

СВОЙСТВА ТРУБНОЙ СТАЛИ, ПОДВЕРГНУТОЙ ДЛИТЕЛЬНОМ ВЫДЕРЖКАМ ПОД ПОСТОЯННОЙ НАГРУЗКОЙ

С.И. Ильин, М.А. Смирнов, Ю.И. Пашков

Исследованы изменения структуры и свойств нормализованной трубной стали 09Г2С, находившейся в течение до 10 лет под действием постоянной нагрузки, равной 0,75 от предела текучести. Установлено, что в первые пять лет нахождения под нагрузкой в стали получает развитие деформационное старение, сопровождающееся заметным изменением физических свойств и повышением температуры вязкохрупкого перехода. При дальнейшей выдержке процессы деформационного старения, по измерениям физических свойств и характера субструктуры, стабилизируются, и их скорость уменьшается.

Ключевые слова: трубная сталь, деформационное старение, внутреннее трение.

Во время эксплуатации газо- и нефтепроводы испытывают как длительные статические, так и повторно-переменные (малоцикловые) и импульсные нагрузки. Их действие приводит к изменению структуры и деградации свойств низкоуглеродистых трубных сталей. Одной из основных причин снижения вязкости и увеличения склонности к хрупким разрушениям таких сталей при эксплуатации является их деформационное старение [1].

В настоящей работе проведена оценка влияния длительной постоянной нагрузки на развитие деформационного старения в стали 09Г2С и изменение ее свойств.

Материалом исследования служила бесшовная труба из стали 09Г2С диаметром 133 мм и толщиной стенки 5 мм, подвергнутая нормализации. Из трубы вырезали патрубки длиной 800 мм, которые на специальной установке ставили на постоянную нагрузку внутренним давлением, равным 0,75 предела текучести, что соответствовало реальным условиям работы газо- и нефтепроводов. Через определенные промежутки времени длительностью до 10 лет отдельные патрубки разгружались и из них изготавливались образцы для структурных исследований и механических испытаний. Структуру стали изучали с использованием оптической и электронной микроскопии.

На образцах размерами 4×4×125 мм на установке ИЧЗ-9А резонансным методом при изгибных колебаниях измеряли амплитудные зависимости внутреннего трения, из которых находили фон внутреннего трения δ и крутизну его амплитудной зависимости $\text{tg}\alpha$. Используя те же образцы, определяли коэрцитивную силу H_C баллистическим методом.

Динамические испытания на ударный изгиб проводили в широком интервале температур на образцах размерами 10×5×55 мм с V-образным надрезом. Характер изломов изучался на сканирующем электронном микроскопе. По полученным данным строили сериальные кривые ударной вязкости и температурную зависимость доли вязкой составляющей в изломе.

Исследованная труба имела типичную для нормализованного состояния структуру, состоящую из ферритных зерен размерами 5–20 мкм и участков пластинчатого перлита размерами 3–12 мкм, занимающих около 10 % поверхности шлифа. Электронномикроскопическое исследование показало, что для зерен феррита характерна невысокая плотность хаотически распределенных дислокаций. В разных ферритных зернах плотность дислокаций может быть весьма различной. В объеме ферритных зерен и на их границах встречаются карбидные частицы округлой формы размерами 0,1–0,01 мкм. Средняя толщина пластин цементита в перлитных участках равна 0,05 мкм, а межпластинчатое расстояние составляет 0,13 мкм. Плотность дислокаций в ферритных пластинах перлита примерно такая же, что и в ферритных зернах.

Выдержка под нагрузкой в течение до 10 лет не привела к существенному изменению характера дислокационной структуры феррита. Не выявлено появления на дислокациях каких либо выделений. Прежними остались участки пластинчатого перлита, размеры цементитных пластин и межпластинчатое расстояние в перлите.

В то же время выдержка под нагрузкой заметно повлияла на амплитудную зависимость внутреннего трения. Из рис. 1 видно, что с увеличением длительности выдержки до 5 лет происходит постепенное уменьшение $\text{tg}\alpha$, что свидетельствует о снижении подвижности дислокаций. Такой эффект в малоуглеродистых сталях связывают с развитием ранних стадий деформационного старения [1], когда происходит закрепление дислокаций примесными атомами (C+N) с образованием на них атмосфер Коттрелла [2]. Увеличение выдержки с 5 до 10 лет практически не оказывает влияния на величину $\text{tg}\alpha$.

