



ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В ТРЕЩИНЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ЕЕ ПОВТОРЯЮЩЕГОСЯ НАГРУЖЕНИЯ В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ

В. Л. ВЕНГРИНОВИЧ, Ю. Б. ДЕНКЕВИЧ, С. А. ГЕРЛОВСКИЙ

Институт прикладной физики НАН Беларуси, 220072, г. Минск, Академическая, 16, Беларусь.

E-mail: adcom@iaph.bas-net.by

В несущих конструкциях трещины в большинстве случаев относятся к категории недопустимых дефектов, особенно при динамических и циклических нагрузках. Показано, что повторяющаяся упругопластическая деформация (ПУПД) стальных пластин и труб с трещиной может приводить к возникновению в вершине трещины остаточных сжимающих напряжений, уменьшающих концентрацию напряжений и вероятность раскрытия трещины при приложении к ней растягивающих напряжений. Изложены результаты экспериментального и расчетного исследования влияния ПУПД на изменение остаточных напряжений в области трещины. Экспериментальное исследование выполнено на пластинах из малоуглеродистой низколегированной стали С345 200×30×5,5 мм с поверхностными односторонними микротрещинами раскрытием 3 и 5 мкм, радиусами закругления в вершине трещины 1,5 и 2,5 мкм соответственно, глубиной около 1 мм и длиной соответственно 16 и 18 мм, полученными по специальной технологии электрохимической обработкой. На машине Instron образцы периодически нагружались и после каждого нагружения разгружались. Кинетику деформации металла в области трещин непрерывно отслеживали с помощью тензорезисторов с базой 1 мм, наклеенных в области трещины и на основной металл. Выходы тензорезисторов подключались к разработанной в Институте прикладной физики НАН Беларуси многоканальной многофункциональной тензостанции. Расчетное моделирование выполнялось методом конечных элементов. Экспериментально и расчетным путем показано, что повторяющееся нагружение материала с односторонней трещиной до напряжений вблизи предела пропорциональности для основного металла может приводить к возникновению в вершине трещины и в основном металле остаточных сжимающих напряжений. Это происходит за счет того, что при нагружении в вершине и на краях трещины возникают зоны текучести, в которых после разгрузки возникают остаточные сжимающие напряжения. Разгрузка приводит к тому, что основной металл сжимает трещину, создавая в корне остаточные напряжения сжатия. При оптимизации режимов прочность материала с трещиной может приближаться к прочности материала без трещины. Предлагаемый метод моделирования поведения металла в зоне трещины может быть использован для расчетного определения оптимальных режимов, наиболее легко реализуемых при испытаниях тонкостенных трубопроводов. Библиогр. 8, рис. 12.

Ключевые слова: трещина, упругопластическая деформация, концентрация напряжений

В несущих конструкциях трещина в большинстве случаев относится к категории недопустимых дефектов, особенно при динамических и циклических нагрузках [1, 2]. Причинами возникновения трещины могут быть усталость, стресс-коррозия, приложенные напряжения, превышающие предел прочности материала в данном состоянии, остаточные напряжения и др.

Трещина в конструкции является источником концентрации напряжений, как правило, в ее вершине [3, 4]. Для характеристики резкого снижения предельных прочностных характеристик конструкционных материалов в результате возникновения трещины широко используют характеристики трещиностойкости, коэффициент интенсивности напряжений, предел усталости, предел прочности. Для повышения трещиностойкости существуют различные технологические способы, которые чаще всего сводятся к уменьшению концентрации напряжений, в том числе в зарождающихся трещинах: ультразвуковая обработ-

ка, засверливание отверстий в вершине трещины, низкотемпературный отпуск, различного типа ловушки трещин, упругопластическая деформация труб внутренним давлением, известная как технология «autofrettage» для толстостенных труб [5-7] или «stress-test» — для тонкостенных [8].

Технология «autofrettage» широко используется для увеличения трещиностойкости толстостенных цилиндров [7]. При нагнетании внутреннего давления в трубе возникает радиально неоднородная упругопластическая деформация и уменьшаются кольцевые напряжения в направлении от внутреннего к наружному диаметрам. При достижении критерия текучести Мизеса–Хенки на внутреннем диаметре от него в направлении наружной поверхности трубы при дальнейшем увеличении давления распространяется зона пластического течения. На внутренних волокнах возникает пластическая деформация растяжения, приводящая к тому, что при последующем снятии давления наружные волокна, сжимаясь, вызывают остаточ-

ные напряжения сжатия на внутренних, что и способствует возникновению кольцевых напряжений сжатия на внутренней части трубы и повышению трещиностойкости. Количественные характеристики режимов упрочнения этим способом хорошо известны [5-7], однако его применение ограничивается толстостенными цилиндрами.

