

но влияние длины калибрующего пояска, т. е. с увеличением \bar{l}_k значения оптимальных углов возрастают.

Геометрия волочильного инструмента стандартизирована, поэтому для стандартных углов могут быть рекомендованы оптимальные значения коэффициента вытяжки, обеспечивающие минимальное напряжение волочения. Разрешая соотношение (10) относительно λ , получим оптимальную вытяжку

$$\lambda^{\text{опт}} = \exp\left(0,5 \frac{\text{tg}^2 \alpha_b}{f(1 - \sigma_0 / \sigma_{TC})(1 + \bar{l}_k)}\right). \quad (12)$$

Выводы. В работе предложена методика определения оптимальных углов волочильного инструмента,

учитывающая наличие калибрующего пояска волокна и обеспечивающая минимальное значение напряжения волочения. Для стандартных волокон с фиксированным углом конусности волокна предложена формула для определения оптимальной вытяжки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Перлин И.Л., Ерманок М.З. Теория волочения. – М.: Металлургия, 1972. – 448 с.
2. Колмогоров Г.Л. Гидродинамическая смазка при обработке металлов давлением. – М.: Металлургия, 1986. – 168 с.

© 2013 г. Г.Л. Колмогоров, Т.В. Чернова,
Е.М. Аверьянова, М.В. Сизирева
Поступила 25 декабря 2012 г.

УДК 669.15-194:621.771-413

А.Б. Максимов

Керченский государственный морской технологический университет

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТРЕЩИН В ТРУБАХ ИЗ НЕОДНОРОДНОГО МАТЕРИАЛА

Аннотация. Распространение трещин в термически армированном листовом прокате имеет ряд особенностей и освещено в литературе недостаточно полно. Термически армированный листовой прокат является примером неоднородного материала. В данной работе моделировалось разрушение трубы под действием внутреннего избыточного давления из неоднородного материала. Рассмотрен характер разрушения частных случаев неоднородного материала. Установлены некоторые закономерности разрушения неоднородных материалов, подтверждающие его волновую природу. Предложены схемы армирования листового материала, обеспечивающие минимизацию последствий разрушения.

Ключевые слова: неоднородный материал, длина трещины, ветвление трещины, отклонение трещины, разрушение, труба, напряженное состояние.

PROPAGATION OF CRACKS IN THE PIPES OF THE INHOMOGENEOUS MATERIAL

Abstract. Crack propagation in thermally reinforced rolled sheet has a number of features and highlighted in the literature sufficiently. Heat-reinforced sheet metal is an example of an inhomogeneous material. In this study simulated the destruction of the pipe under internal pressure of the non-homogeneous material. Considered special cases of the fracture behavior of heterogeneous material. Some regularities of the destruction of heterogeneous materials, confirming its wave nature. Schemes of reinforcing sheet material to ensure the minimization of the consequences of failure.

Keywords: heterogeneous material, the length of the crack, the crack branching, crack deflection, demolition, pipe, tensity.

Исследовано распространение трещин на моделях труб, изготовленных из неоднородного материала. Установлены некоторые закономерности разрушения труб из такого материала под действием избыточного внутреннего давления.

Исследования по изучению распространения трещин под действием приложенных нагрузок в материалах с однородной структурой широко представлены в литературе [1, 2]. В ряде работ [3, 4] теоретически и экспериментально установлено различие в характере распространения трещин в гетерофазных материалах. Как известно [5], характер разрушения в значительной мере зависит от напряженно-деформированного состояния, т.е. от условий эксплуатации изделия. В действительности не всегда условия испытания мате-

риала соответствуют эксплуатационному напряженно-деформированному состоянию конструкции или изделия. Поэтому целесообразно исследование свойств металла проводить при напряженно-деформированном состоянии, соответствующем эксплуатационному.

В работах [3, 4, 6] предложен термически армированный толстолистовой прокат для изготовления, например, труб большого диаметра для магистральных газо- и нефтепроводов. В литературе отсутствуют сведения, касающиеся механизма разрушения труб, изготовленных из термически армированного листа. Термически армированный лист можно рассматривать как пример неоднородного материала.

Целью настоящей работы является изучение характера распространения трещин в трубах из неоднород-

ного материала, находящихся под действием внутреннего избыточного давления.

Моделирование условий эксплуатации труб диам. 1200 – 1400 мм и длиной 8 м, находящихся под действием внутреннего избыточного давления, проводили на модели в масштабе 1:10.

