

PACS: 61.10.Nz, 62.20.-x, 62.20.Mk

Н.М. Шкатуляк, Е.Н. Ткачук

ВЛИЯНИЕ ВНУТРЕННЕГО ЦИКЛИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ТЕКСТУРУ И РАЗРУШЕНИЕ ТРУБЫ ИЗ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ

Южно-украинский национальный педагогический университет им. К.Д. Ушинского
ул. Старопортофранковская, 26, г. Одесса, 65020, Украина
E-mail: shkatulyak@mail.ru

Статья поступила в редакцию 13 июля 2011 года

Рентгенографическим методом изучено изменение кристаллографической текстуры трубы из стали 20 под действием внутреннего циклического гидравлического давления. Текстура исследована как в состоянии поставки, так и после деформации внутренним гидравлическим давлением на 2 и 4% и последующих циклических испытаний пульсирующим давлением 0.3–8 МПа до разрушения. Установлено, что текстура неоднородна по сечению трубы и представлена текстурой сдвига и типичной текстурой прокатки. Обнаружено, что с ростом степени деформации при увеличении давления компоненты текстуры прокатки усиливаются. Это является главной причиной хрупкого разрушения трубы при циклических испытаниях.

Ключевые слова: давление, труба, сталь, текстура, скол, разрушение

Введение

Стальные трубы большого диаметра широко применяются в газо- и нефтепроводном транспорте. В процессе эксплуатации трубы подвергаются воздействию периодически изменяющегося внутреннего давления. Это воздействие может приводить не только к упругой, но и к пластической деформации трубопровода, что способно вызвать изменение структурных характеристик металла. Изменение структуры, в частности кристаллографической текстуры металла, может способствовать развитию слоисто-хрупких трещин и приводит в итоге к наступлению аварийной ситуации с возможным катастрофическим разрушением трубопровода. Печальными примерами подобных ситуаций служат аварии на газопроводе Уренгой–Помары–Ужгород в 2007 [1] и 2010 [2] годах. Поэтому исследование структурных изменений трубопровода под воздействием внутреннего давления является актуальным.

Влияние кристаллографической текстуры на склонность к слоисто-хрупкому разрушению толстых листов низколегированных сталей было установ-

лено авторами ранее [3]. Пластическая деформация металла при изготовлении и эксплуатации листов и труб, как правило, приводит к формированию текстуры деформации. В металлах и сплавах с объемно-центрированной кубической (ОЦК) решеткой плоскости семейства $\{001\}$ -кристаллографий являются основными плоскостями скола [4]. Формирование текстуры, при которой кристаллографические плоскости типа $\{001\}$ в листах параллельны плоскости прокатки, а в трубах – параллельны боковым поверхностям трубы, может провоцировать распространение хрупких слоистых трещин [5,6]. Однако влияние внутреннего давления на характеристики структуры, в частности кристаллографическую текстуру, не изучено.

Целью данной работы является исследование кристаллографической текстуры по сечению трубы из стали 20 в условиях циклической деформации пульсирующим давлением.

1. Материал и методы исследования

Материалом для исследования послужила бесшовная горячекатаная труба диаметром 325 mm с толщиной стенки 8 mm, изготовленная непосредственно из слитка стали следующего химического состава (wt%): 0.23 C, 0.45 Mn, 0.23 Si, 0.04 S, 0.027 P, 0.08 Cr, 0.05 Ni, 0.05 Cu, остальное Fe.

Для проведения испытаний к трубе были приварены два эллиптических днища с технологическими кольцами и два штуцера (один подключает трубу к гидроагрегату, другой – к манометрам, измеряющим давление в трубе).



Рис. 1. Стенд для испытаний на внутреннее гидравлическое давление

Подготовленный к испытанию образец трубы с помощью крана помещали в стенд (рис. 1) и устанавливали таким образом, чтобы после заполнения водой в нем не осталось воздуха. Для более полного удаления воздуха образец, заполненный водой, в течение одного часа не подключали к гидроагрегату.

При входном визуальном контроле на внутренней и наружной поверхностях трубы не были обнаружены дефекты, которые бы препятствовали подготовке ее к испытаниям.