Ситуация с тонкостенными цилиндрами, оболочками и пластинами далеко не так однозначна, особенно при наличии трещины. На рис. 1, а показано рассчитанное по формулам, приведенным в работах [6, 7], радиальное распределение окружных напряжений в стенке трубы 1220×20 мм при внутреннем давлении 10 МПа, достаточном для возникновения зоны упругопластической деформации, на рис. 1, б это же распределение после снятия внутреннего давления. Возникающие на внутренних волокнах сжимающие напряжения незначительны по величине и не могут существенно влиять на прочностные характеристики трубы. Тем не менее, результат расчета показывает, что в принципе неоднородная упругопластическая деформация пластичных конструктивных материалов может быть источником возникновения остаточных напряжений сжатия, приводящих к снижению риска распространения трещины при воздействии на нее напряжениями растяжения. Возникает вопрос, можно ли повысить влияние этого эффекта в тонкостенных объектах. В настоящей статье изложены результаты экспериментального и расчетного исследования влияния повторяющейся упругопластической деформации

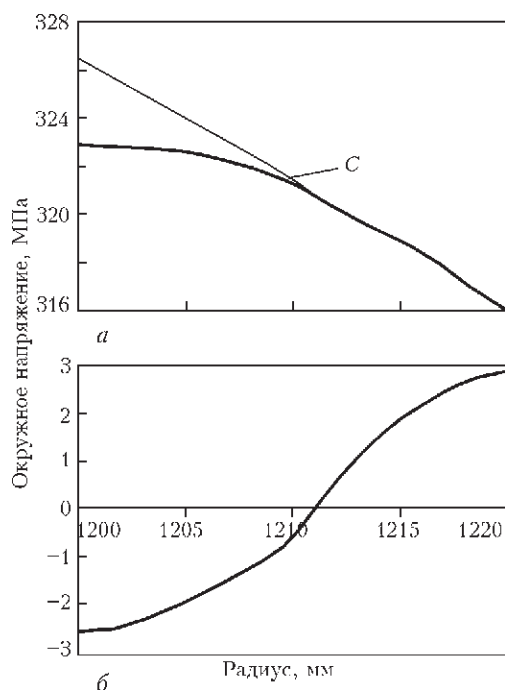


Рис. 1. Расчетное распределение по радиусу окружных напряжений в трубе 1220×20 мм: а – при величине внутреннего давления 10 МПа и при отсутствии пластического течения – кривая С; б – после снятия внутреннего давления

стальных пластин на изменение остаточных напряжений в области трещины.

Образцы и методика эксперимента. Для исследования поведения металла в области трещины в лабораторных условиях были изготовлены два образца из малоуглеродистой низколегированной стали С345 200×30×5,5 мм с поверхностными односторонними микротрещинами раскрытием 3 мкм (образец 1) и 5 мкм (образец 2), глубиной около 1 мм и длиной соответственно 16 и 18 мм, полученными по специальной технологии электрохимической обработкой (рис. 2). В образце 2 перед испытаниями на краю трещины было просверлено отверстие диаметром 1 мм и глубиной 2 мм, чтобы убрать резкий концентратор напряжений в вершине.

Трещины выявлены методом цветной капиллярной дефектоскопии. Предел текучести $\sigma_v = 345$ МПа, предел прочности $\sigma_d = 470$ МПа. Химический состав стали С345 к мас. %: до 0,12 С; 0,17...0,37 Si; 0,3...0,6 Mn; 0,3...0,6 Ni; до 0,04 S; 0,07...0,12 P; 0,5...0,8 Cr; до 0,012 N; 0,08...0,15 Al; 0,3...0,5 Cu.

