

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ДЕФОРМАЦИОННОГО СТАРЕНИЯ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ С ФЕРРИТО-БЕЙНИТНОЙ СТРУКТУРОЙ

Мишетьян А.Р., Морозов Ю.Д., Филиппов Г.А., Чевская О.Н.

ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», Москва, Россия,  
mishetvan@bk.ru

Магистральные газо-нефтепроводы относятся к объектам повышенного экологического риска возникновения техногенных аварий, вызванных недостаточной эксплуатационной надежностью металла. Длительная эксплуатация приводит к деградации свойств металла, связанной с изменением структурного состояния вследствие воздействия внешних и внутренних напряжений, старения металла.

Деформационное старение – необратимое изменение свойств, происходящее во времени в сталях, подвергавшихся пластической деформации. В результате деформационного старения растут предел текучести, предел прочности и твердость, повышается температура порога хладноломкости. Явление деформационного старения железа связано с присутствием атомов углерода и азота в твердом растворе. Современные трубные стали, как правило, низкоуглеродистые с содержанием углерода и азота менее 0,10%. Такие стали должны обладать меньшей склонностью к старению, чем стали с большим содержанием углерода и азота. Однако по структурному состоянию современные трубные стали могут существенно отличаться от традиционных ферритно-перлитных сталей, что также может сказываться на склонности к старению. Поэтому представляет интерес исследование явления деформационного старения высокопрочных трубных сталей с феррито-бейнитной структурой.

В качестве материала исследования был выбран металл двух труб диаметром 1420 мм из листов толщиной 27,7 и 32 мм, прокатанных по различным режимам: контролируемой прокатке с последующим интенсивным ускоренным охлаждением и с медленным охлаждением на воздухе.

Анализ данных химического состава показал, что образцы металла трубы №1 и №2 имеют близкое содержание основных легирующих элементов. По химическому составу стали представляют собой стали типа 07Г2Б (таблица 1).

Таблица 1. Химический состав исследованных сталей

№ п/п	Массовая доля элементов, %												
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	N	Nb	Ti	Al
1	0,070	0,39	1,83	0,012	≤0,001	0,19	0,05	0,22	0,16	0,005	0,047	0,014	0,033
2	0,087	0,467	1,63	0,012	0,0008	0,04	0,01	0,22	0,16	0,003	0,049	0,022	0,032

На рис. 1 представлены результаты металлографического анализа исследуемого металла.

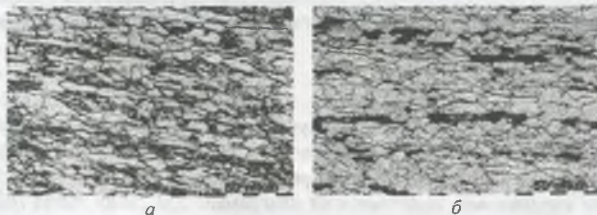


Рис. 1. Микроструктура образцов трубной стали, х400. а – образец №1; б – образец №2

Микроструктура образца из листа №1 имеет феррито-бейнитную полосчатую структуру, соотношение фаз феррита и бейнита составляет 40% и 60% соответственно, зерна феррита деформированы в направлении прокатки. Образец №2 имеет феррито-перлитную полосчатую структуру. Доля перлита невелика и составляет 12–15%. Предположительно, в полосах перлита содержатся отдельные бейнитные участки. Ферритные зерна мелкие (№10) деформированные, вытянутые в направлении прокатки.

Для сравнения результатов исследования склонности к деформационному старению предварительно образцы испытывали на растяжение. Стандартные механические свойства исследуемого металла представлены в таблице 2.

Таблица 2. Механические свойства исследуемых трубных сталей

№ п/п	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{пц}$ МПа	$\sigma_{тн}$ МПа	$\sigma_{тн}$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\Psi$ , %
1	703-721	500-535			16.0-18.7	71-73
	712	517			17,3	72
2	637-637	581-591	581-591	550-558	21.9-22.4	81-82
	637	586	586	554	22,1	82

В исходном состоянии при деформации металла листа №2 наблюдается зуб текучести, величина которого составляет 32 МПа. Для листа №1 на диаграмме растяжения физический предел текучести отсутствует. Возможно, наличие зуба и площадки текучести для металла листа №2 обусловлено большей долей ферритной составляющей в структуре этих сталей.