Фон внутреннего трения δ зависит от длительности нахождения под нагрузкой сложным образом: при выдержке 1–2 года он незначительно подрастает, а затем уменьшается до уровня, соответствующего исходному состоянию (см. рис. 1).

Увеличение фона внутреннего трения может быть вызвано повышением плотности дефектов кристаллического строения. В процессе же деформационного старения эта характеристика, как правило, снижается, так как уменьшается дислокационное рассеяние энергии в связи с закреплением дислокаций примесными атомами [2].

Для коэрцитивной силы с увеличением длительности нахождения под нагрузкой характерна тенденция к её снижению. При развитии деформационного старения уменьшение коэрцитивной силы может быть обусловлено некоторой релаксацией упругих напряжений при образовании примесных атмосфер на дислокациях [3].

Для нормализованной стали 09Г2С при комнатной температуре испытания характерна высокая ударная вязкость. Фрактографические исследования показали, что изломы испытанных образцов имеют ямочное дуплексное строение, характерное для вязкого транскристаллитного разрушения. Сравнительно небольшую долю поверхности излома занимают крупные ямки размером более 5 мкм, в которых встречаются крупные частицы, каковыми могут являться неметаллические частицы и карбиды, нерастворившиеся при нагреве во время проведения термической обработки. Основная часть поверхности излома покрыта ямками с

размерами менее 5 мкм, в которых также иногда можно наблюдать присутствие частиц. Эти данные позволяют считать, что вязкое разрушение контролируется процессом зарождения и коалесценции микропор [4]. Снижение температуры испытаний приводит к значительному снижению ударной вязкости нормализованной стали (рис. 2). При этом в изломах появляется хрупкая составляющая – фасетки квазискола, размеры которых сопоставимы с размерами ферритных зёрен.

Выдержка под нагрузкой не оказала отрицательного влияния на ударную вязкость, определяемую при комнатной температуре. В то же время после 5–10-летней выдержки под нагрузкой наблюдается заметное смещение сериальной кривой ударной вязкости в сторону более высоких температур, характерное для деформационного старения малоуглеродистых сталей. Постоянная нагрузка не оказала влияния на характер разрушения стали: при комнатной температуре он оставался вязким транскристаллитным, а при понижении температуры испытания этот вид разрушения заменялся транскристаллитным хрупким разрушением, осуществляемым квазисколом. Если оценивать температуру вязкохрупкого перехода как температуру, соответствующую наличию в изломе 50 % вязкой составляющей, то в результате нахо-

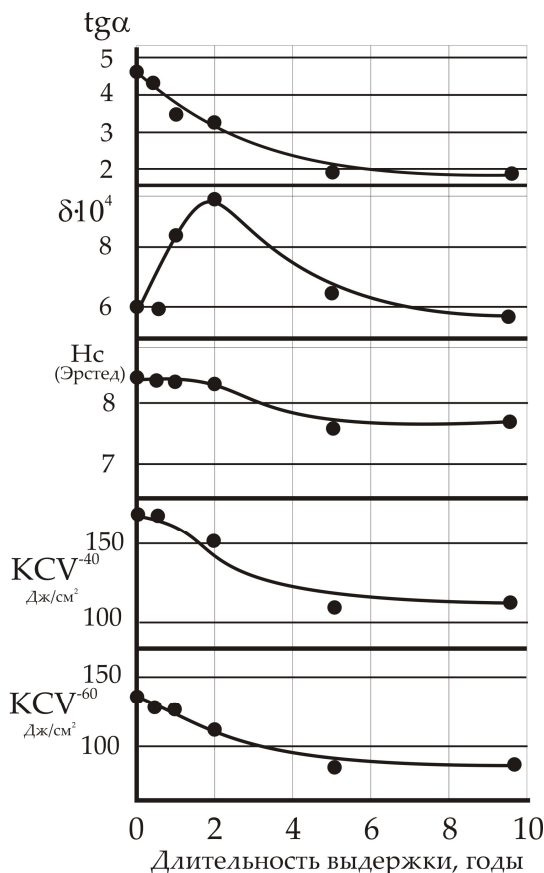


Рис. 1. Зависимость характеристик внутреннего трения δ и $tg\alpha$, коэрцитивной силы H_c и ударной вязкости при -40 и -60 °С от длительности выдержки под нагрузкой