В ходе эксперимента на машине Instron образцы периодически нагружали и после каждого нагружения разгружали. Поведение дефектов непрерывно отслеживалось с помощью тензорезисторов с базой 1 мм, наклеенных в области тре-

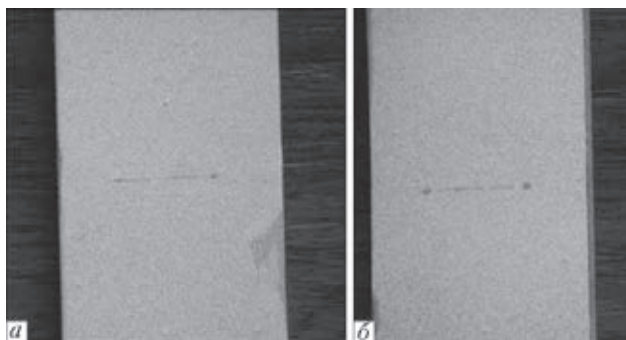


Рис. 2. Образцы с поверхностными микротрещинами раскрытием 3 (а) и 5 мм (б) для исследования поведения металла вблизи трещины

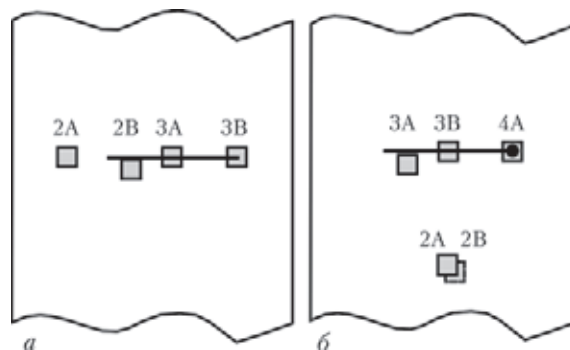


Рис. 3. Расположение тензорезисторов на образцах 1 (а) и 2 (б) при проведении испытаний: 2А – основной металл; 2В – рядом с трещиной; 3А – над трещиной; 3В – над краем трещины; 4А – над просверленным отверстием



щины и на основной металл. Выходы тензорезисторов подключали к разработанной в Институте проблем физики НАН Беларуси многоканальной многофункциональной тензостанции. Схема расположения тензорезисторов на образцах представлена на рис.3.

На рис. 4 представлены результаты измерения деформации тензорезисторами в области трещины при повторяющемся нагружении образца 1 до и выше предела текучести (в каждом цикле нагружения). На рис. 5 показана кривая нагружения — зависимость деформаций в области трещины от напряжения (отношения усилия к сечению образца) при последовательном нагружении и разгрузке образца 1. На рис. 6 – деформации в области трещины при нагружении образца 2 до разрыва (в третьем цикле нагружения). На рис. 7 – кривые нагружения металла в различных зонах трещины при последовательном нагружении образца 2. На рис. 8 – фото сечения образца 2 после разрыва, на которой в верхней части видна поверхность трещины.

Результаты экспериментов. На рис. 4–7 приведена информация о кинетике деформации в различных зонах образцов, деформируемых в упругопластической области. Как сказано выше, образцы 1 и 2 отличаются тем, что в первом тре-

щина находится в своем естественном состоянии в вершине, а во втором — в вершине сделано разгрузочное закругление радиусом 0,5 мм. Как видно из рис. 4–7, особенности деформации различных зон вблизи трещины принципиально различаются. Образец 1 (рис. 4, 5): три цикла квазистатического нагружения. В первом цикле основной металл (диаграмма 2А) нагружается до предела текучести ($\epsilon \sim 0,2\%$), что соответствует абсолютному удлинению $\sim 2,0 \cdot 10^{-3}$ мм на базе 1 мм, а раскрытие трещины (3А) при этом опережает удлинение основного металла, причем, абсолютное удлинение на базе 1 мм больше и составляет $\sim 2,5 \cdot 10^{-3}$ мм. Совместность деформаций трещины и основного металла обеспечивается тем, что превышение раскрытия трещины компенсируется уменьшением деформации металла рядом с трещиной (2В), абсолютная величина последней не превышает $\sim 1,0 \cdot 10^{-3}$ мм. Абсолютную деформацию в корне трещины (3В) оценить трудно из-за неоднородности ее распределения в зоне установки миллиметрового тензодатчика (результаты моделирования деформаций в различных зонах приведены ниже).

