

МЕХАНИЗМ АНОМАЛЬНОЙ СКЛОННОСТИ К ДЕФОРМАЦИОННОМУ СТАРЕНИЮ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ С БЕЙНИТНОЙ СТРУКТУРОЙ

Мишетьян А.Р., Шабалов И.П., Филиппов Г.А., Чевская О.Н.
ФГУП ЦНИИчермет им. И.П. Бардина, Москва, Россия,
mishetyan@bk.ru

На территории России действует развитая сеть газо- и нефтепроводов, снабжающих углеводородами различные регионы страны. Для обеспечения надежности и безопасности эксплуатации такой сложной конструкции, как магистральный трубопровод, к сталям для труб предъявляется целый комплекс требований, регламентирующих уровень стандартных механических характеристик, ударной вязкости, хладостойкости, трещиностойкости, способности к деформационному упрочнению, свариваемости, коррозионной стойкости и др.. Поскольку трубопроводы прокладываются в том числе в регионах с различными природными условиями (суровые климатические температуры, подвижные грунты и т.д.), требуется применение материала для труб с определенным структурным состоянием, с помощью которого можно достичь необходимое сочетание свойств.

При производстве листового проката для труб используются высокопрочные низколегированные стали, удовлетворяющие всему комплексу предъявляемых требований. Однако в условиях длительной работы возможно проявление деградации свойств металла труб и связанное с ней снижение надежности трубопровода, что в дальнейшем может негативно сказаться на безопасности его эксплуатации вплоть до возникновения угрозы разрушения трубопровода [1].

Одним из многочисленных факторов проявления деградации металла труб является возникновение локальных микронапряжений, протекание в металле деформационного старения, следствиями которых являются эффекты упрочнения и охрупчивания.

В сталях, подвергавшихся воздействию пластической деформации и последующей выдержке в течение определенного времени или нагреву, возможно самопроизвольное протекание процесса деформационного старения, приводящего к необратимому изменению свойств [2–7].

В данной работе изучен характер изменения комплекса свойств листового проката из низкоуглеродистой низколегированной трубной стали класса прочности K65 (X80), произведенного по технологии контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением, после обработки, имитирующей деформационное старение.

Исследуемая сталь принадлежит системе легирования C-Mn-Si. В качестве микролегирующих карбонитридообразующих элементов присутствуют Nb в количестве 0,061 % и Ti \approx 0,02 %. При производстве стали использована современная технология выплавки, предусматривающая раскисление алюминием (содержание Al составляет 0,04 %). Дополнительно металл содержит Ni (0,37 %), Cu (0,22 %) и Mo (0,26 %) (таблица 1).

Таблица 1 - Химический состав исследуемой трубной стали

Класс прочности	Массовая доля элементов, %				
	C	Si	Mn	Микролегирование	Другие элементы
K65	0,06	0,22	1,75	Nb-Ti	Cu-Ni-Mo

В результате исследования механических свойств исследуемого материала в состоянии поставки и после деформационного старения отмечается резкий рост предела текучести (на 13,6 %), увеличивается значение параметра $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ (на 11,6 %), падает пластичность металла (на 24 %). Предел прочности при этом меняется незначительно (увеличивается на 1,4 %).

Уровень ударной вязкости стали после деформационного старения снижается, при этом остается достаточно высоким. Наиболее ярко выраженный эффект деформационного старения, явившийся причиной такого снижения, наблюдается в области низких температур, где разница между значениями ударной вязкости в исходном и состаренном состояниях при температуре испытаний -100°C составляет 75 %. Падение значений работы зарождения трещины в наибольшей степени наблюдается при температурах ниже -80°C , и при температуре -100°C значение этого параметра стремится к нулю.

При исследовании трещиностойкости стали по результатам статических испытаний на изгиб выявлено, что результате деформационного старения наблюдается прирост предела общей текучести, отмечено снижение прочности и пластичности как при испытаниях образцов с надрезом, так и с заранее нанесенной трещиной.

Также зафиксировано уменьшение общей работы разрушения после деформационного старения. При этом уменьшение доли работы зарождения в результате деформационного старения составляет 50 %, а работы распространения - 25 %. Величина критического раскрытия трещины (СОД) также уменьшается в ходе деформационного старения на 66 %.

Под воздействием деформационного старения происходит снижение разрушающего напряжения при одновременном увеличении предела текучести, что уменьшает способность к деформированию. Таким образом, возрастает отношение $\sigma_{0,2}/\sigma_b$ (стремится к 1), т.е. сокращается стадия деформационного упрочнения металла, что фактически приводит к снижению надежности материала.