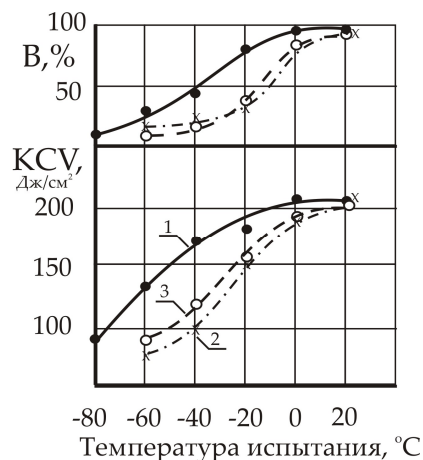


Рис. 2. Зависимость ударной вязкости KCV и доли вязкой составляющей B в изломе стали 09Г2С от температуры испытания: 1 – исходное состояние; 2 – выдержка под нагрузкой 5 лет; 3 – то же 10 лет

ждения под нагрузкой в течение 5 лет она повысилась на 20–30 °С, и при дальнейшем увеличении длительности выдержки не изменялась.

Важно отметить, что повышение температуры вязкохрупкого перехода под действием постоянной нагрузки приводит к значительному снижению ударной вязкости при отрицательных температурах испытания. Так после 5–10-летней выдержки под нагрузкой KCV при –40 °С уменьшилась на 30–40 %, а доля вязкой составляющей в изломе – более чем в 2 раза. Обращает на себя внимание, что зависимости ударной вязкости при отрицательных температурах и $\text{tg}\alpha$ от длительности выдержки под нагрузкой принципиально совпадают.

В работе [1] в трубах из малоуглеродистых сталей, прошедших длительную эксплуатацию, наблюдали заметное изменение структуры, в частности трансформацию пластинчатого перлита в зернистый. Из полученных данных следует, что при постоянно действующей нагрузке в отсутствие малоцикловых воздействий существенных изменений микроструктуры нормализованной стали 09Г2С по крайней мере за 10 лет не происходило. В то же время при выдержке под нагрузкой в этой стали протекают процессы, обуславливающие деформационное старение, причем наибольшее развитие они получают в первые пять лет.

Как известно, в малоуглеродистых сталях деформационное старение происходит в тех случаях, когда пластической деформацией вводится определенное количество «свежих» дислокаций, а в твердом растворе содержится повышенная концентрация атомов углерода и азота, которые могут эффективно взаимодействовать с этими дислокациями [3]. На ранних стадиях старения закрепление дислокаций обусловлено образованием атмосферы Коттрелла, а на еще более ранних – в результате выделения высокодисперсных карбидов (карбонитридов). При низких температурах старения (до 200 °С) в малоуглеродистых сталях наблюдали образование на дислокациях метастабильного ϵ -карбида игольчатого типа [5].

Можно предположить, что во время выдержки под нагрузкой в локальных объемах феррита путем пластической деформации происходит релаксация микронапряжений и образование некоторого количества «свежих» дислокаций, которые и взаимодействуют с примесными атомами. Судя по характеру изменения амплитуднозависимого внутреннего трения и отсутствию на дислокациях карбидных выделений, развитие деформационного старения в нормализованной стали 09Г2С ограничивается начальными стадиями, когда на дислока-

циях примесные атомы образуют атмосферы Коттрелла.

Наблюдаемое развитие деформационного старения не приводит к существенному изменению ударной вязкости, определяемой при комнатной температуре. В то же время деформационное старение сопровождается заметным смещением температуры вязкохрупкого перехода в сторону более высоких температур. В результате этого при отрицательных температурах испытания (–40...–60 °С) имеет место значительное охрупчивание, которое проявляется в значительном снижении ударной вязкости и уменьшении доли вязкой составляющей в изломе. Отметим, что отсутствие на начальных стадиях деформационного старения заметного изменения ударной вязкости в «вязкой» области (выше температуры вязкохрупкого перехода) при одновременном значительном смещении нижней части сериальной кривой KCU наблюдали в работе [2].

