniya sovremennykh staley magistralnykh gazoprovodov [A numerical model of macroviscous failure of modern steels of gas mains]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2017. Vol. 79. No 3. P. 301–311 (In Russian).
2. Struin A.O., Pyshmintsev I.Yu., Martynova N.A., Nasybulina E.R., Valov M.A. Otsenka treshchinostoykosti trubnykh staley X80 [Estimation of fracture toughness of pipe steels X80]. *Proizvodstvo, ispytaniya i prakticheskoe ispolzovanie trub bolshogo diametra kategorii prochnosti Xh80/X90 [Proceedings of the International Conference. Production, Testing and Practical Use of Large-diameter Pipes of Strength Category X80/X90]*. Sbornik trudov mezhdunarodnoy konferentsii. 6–8 aprelya, 2011. Moscow (In Russian).
3. R Gazprom 133-2013 *Metodiki otsenki soprotivleniya protyazhennomu vyazkomu razrusheniyu vysokoprochnykh staley na osnove kompleksnykh ispytaniy osnovnogo metalla trub v zavodskikh i laboratornykh usloviyakh [Methods of Evaluation of Resistance Longest Viscous Fracture of High Strength Steels Based on the Comprehensive Tests of Basic Metal Pipes in Factory and Laboratory Conditions]*. 23 p. (In Russian).
4. 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]*. 25 p. (In Russian).
5. Struin A.O. *Povyshenie soprotivlyaemosti razrusheniyu trub bol'shogo 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]*. Diss... kand. tekhn. nauk [Cand. Sci. (Engineering). Dissertation]. National University of Science and Technology. Chelyabinsk. 2014. 151 p. (In Russian)

NUMERICALLY MODELING TENSILE TESTS OF PLATES WITH A LATERAL NOTCH

**Abakumov A.I.¹, Safronov I.I.¹, Smirnov A.S.¹, Arabey A.B.²,
Glebov A.G.³, Esiev T.S.⁴, Struin A.O.⁵**

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

²*Public Joint Stock Company Gazprom, St. Petersburg, Russian Federation*

³*National University of Science and Technology "MISiS", Moscow, Russian Federation*

⁴*Scientific & Research Institute of Natural Gases and Gas Technologies – Gazprom VNIIGAZ, Moscow, Russian Federation*

⁵*The Russian Research Institute of the Tube & Pipe Industries, Chelyabinsk, Russian Federation*

The applicability of the modified Gurson – Tvergaard – Niedelman (GTNm) model to computations is considered; in the frame of numerical modeling, the model makes it possible to obtain failure surfaces, realized in experiments with samples, which include scroll-type surfaces. Tests on static tension of plates (prismatic samples) with a herringbone lateral notch, which initiates the nucleation of a crack, have been modeled using the computer. This type of tests is included into the normative documents of the “Gazprom” JSC with the view of preventing propagation of extended viscous failure in gas mains. Specimens are made of a K65 strength class 1420 mm-diameter tube with a 27.7 mm-thick wall.

Keywords: plastic deformation, viscous failure of specimens, numerical modeling, modified Gurson – Tvergaard – Niedelman (GTNm) model, comparison of computational and experimental results.