Кристаллографическую текстуру изучали рентгеновским методом с построением обратных полюсных фигур (ОПФ). Кривые полюсной плотности снимали на дифрактометре ДРОН-3 в фильтрованном

K_α -излучении. Интегральную интенсивность дифракционных рефлексов измеряли согласно методике построения ОПФ [7]. Распределение полюсной плотности $P(hkl)$ исследовали в разных сечениях: внешнем приповерхностном слое после снятия окалины, срединном слое, внутреннем приповерхностном слое после снятия окалины, а также в сечении, перпендикулярном оси трубы. Текстуру изучали как в исходном состоянии поставки, так и после деформации 2 и 4%. Во всех случаях перед съемкой кривых полюсной плотности соответствующие поверхности химически полировали на глубину 0.1 мм для снятия слоя, искаженного механической обработкой.

Эталон (образец без текстуры) был изготовлен из мелких рекристаллизованных опилок исследуемой стали. Рентгенографическое сканирование образцов стали и эталона осуществляли на дифрактометре ДРОН-3 в одинаковых геометрических условиях съемки. Находили отношения интегральной интенсивности дифракционных линий эталона и образцов трубы. Нормировку полученных отношений проводили по методике Мориса [7]. При этом для увеличения точности интегральную интенсивность дифракционных линий первого и высших порядков (например, от $\langle 110 \rangle$ и $\langle 220 \rangle$) учитывали как среднее арифметическое.

2. Результаты и обсуждение

Исследовали трубы из низколегированной стали 20. Механические свойства стали в условиях поставки: временное сопротивление $\sigma_b = 485$ МПа; условный предел текучести $\sigma_{0.2} = 335$ МПа; относительное удлинение $\Delta l/l = 28.0\%$. Распределение полюсной плотности по сечению трубы в исходном состоянии показано на рис. 2.

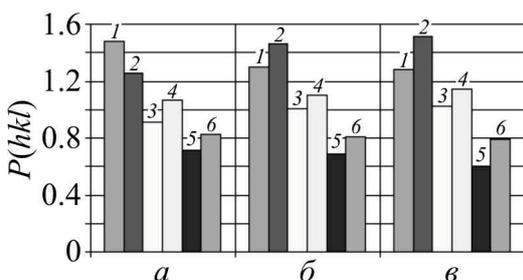


Рис. 2. Распределение полюсной плотности по сечению трубы в состоянии поставки: *a* – внешняя сторона; *b* – середина; *v* – внутренняя сторона. Направления: 1 – $\langle 110 \rangle$, 2 – $\langle 200 \rangle$, 3 – $\langle 211 \rangle$, 4 – $\langle 310 \rangle$, 5 – $\langle 222 \rangle$, 6 – $\langle 321 \rangle$

Зависимости полюсной плотности от степени деформации внутренним гидравлическим давлением на внешней и внутренней сторонах, а также вдоль оси трубы представлены на рис. 3.

В исходном состоянии (до деформации) в приповерхностном слое трубы преобладает компонент текстуры чистого сдвига. При этом кристаллографические плоскости семейства $\{110\}$ располагаются параллельно боковой внешней поверхности, а кристаллографические направления $\langle 001 \rangle$ (рассеянные до $\langle 112 \rangle$) параллельны оси трубы (рис. 2). В кольцевом же направлении трубы располагаются кристаллографические направления $\langle 110 \rangle$ – $\langle 111 \rangle$.