Модель трубы изготавливали из бумаги с поверхностной плотностью 160 мг/см². Для предотвращения пропускания воздуха через бумагу к внутренней части модели трубы прикрепляли полиэтиленовую пленку толщиной 150 мкм. Имитация термического армирования толстолистового проката осуществлялась путем обработки алкидно-уретановым лаком локальных областей бумажной заготовки (развертки) трубы. Области представляли полосы шириной 30 мм, наклоненные к образующей цилиндрической поверхности трубы на углы 25° (II схема), 45° (III схема), 65° (IV схема), 90° (V схема). Расстояние между полосами составляло 45 мм. Это соответствует рекомендации [6], что площадь упрочненных областей должна быть порядка 25 % всей площади листа. Для сравнения испытывалась модель без упрочненных областей (I схема).

Механические свойства чистой бумаги и пропитанной лаком определялись на растяжение с определением временного сопротивления разрыву. Прочность бумаги, пропитанной лаком, превышала прочность чистой бумаги в 1,4 – 1,5 раза. Это соответствует отношению аналогичных характеристик упрочненных и неупрочненных областей для термически армированного листа из низколегированных сталей.

Из листов бумаги, обработанных по схемам I – V, изготавливали модель трубы. В трубу нагнетался сжатый воздух до давления 0,07 МПа. При этом давлении происходило разрушение модели. По каждой схеме обработки материала испытывали до пяти моделей.

Испытание модели трубы по схеме I (из однородного материала) показало, что разрушение сопровождается практически прямолинейным распространением трещины вдоль образующей цилиндрической поверхности (рис. 1). Ветвление трещины отсутствует. Длина трещины совпадала с длиной модели трубы, т.е. модель разрушалась полностью.

На рис. 2. представлены фотографии трещин на моделях по схемам II – V обработки материала.

Трещины образуются в неупрочненной области материала. Поэтому разрушение модели происходит при одинаковом внутреннем избыточном давлении (0,07 МПа) для всех пяти схем. Затем трещина пересекает одну упрочненную область (иногда две) и происходит ее ветвление. При ветвлении магистральная трещина разделяется на две вторичные, которые движутся независимо друг от друга. Причем разветвленные трещины распространяются по разные стороны от направления распространения магистральной. Вероятность ветвления магистральной трещины составляет более 0,9. При этом между направлением вторичной трещи-

ны и направлением магистральной всегда образуется острый угол.

Одна из вторичных трещин имеет тенденцию к распространению вдоль границы раздела упрочненной и неупрочненной областей с возможным ее пересечением. Исключением является схема II (упрочненные полосы расположены перпендикулярно образующей цилиндра трубы). В этом случае вторичные трещины распространяются почти симметрично направлению распространения магистральной трещины.

Другая из вторичных трещин может пересечь упрочненную область под углом, близким к 90°, несколько раз.

Различие в характере распространения вторичных трещин обусловлено геометрическим фактором: для схем III – V одна вторичная трещина подходит к упрочненной области под углом менее 40°, а другая – под углом, близким к 90°.

В подавляющем большинстве случаев ветвление трещины происходит в неупрочненной области после прохождения первой (иногда второй) упрочненной. Характерным является то, что вторичная трещина пересекает упрочненную область с меньшим отклонением, чем неупрочненную. Более того, в ряде случаев вторичная трещина может распространяться в неупрочненной полосе не пересекая следующую упрочненную. На завершающей стадии распространения угол между направлением каждой вторичной трещины и направлением магистральной приближается к 90°, т.е. процесс разрушения проходит в направлении, близком к перпендикулярному распространению магистральной трещины.

Общее для схем II – V является то, что происходит разрушение только части модели трубы.

В таблице представлены значения геометрических характеристик разрушения модели при исследованных схемах нанесения упрочненных областей.

Коэффициент γ , определяемый по соотношению (1), может характеризовать степень отклонения вторичных трещин от направления магистральной:

$$\gamma = l/l_0, \quad (1)$$

где l – общая длина трещин (трещины); l_0 – длина разрушенной части модели.