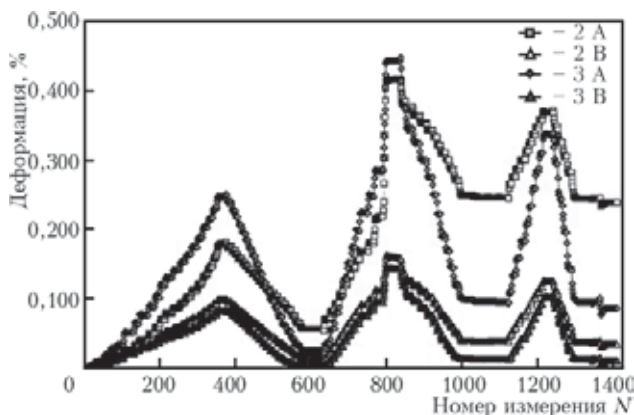


Рис. 4. Деформации в области трещины при повторяющемся нагружении образца 1 (условные обозначения те же, что и на рис. 3)

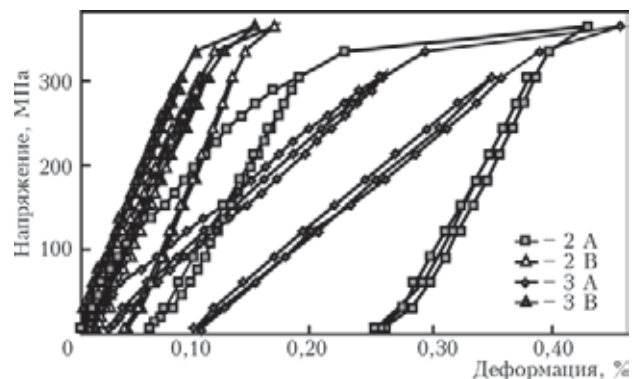


Рис. 5. Зависимость деформаций в области трещины от напряжения (отношение усилия к сечению образца) при повторяющемся нагружении образца 1 (обозначения те же, что и на рис. 3)

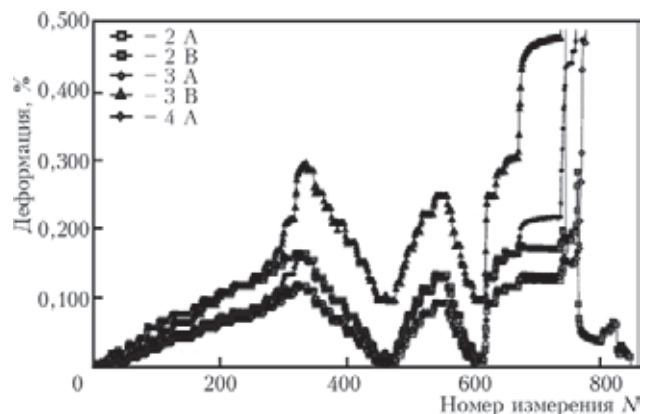


Рис. 6. Деформации в области трещины при циклическом нагружении образца 2 до разрыва (в третьем цикле нагружения): 2А - основной металл; 2В - основной металл с противоположной стороны образца; 3А – рядом с трещиной; 3В – над трещиной; 4А – над отверстием

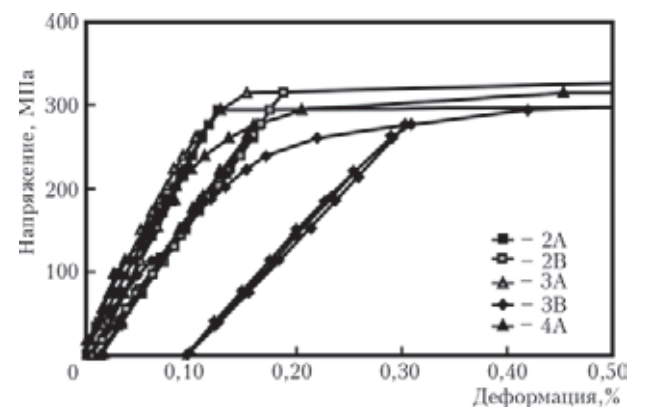


Рис. 7. Зависимость деформаций в области трещины от напряжения (отношение усилия к сечению образца) при циклическом нагружении образца 2 (обозначения те же, что и на рис. 6)