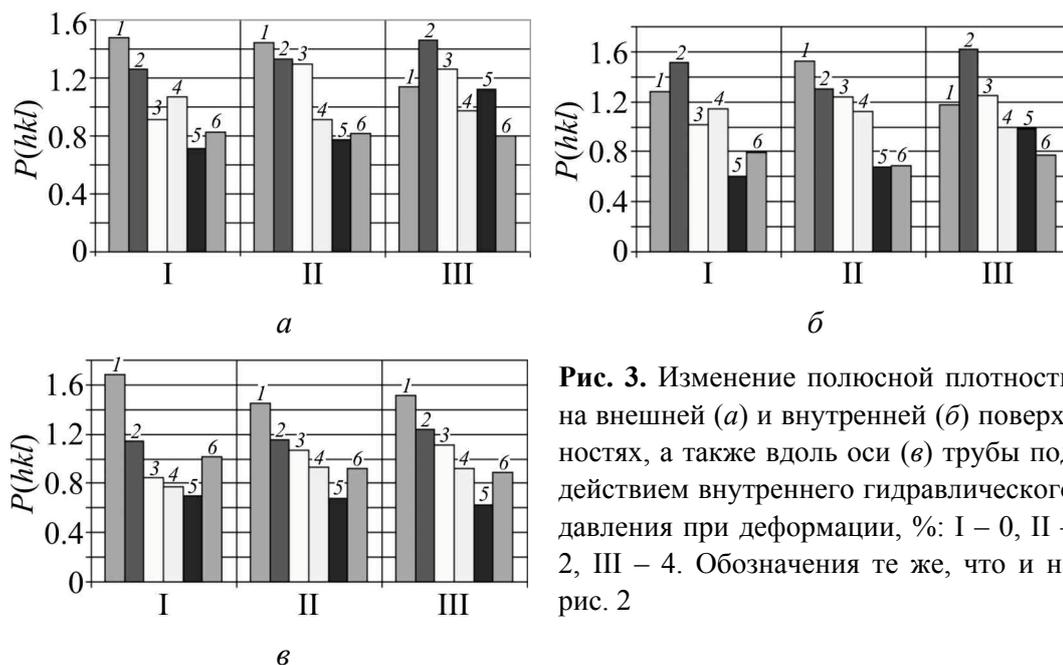


Рис. 3. Изменение полюсной плотности на внешней (а) и внутренней (б) поверхностях, а также вдоль оси (в) трубы под действием внутреннего гидравлического давления при деформации, %: I – 0, II – 2, III – 4. Обозначения те же, что и на рис. 2

Вторым компонентом текстуры в данном слое является типичная текстура деформации ОЦК-металлов. Основной ее компонент характерен тем, что параллельно боковой поверхности трубы располагаются кристаллографические плоскости семейства $\{001\}$. В то же время кристаллографические направления $\langle 110 \rangle$ (рассеянные до $\langle 130 \rangle$) параллельны оси и образующей трубы. Дополнительный компонент текстуры прокатки характеризуется тем, что плоскости $\{112\}$ располагаются параллельно боковой поверхности трубы, а направления $\langle 110 \rangle$ совпадают с осью трубы.

Вдоль кольцевого направления трубы при этом лежат направления $\langle 111 \rangle$. По мере продвижения вглубь к внутренней поверхности изделия вышеупомянутый компонент текстуры сдвига ослабляется, а компоненты текстуры прокатки усиливаются. В срединном слое и на внутренней поверхности трубы компоненты текстуры прокатки являются основными.

Деформация трубы на 2% путем приложения внутреннего давления приводит к изменению текстуры как на внешней, так и на внутренней сторонах трубы (рис. 3, а, б). На данном этапе деформации сдвиговый компонент текстуры является основным.

С увеличением степени деформации трубы до 4% текстура сдвига ослабляется, а типичная текстура деформации усиливается. Причем интенсивность последней на внутренней поверхности трубы превышает ее значение на внешней поверхности в 1.11 раза.

Текстура изломов при циклических испытаниях совпадает с текстурой, которая сформировалась в процессе предыдущей деформации гидравлическим внутренним давлением. Это может свидетельствовать о том, что в процессе разрушения пластическая деформация практически отсутствовала. Ориентация кристаллов по отношению к телу стенки трубы представлена на рис. 4.

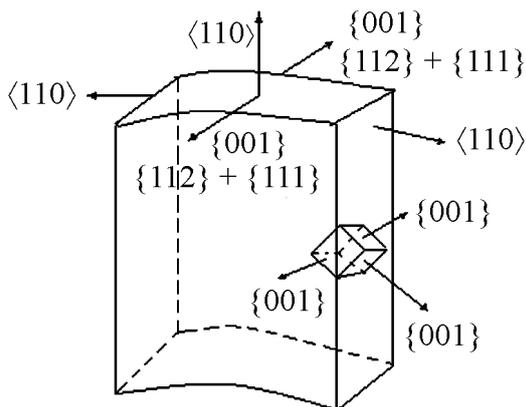


Рис. 4. Ориентация кристаллов в трубе из стали 20

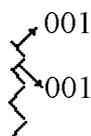


Рис. 5. Схема ориентации излома

Анализ вида излома и ориентации траектории разрушения позволяет заключить, что разрушение осуществлялось путем отрыва по кристаллографическим плоскостям семейства $\{001\}$ (рис. 5).