В процессе деформационного старения происходит увеличение релаксационного эффекта, свидетельствующее о повышенном уровне локальных напряжений, возникающих при нагружении и деформации вследствие закрепления дислокаций атомами внедрения, концентрация которых возрастает в процессе предварительной деформации, о чем свидетельствует рост пика Снука при измерении внутреннего трения.

Комплексное исследование структурного состояния различными методами позволяет сформулировать особенности механизма деформационного старения, характерные для стали со структурой типа низкоуглеродистый бейнит (бейнитный феррит).

В листовом прокате в состоянии поставки методом рентгеновской дифрактометрии выявлен аустенит в количестве 6%, количество которого при увеличении степени деформации уменьшается, и при деформации 3 % происходит его полное исчезновение.

При исследовании структуры методами просвечивающей электронной микроскопии и оптической микроскопии с помощью специального травления обнаружено, что в результате деформационного старения в стали К65 островки фазы М/А (мартенсит/аустенит), отчетливо наблюдаемые в исходном состоянии, исчезают.

Как известно, вкрапления островков М/А фазы в структуре стали определенного размера и в небольших количествах (2-5 %) способствуют сохранению деформационной способности за счет разницы в прочности мелкодисперсных участков М/А фазы и основной структуры и являются фактором упрочнения матрицы.

Таким образом, опираясь на данные рентгеноструктурного и электронно-микроскопического анализов, можно заключить, что в ходе деформации стали К65 реализуется процесс превращения остаточного аустенита в мартенсит деформации (локальный TRIP-эффект). С увеличением степени деформации происходит

превращение оставшихся участков остаточного аустенита, в том числе содержащегося в островках М/А- фазы, до полного его исчезновения при степени деформации 3 %.

Дальнейший нагрев при температуре 200°С приводит к распаду мартенситной составляющей с выделением карбидов, что снижает сопротивление металла пластической деформации.

Полное исчезновение участков остаточного аустенита в структуре исследованной бейнитной стали, наблюдаемое при степени деформации 3%, приводит к снижению сопротивления пластической деформации с одновременным снижением прочности материала за счет исчезновения М/А фазы.

Изменение свойств в процессе деформационного старения бейнитной стали является следствием двух процессов, одновременно протекающих в структуре на различных масштабных уровнях и имеющих противоположное влияние на сопротивление деформации. Повышение предела текучести в результате упрочнения происходит вследствие закрепления дислокаций атомами внедрения; разупрочнение вызвано исчезновением островков М/А - фазы, упрочняющей металл в исходном состоянии, в результате TRIP - эффекта при предварительной деформации и распада мартенсита при последующем нагреве [8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шабалов И.П., Морозов Ю.Д., Эфрон Л.И. Стали для труб и строительных конструкций с повышенными эксплуатационными свойствами. – М., Metallurgizdat, 2003.- 520 с;
2. Филиппов Г.А., Морозов Ю.Д., Шлямнев А.П., Эфрон Л.И. Конструкционные материалы будущего // Сталь. 2004. № 8. С. 69–78;
3. Филиппов Г.А., Ливанова О.В. Взаимодействие дефектов структуры и деградация свойств конструкционных материалов // Материаловедение. 2002. № 10. С. 17–21;
4. Саррак В.И., Филиппов Г.А. Влияние примесей на хрупкость стали после закалки // ФХММ. 1981. № 2. С. 96–101;
5. Чувильдеев В.Н. //Влияние старения на эксплуатационные свойства сталей магистральных газопроводов. // – Сборник трудов научно-практического семинара «Проблемы старения сталей магистральных трубопроводов» / Под общ. ред. Будзуляка Б.В., Седых А.Д.; Науч. Ред. Чувильдеев В.Н.. - Нижний Новгород: Университетская книга, 2006. – с.18-58.;
6. Бабич В.К., Гуль Ю.П., Долженков И.Е. Деформационное старение стали. – М., Metallurgiya, 1972.- 320 с;
7. Yoo J.Y., Chon S.H., Seo D.H. Microstructure and mechanical properties of X80 linepipe steel with high strain aging resistance // Pipeline technology conference, Ostend, 12-14 Oct. 2009. Paper no: Ostend2009-020.
8. Шабалов И.П., Мишетьян А.Р., Филиппов Г.А. Хладостойкость и склонность к деформационному старению сталей для газопроводных труб в зависимости от структурного состояния // – Перспективные материалы и технологии / Под редакцией В.В.Клубовича. В 2 т. / Витебск: Изд-во УО «ВГТУ», 2017. -Т.1. – с. 430.