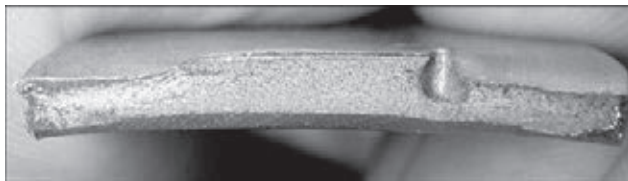


Рис. 8. Образец 2 после разрыва

Медленная разгрузка образца приводит к возникновению в конечном итоге остаточных деформаций, неодинаковых в разных зонах образца (рис. 5). При разгрузке скорость закрытия трещины (рис. 4, наклон диаграммы 3А разгрузки) значительно превышает скорость разгрузки основного металла 2А за пределами трещины; на каком-то этапе ($\epsilon \sim 0,12\%$) деформации выравниваются, после чего в основном металле согласно условию равновесия возникают остаточные деформации (и напряжения) растяжения, а в области трещины – сжатия (ясно, что первопричиной этого эффекта является неоднородность упругопластической деформации в различных зонах образца при нагружении). Величину остаточной деформации сжатия можно определить путем рассмотрения соотношения остаточных деформаций в различных зонах (рис. 5). Остаточная деформация в корне трещины после первого цикла равна нулю (3В) или даже отрицательна, а деформация трещины (0,02 %) ниже деформации основного металла. Ясно, что разность этих деформаций (0,04 %) действует как давление, сжимающее трещину со стороны основного металла. Приблизительно можно оценить его величину, равную $\sigma = E\epsilon = 2,1 \cdot 10^5 \cdot 4 \cdot 10^{-4} \approx 80$ МПа. О правомочности приведенной оценки напряжения, возникающего в трещине, можно говорить только в применении к использованному в экспериментах образцу, в котором длина трещины составляет половину ширины образца. Чем меньше длина трещины, а зона пластического течения в корне больше, тем значительнее будет эффект сжатия или «упрочнения» трещины.

На втором цикле максимальная деформация в основном металле была увеличена до $\epsilon \sim 0,45\%$ (см. рис. 4) и сопровождалась явно выраженным пластическим течением (рис. 5). При разгрузке описанный эффект образования остаточных деформаций сжатия в основном металле стал еще более интенсивным, остаточная деформация в корне трещины незначительно увеличилась и составила приблизительно 0,01 % (3В), деформация в основном металле 2А – 0,25 %, а деформация трещины 3А – 0,1 %. Сжимающее давление, оказываемое основным металлом на трещину, составляет, следовательно, 0,15 %, а соответствующее напряжение сжатия примерно 300 МПа, благодаря которому возникает эффект «упрочнения» трещины. Таким образом, упрочнению трещины способствует нарастающая положительная

разность между остаточной деформацией основного металла и трещины. Возникает возможность реализации эффекта «упрочнения» трещины при ее повторном нагружении, своего рода режим «crack-train» — «тренинг для трещины».

Однако уже на третьем этапе эффект «упрочнения» не наблюдался, несмотря на значительную абсолютную величину деформации основного металла при нагружении. По нашему мнению, это связано с предшествующим «упрочнением» трещины и задержкой по этой причине начала пластического течения металла в корне (как видно из рис. 5, оно вообще не возникает). Эффект упрочнения отражается также и на величине напряжения разрушения, которое, как видно из сравнения рис. 5 и 7, для двух видов образцов примерно одинаковое несмотря на устранение концентратора напряжений в образце 2.

Образец 2 (рис. 6, 7): появление разгрузочного отверстия в вершине трещины существенно меняет характер неоднородности напряженно-деформированного состояния. Наиболее значительное неупругое поведение демонстрирует параметр раскрытия трещины (3В). Практически на всех этапах нагружения и разгрузки образца раскрытие трещины превышает деформацию основного металла. Деформации в разгрузочном отверстии (4А) и в основном металле (2В диаграммы для обеих сторон образца) выравниваются и становятся близкими друг к другу, а раскрытие трещины 3В увеличивается вплоть до разрушения образца на третьем этапе. Разгрузочное отверстие способствует, таким образом, выравниванию деформаций в разных зонах образца и нивелированию эффекта «упрочнения» в корне. Наблюдается также значительное различие деформаций основного металла в пластине со стороны трещины и с обратной стороны (диаграммы 2А и 2В соответственно). Со стороны трещины деформация основного металла остается все время ниже. Это различие возникает, чтобы обеспечить совместность деформаций в различных зонах образца.