Выводы

1. В нормализованной стали 09Г2С при нагрузке до 0,75 предела текучести при комнатной температуре в течение до 10 лет не происходит каких-либо существенных изменений в структуре феррита, а также морфологии и дисперсности карбидной фазы.

2. Выдержка под постоянной нагрузкой сопровождается деформационным старением стали 09Г2С. Наиболее заметное развитие деформационное старение получает в первые 5 лет, причем оно ограничивается стадией закрепления дислокации примесными атомами.

3. При деформационном старении наблюдается смещение температуры вязкохрупкого перехода в сторону более высоких температур.

Литература

1. Ямалеев, К.М. Старение металла труб в процессе эксплуатации трубопроводов / К.М. Ямалеев. – М.: ВНИИОЭНГ, 1990. – (обзор информ. Сер. «Транспорт и хранение нефти»). – 64 с.
2. Бабич, В.К. Деформационное старение стали / В.К. Бабич, Ю.П. Гуль, И.Е. Долженков. – М.: Металлургия, 1972. – 320 с.
3. Металловедение и термическая обработка стали: справ. / под ред. М.Л. Бернштейна и А.Г. Рахштадта. – М.: Металлургия, 1983. – Т. 2. – 320 с.
4. Schwalbe, K.H. Einfluss der Gefügestruktur auf das Bruchverhalten metallischer Werkstoffe aus der Sicht der Bruchmechanik / K.H. Schwalbe // Gefüge und Bruch. Berlin – Stuttgart, 1977. – S. 38–43.
5. Келли, А. Дисперсионное твердение / А. Келли, Р. Николсон. – М.: Металлургия, 1965. – 230 с.

Ильин Сергей Иванович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физического металловедения и физики твердого тела, Южно-Уральский государственный университет. 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76. Тел.: (351)2679013. E-mail: main@physmet.susu.ac.ru.

Смирнов Михаил Анатольевич, доктор технических наук, профессор кафедры физического металловедения и физики твердого тела, Южно-Уральский государственный университет. 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76. Тел.: (351)2679960. E-mail: main@physmet.susu.ac.ru

Пашков Юрий Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры оборудования и технологии сварочного производства, Южно-Уральский государственный университет. 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76. Тел.: (351)2679960.

**Bulletin of the South Ural State University
Series "Metallurgy"
2013, vol. 13, no. 1, pp. 134–137**

PROPERTIES OF PIPELINE STEEL SUBJECTED TO LONG-TERM HOLDING UNDER CONSTANT LOAD

S.I. Il'in, M.A. Smirnov, Yu.I. Pashkov

Changes of structure and properties of the normalized pipeline steel 09G2S are studied after constant loading at 0.75 of the yield stress for up to 10 years. It is found that in the first five years of loading the strain aging develops in the steel causing significant changes of physical properties and increase of ductile-brittle transition temperature. On further loading the processes of strain aging are stabilized and their rate decreases, as can be seen from the measurement of physical properties and the character of substructure.

Keywords: pipeline steel, strain aging, internal friction.

Il'in Sergey Ivanovich, candidate of physical and mathematical science, associate professor of the Physical Metallurgy and Solid State Physics Department, South Ural State University. 76 Lenin avenue, Chelyabinsk, Russia 454080. Tel.: 7(351) 2679013. E-mail: main@physmet.susu.ac.ru.

Smirnov Mikhail Anatol'evich, doctor of engineering science, professor of the Physical Metallurgy and Solid State Physics Department, South Ural State University. 76 Lenin avenue, Chelyabinsk, Russia 454080. Tel.: 7(351)2679013. E-mail: main@physmet.susu.ac.ru.

Pashkov Yuriy Ivanovich, doctor of engineering science, professor of the Welding Equipment and Technology Department, South Ural State University. 76 Lenin avenue, Chelyabinsk, Russia 454080. Tel.: 7(351)2679960.

Поступила в редакцию 11 марта 2013 г.