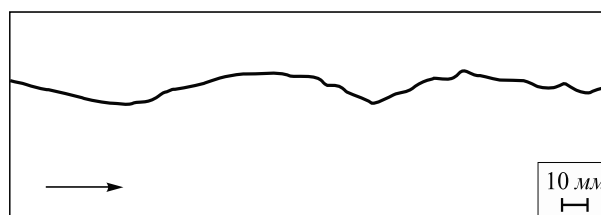


Рис. 1. Распространение трещины в модели из однородного материала:
→ направление длины трубы

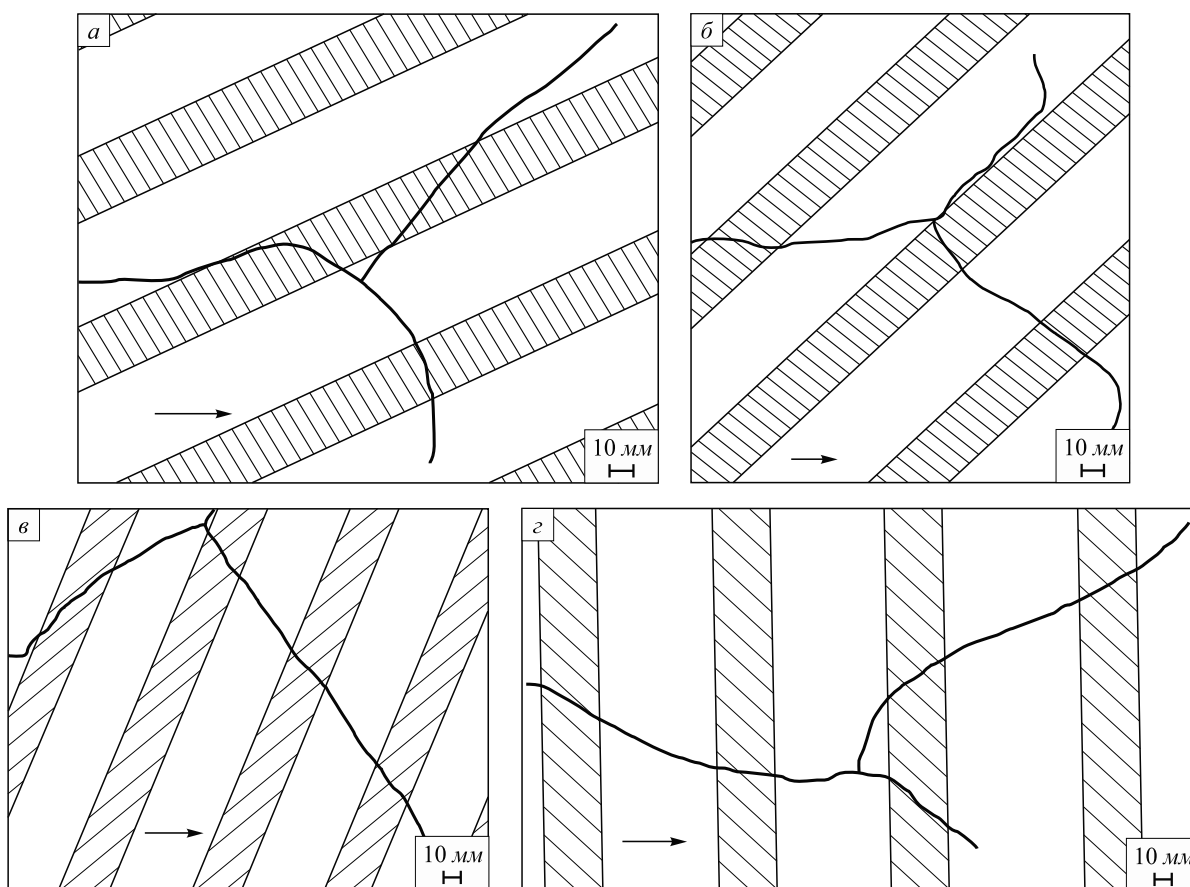



Рис. 2. Распространение трещины в модели из неоднородного материала:
 а – по схеме II; б – по схеме III; в – по схеме IV; з – по схеме V
 → направление длины трубы;  – области упрочнения

Чем более эффективно происходит отклонение вторичных трещин, тем меньше коэффициент γ .

Из данных таблицы видно, что при любом угле между направлением упрочненной полосы и длиной трубы происходит отклонение вторичных трещин от направления магистральной. Наиболее эффективно отклоняются вторичные трещины при наклоне упрочненных полос под углом 45° к направлению длины трубы (схема III). При этом коэффициент $\gamma = 0,51$, т.е. наименьший по сравнению с другими схемами.