Численное моделирование. Численное моделирование осуществлялось с помощью метода конечных элементов. В качестве модели использовалась пластина с трещиной с параметрами, близкими к параметрам образцов, которые использовались при экспериментальном исследовании поведения трещин. Вычисления проводили с учетом возникновения зоны пластичности в основном металле, на трещине и ее краях. При этом применялись условия текучести Треска (III теория прочности) и фон Мизеса (IV теория прочности).

В качестве модели брали поверхностную трещину длиной 16 мм, глубиной 1 мм и раскрытием 0,1 мм, расположенную в пластине с рабочим

сечением 40×4 мм. В качестве кривой напряжения–деформации при моделировании использовали экстраполированную кривую, полученную при испытаниях на образцах (рис. 9).

На рис. 10 представлено использованное при расчетах разбиение фрагмента модели (1/4 симметричная часть области расчета) на конечные элементы. Средние размеры элементов составляли 0,1 мм в области трещины и 1 мм – в остальной области. Общее количество элементов фрагмента составляло 49805, узлов – 74587. При расчетах модель «нагружали» таким образом, что напряжения в бездефектной части модели либо соответствовали напряжениям примерно 67 % предела текучести для этой стали, либо величине, равной пределу текучести. Для выбранной модели эти напряжения составляли примерно 200 и 300 МПа соответственно.

На рис. 11, 12 показаны результат моделирования кинетики деформации образца с трещиной. Представлено характерное расчетное распределение напряжений в области трещины при последо-

вательном нагружении до 200 МПа и снятии нагрузки. Как видно из рисунков, при нагружении

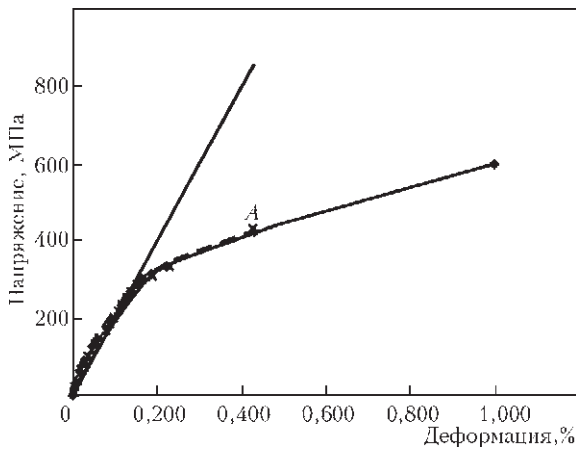


Рис. 9. Экстраполированная кривая упругопластической деформации, полученная экспериментально для образцов стали S345 (экспериментальные данные – кривая OA)