Выводы

Таким образом, установлено, что кристаллографическая текстура трубы из стали 20 неоднородна по сечению стенки трубы и представлена такими компонентами: 1) текстурой сдвига (плоскости $\{110\}$ параллельны боковой поверхности, направления $\langle 110 \rangle$ параллельны оси трубы); 2) типичной текстурой прокатки (плоскости $\{001\} + \{112\}$ параллельны боковой поверхности, направления $\langle 110 \rangle - \langle 111 \rangle$ параллельны оси трубы). С ростом степени деформации при увеличении давления компоненты текстуры прокатки усиливаются, что является главной причиной хрупкого разрушения трубы при циклических испытаниях внутренним давлением.

1. http://sio.su/down_021_3_def.aspx.
2. <http://www.bagnet.org/news/summaries/ukraine/2010-08-03/58147>.
3. В.В. Усов, Н.М. Шкатуляк, ФХММ **41**, № 1, 58 (2005).
4. Ч.С. Баррет, Т.Б. Массальский, Структура металлов, Металлургия, Москва (1984), ч. 2.
5. В.В. Усов, Н.М. Шкатуляк, В.С. Гиренко, М.Д. Рябкина, А.В. Бернацкий, А.П. Мусяченко, О.Н. Щербаков, Изв. АН СССР. Металлы № 1, 120 (1990).
6. Н.П. Лякишев, И.В. Эгиз, В.Ф. Шамрай, Металлы № 2, 68 (2000).
7. М.М. Бородкина, Э.Н. Спектор, Рентгенографический анализ текстур в металлах и сплавах, Металлургия, Москва (1982).

Н.М. Шкатуляк, О.М. Ткачук

ВПЛИВ ВНУТРІШНЬОГО ЦИКЛІЧНОГО ТИСКУ НА ТЕКСТУРУ І РУЙНУВАННЯ ТРУБИ З НИЗЬКОЛЕГОВАНОЇ СТАЛІ

Рентгенографічним методом вивчено зміну кристалографічної текстури труби з низьколегованої сталі 20 під дією внутрішнього циклічного гідравлічного тиску. Текстуру досліджено як у стані поставки, так і після деформації внутрішнім гідравлічним тиском на 2 і 4% та після подальших циклічних випробувань пульсуючим тиском 0.3–8 МПа до руйнування. Встановлено, що текстура неоднорідна по перетину стінки труби і розподіляється на текстуру зсуву та типову текстуру вальцювання. Виявлено, що з ростом ступеня деформації при збільшенні тиску компоненти текстури вальцювання підсилюються, що є головною причиною крихкого руйнування труби при циклічних випробуваннях.

Ключові слова: тиск, труба, сталь, текстура, відкол, руйнування

N.M. Shkatulyak, E.N. Tkachuk

INFLUENCE OF INTERNAL CYCLICAL PRESSURE ON THE TEXTURE AND FAILURE OF A PIPE MADE OF LOW-ALLOYED STEEL

Crystallographic texture of a steel pipe was studied by X-ray diffractometer method. The texture was investigated in a state of delivery as well as after deformation by the internal hydraulic pressure by 2 and 4 percent and after the further cyclic tests by pulsated pressure of 0.3–8 MPa to the failure. It was established that the texture is heterogeneous through wall thickness of the pipe and is a shear texture and the typical texture of rolling. It was found out that the intensity of rolling texture increases with the increase of degree of deformation under pressure and this is a principal cause of fragile destruction of pipe at cyclic tests.

Keywords: pressure, pipe, steel, texture, cleaving, failure

Fig. 1. The bench for tests upon internal hydraulic pressure

Fig. 2. Distribution of pole density through wall thickness of pipe in a delivery state: *a* – outer side; *b* – middle; *c* – inner side. Directions: 1 – $\langle 110 \rangle$, 2 – $\langle 200 \rangle$, 3 – $\langle 211 \rangle$, 4 – $\langle 310 \rangle$, 5 – $\langle 222 \rangle$, 6 – $\langle 321 \rangle$

Fig. 3. Change of pole density on the exterior (*a*) and inner (*b*) surface of the pipe and along the pipe under internal hydraulic pressure at deformation, %: I – 0, II – 2, III – 4. Notations are as in Fig. 2

Fig. 4. Orientation of crystals in the pipe made of steel 20

Fig. 5. The diagram of orientation of the fracture