Коэффициент β , определяемый по соотношению (2), характеризует эффективность торможения движения трещины:

$$\beta = l/L_0, \quad (2)$$

Значения характеристик разрушения моделей при различных схемах

Характеристика разрушения	I	II	III	IV	V
$\alpha, ^\circ$	–	25	45	65	90
$\gamma_{\text{ср}}$	1	0,59	0,51	0,60	0,70
$\beta_{\text{ср}}$	1	0,37	0,19	0,52	0,48

где l – длина трещины в моделях по схемам II – V; L_0 – длина трещины в необработанном материале (схема I).

Чем меньше длина трещины (l) в модели из материала, обработанного по схемам II – V относительно длины трещины в модели из необработанного материала, тем эффективнее торможение трещин. Поэтому чем меньше β , тем эффективнее действие схемы упрочнения.

По этому критерию также наиболее действенной является схема III, так как коэффициент $\beta = 0,19$, т.е. наименьший.

Поскольку в реальной трубе большого диаметра отношение толщины к диаметру стенки меньше 0,05, то такую трубу можно считать тонким цилиндром [7]. Поэтому в стенке трубы, находящейся под действием внутреннего избыточного давления, создается плоское напряженное состояние и действуют два напряжения: σ_m – меридиальное и σ_t – окружное, при этом $\sigma_m = 2\sigma_t$.

Трещина в материале распространяется под действием на нее максимальных растягивающих напряжений. Поэтому в трубе трещина будет распространяться под действием меридиального напряжения, т.е. в направлении длины трубы. Это справедливо для однородного материала и иллюстрируется на рис. 1 (схема I).

Экспериментальные данные показывают, что наличие упрочненных полос изменяет направление движения трещин. Однако наличие упрочненных полос не изменяет напряженное состояние трубы. Работа распространения трещины в упрочненной области материала больше, чем в неупрочненной. Поскольку трещине предпочтительнее распространяться по пути, где сопротивление ее движению наименьшее, то она движется в неупрочненной области. По-видимому, когда трещина подходит к первой упрочненной полосе, скорость ее уже приближена к максимальной. Вследствие этого, инерционность трещины велика и это не позволяет изменить ее направление. Ветвление свидетельствует, что магистральная трещина движется с максимальной скоростью и находится в нестабильном состоянии [1]. Тот факт, что ветвление магистральной трещины происходит только после пересечения упрочненной области, по-видимому связано с появлением нестабильного состояния при пересечении границ раздела. Образованные после ветвления вторичные трещины распространяются с меньшими скоростями, чем магистральная трещина. Поэтому инерционность вторичных трещин уменьшается и распространение их может происходить в тех областях материала, где работа распространения меньше.

Из рассмотренного анализа движения трещин можно предположить, что при ее скорости, приближенной к максимально возможной, в данном материале доминирующим фактором влияния на траекторию движения трещины является схема напряженного состояния, т.е. направление наибольших растягивающих напряжений определяет траекторию движения трещины. При снижении скорости движения трещины фактором, опреде-

ляющим траекторию ее движения, является минимум работы распространения.

На основании полученных данных разработан способ упрочнения листового проката [8].

Выводы. Пересечение магистральной трещиной области упрочнения инициирует ее ветвление. Вторичные трещины характеризуются отклонением от направления магистральной трещины и меньшей скоростью распространения. Эти факторы способствуют торможению трещин и уменьшению длины разрушенной части изделия. Наиболее эффективно тормозят трещину упрочненные полосы, расположенные под углом 45° к направлению длины трубы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Финкель В.М. Физические основы торможения разрушения. – М.: Металлургия, 1977. – 360 с.
2. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 456 с.
3. Максимов А.Б. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. 2007. № 2. С. 39–42.
4. Максимов А.Б. // Вопросы материаловедения. 2010. № 3. С. 40 – 44.
5. Хол Дж. У., Кихара Х., Зут В., Уэллс А.А. Хрупкое разрушение сварных конструкций. Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.
6. А.с. 1452846 СССР. Способ упрочнения листового проката / Ф.Е. Долженков, В.П. Следнев, М.С. Подгайский и др. // Бюл. изобретений. 1989. № 3.
7. Дарков А.В., Широ Г.С. Сопротивление материалов. – М.: Высшая школа, 1989. – 654 с.
8. Пат. 75518. Украина. Спосіб зміцнення листового прокату/ А.Б. Максимов// Бюл. изобретений. 2006. № 4.

© 2013 г. А.Б. Максимов
Поступила 12 февраля 2013 г.