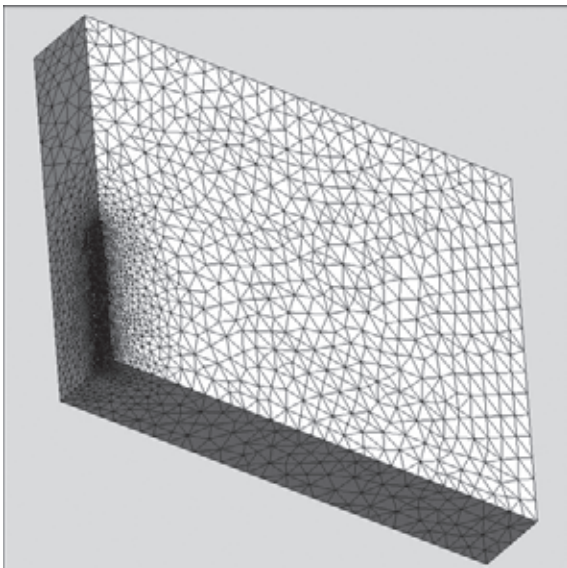


Рис. 10. Разбиение фрагмента модели на конечные элементы

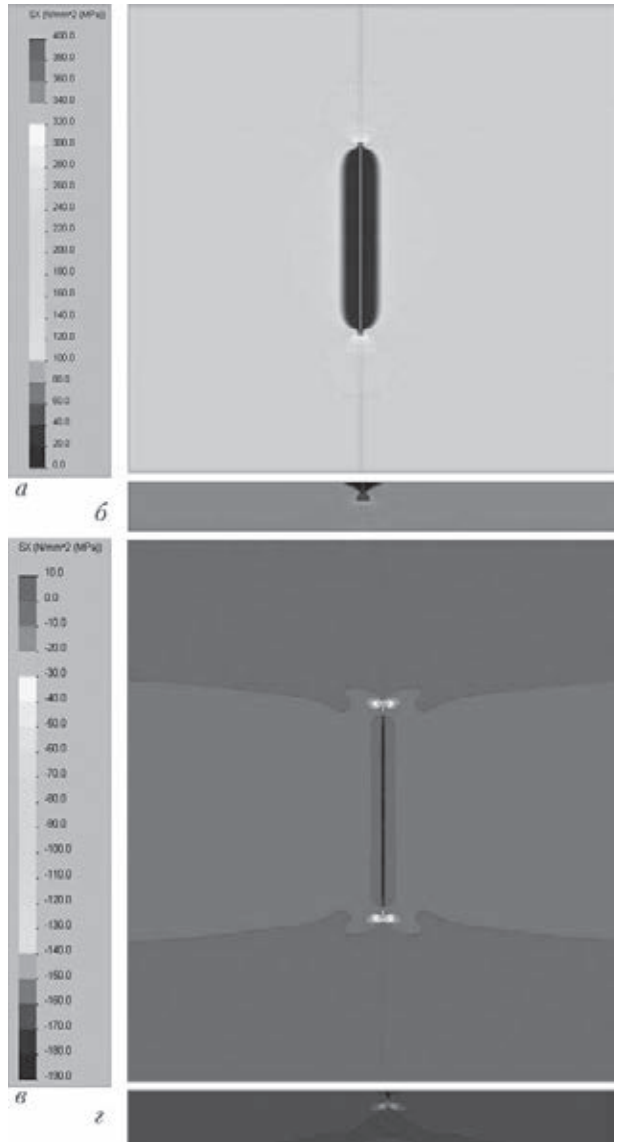


Рис. 11. Распределение напряжений в области трещины при нагружении (а – вид сверху; б – продольный разрез) и снятии нагрузки (в – вид сверху; з – продольный разрез)

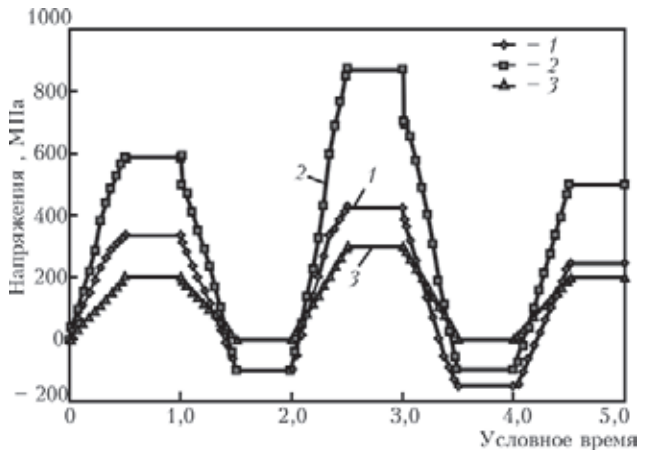


Рис. 12. Зависимость напряжений вблизи вершины трещины, края трещины и в бездефектной области от времени при нагружении, имитирующем «стресс-тест» испытания: 1 – вершина трещины; 2 – край трещины; 3 – основной металл

в вершине и на краях трещины возникают зоны текучести, в которых после разгрузки возникают остаточные сжимающие напряжения. Это сопровождается тем, что при разгрузке уменьшение деформации трещины в какой-то момент опережает снижение деформации основного металла. Последующая разгрузка приводит к тому, что основной металл как-бы сжимает трещину, создавая в корне остаточные напряжения сжатия. Расчет показал, что при последующем нагружении до 200 МПа характер распределения напряжений под нагрузкой и остаточных напряжений практически не меняется.

Выводы

Экспериментально и расчетным путем показано, что повторяющееся нагружение материала с односторонней трещиной до напряжений предела пропорциональности для основного металла может приводить к возникновению в вершине трещины и в основном металле остаточных сжимающих напряжений, уменьшающих концентрацию напряжений в корне трещины и вероятность раскрытия трещины при приложении к ней растягивающих напряжений, своего рода «crack-train» – «тренинг для трещины». При оптимизации режимов «crack-train» прочность материала с трещиной может приближаться к прочности материала без трещины.

Предлагаемый метод моделирования поведения металла в зоне трещины может быть использован для расчетного определения оптимальных режимов «crack-train», наиболее легко реализуе-

мых при «stress-test» испытаниях тонкостенных трубопроводов.

Обычно достаточно одного-двух циклов нагружения при оптимальных режимах для достижения желаемого эффекта упрочнения. Последующие циклы нагружения, как правило, по крайней мере, не усиливают этого эффекта.

Предварительное перед циклом «crack-train» снятие концентратора напряжений в вершине трещины путем засверливания в ней разгрузочных отверстий не способствует последующему проявлению эффекта «упрочнения», который является результатом значительной пространственной неоднородности напряжений в области трещины при ее деформации растяжением.

1. *Партон В. З., Борисковский В. Г.* Динамика хрупкого разрушения. – М.: Машиностроение, 1988 – 240 с.
2. *Н. Ф. Морозов, Петров Ю. В.* Проблемы динамики разрушения твердых тел. – С.-Пб: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 1997. – 132 с.
3. *Черепанов Г. П.* Механика хрупкого разрушения / Под ред. В. М. Сафрай. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
4. *Гольдштейн Р. В.* Пластичность и разрушение твердых тел. – М.: Наука, 1988. – 200 с.
5. *Parker A. P.* Autofrettage of open-end tubes - pressures, stresses, strains, and code comparisons // J. of pressure vessel technology. – 2001. – **123**. – P. 271–277.
6. *Majzoubi G. H., Farrahi G. H., Mahmoudi A. H.* A finite element simulation and an experimental study of autofrettage for strain hardened thick-walled cylinders // J. Mater. Sci. Eng. A. – 2003. – **359**. – P. 326–331.
7. *Franklin G. J., Morrison J. L. M.* Autofrettage of cylinders: prediction of pressure, external expansion curves and calculation of residual stresses // Proc. of Institute of Mechanical Eng. – 1960. – **174**. – P. 947–974.
8. *Б. Н. Антипов, В. Н. Понамарев, А. С. Вятин.* Технология испытаний для реабилитации магистральных газопроводов после ремонта // Экспозиция нефть-газ. – 2009. – №2. – С. 29–31.

In load-carrying structures a crack belongs to the category of inadmissible defects, particularly under dynamic and cyclic loads. It is shown that recurrent elasto-plastic deformations (REPD) of steel plates and pipes with a crack may lead to initiation in the crack tip of residual compressive stresses, reducing the stress concentration and the probability of crack opening at application of tensile stresses to it. Results of experimental and calculation-based investigations of REPD influence on the change of residual stresses in the vicinity of the crack are described. Experimental investigations were performed on plates from low-carbon steel S345 200x30x5.5 mm with surface one-sided microcracks with 3 and 5 ~m opening, rounding-off radii in the crack tip of 1.5 and 2.5 ~m, depth of about 1 mm and length of 16 and 18 mm, respectively, made by the special technology of electrochemical treatment. In Instron machine the samples were periodically and unloaded after each loading. Kinetics of metal deformation in the vicinity of the crack was traced continuously using strain gauges with 1 mm base, pasted in the vicinity of the crack and on the base metal. Strain gauge outputs were connected to multichannel multifunctional tensostation developed at the Institute of Applied Physics of the NAS of Belarus. Calculation modeling was performed by finite element method. It was proved experimentally and by calculations that recurrent loading of the material with a one-sided crack up to stresses close to proportionality limit for the base metal, can induce residual compressive stresses in the crack tip and in the base metal. It occurs due to appearance of yield zones in the crack tip and on its edges at loading, where residual compressive stresses develop after unloading. Unloading leads to base metal compressing the crack, thus inducing residual compressive stresses in the root. At mode optimization, the strength of material with a crack can be close to that of material without a crack. The proposed method of modeling metal behaviour in the crack zone can be used for calculation of optimum modes, the most readily implemented at testing of thin-walled pipelines.

Keywords: crack, elasto-plastic deformation, stress concentration

Поступила в редакцию
17.01.2013