Склонность к деформационному старению оценивали по приросту предела текучести после старения. Испытания на склонность к деформационному старению проводили на образцах диаметром 3 мм с рабочей длиной 25 мм. Образцы деформировали на 2% за площадкой текучести, разгружали, подвергали старению при 200°C, 1 час и повторно испытывали на растяжение (рис. 2).

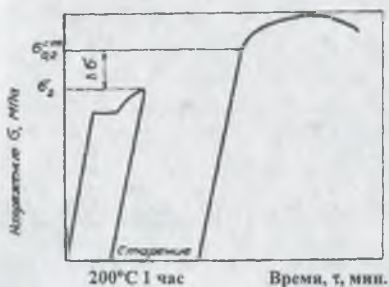


Рис. 2. Схема испытаний на склонность стали к деформационному старению

Склонность стали к деформационному старению определяли по величине  $\Delta\sigma$ :

$$\Delta\sigma = \sigma_{0.2}^{cm} - \sigma_2$$

где  $\sigma_{0.2}^{cm}$  — предел текучести образца после старения;  $\sigma_2$  — напряжение, соответствующее деформации на 2% за площадкой текучести.

Из таблицы 3 видно, что наименьшая величина прироста предела текучести, как нижнего, так и верхнего наблюдается для металла листа №2 (36 и 48 МПа). Наиболее высокая склонность к деформационному старению наблюдается для металла листа №1 (150 и 173 МПа).

Для металла листа №1 после старения на диаграмме растяжения наблюдается резкий зуб текучести, и практически отсутствует стадия упрочнения: старение этих сталей приводит к предельному упрочнению, следом за которым наступает стадия самопроизвольного течения металла с последующим разупрочнением (образованием шейки). Такой вид диаграмм кардинально отличается от диаграммы для стали листа №2, для которой наблюдается небольшой зуб текучести и практически полностью отсутствует площадка текучести.

Таблица 3. Параметры склонности к деформационному старению трубных сталей

№ п/п	$\Delta\sigma_{\text{тв}}^{\text{ст}}$ , МПа	$\Delta\sigma_{\text{тн}}^{\text{ст}}$ , МПа	$\Delta\sigma_{\text{эл}}^{\text{ст}}$ , МПа	$\dot{\epsilon}_{\text{ст}}^{\text{ст}}$ , %
1	173	150	23	$\frac{2,9-3,1}{3,0}$
2	48	36	12	$\frac{0,2-0,2}{0,2}$

Таким образом, увеличение степени закрепления дислокаций при старении приводит к повышению сопротивления деформации при последующем испытании, что является следствием затрудненного отрыва дислокаций от блокирующих их атмосфер атомов внедрения.

Механические свойства трубных сталей после деформационного старения представлены в таблице 4. Наиболее высокое значение относительного удлинения наблюдается для металла листа №2 (18%), для металла листа №1 относительное удлинение существенно ниже (14,3%).

Таблица 4. Механические свойства трубных сталей после деформационного старения

№ п/п	$\sigma_{\text{в}}^{\text{ст}}$ , МПа	$\sigma_{\text{тл}}^{\text{ст}}$ , МПа	$\sigma_{\text{тв}}^{\text{ст}}$ , МПа	$\sigma_{\text{тн}}^{\text{ст}}$ , МПа	$\delta^{\text{ст}}$ , %	$\psi^{\text{ст}}$ , %
1	$\frac{751-754}{753}$	$\frac{736-754}{745}$	754	731	$\frac{14,2-14,3}{14,3}$	$\frac{73,5-75,0}{74,2}$
2	$\frac{633-634}{634}$	$\frac{571-587}{579}$	$\frac{589-603}{596}$	$\frac{576-593}{584}$	$\frac{17,4-18,6}{18,0}$	$\frac{78,4-80,6}{79,5}$

Более высокая склонность к деформационному старению для металла листа №1 приводит к большей потере пластичности, чем для стали с меньшей склонностью к деформационному старению.

### Заключение

Явление деформационного старения ухудшает пластичность низколегированных феррито-перлитных и феррито-бейнитных сталей.

Наиболее низкая склонность к деформационному старению стали с полосчатой феррито-перлитной структурой, по-видимому, связана с низким содержанием углерода в твердом растворе, который практически весь находится в перлитной составляющей. Более высокая склонность к деформационному старению стали феррито-бейнитного класса обусловлена более высоким содержанием углерода в твердом растворе. Также при ускоренном охлаждении в прокате формируется дисперсная микроструктура, состоящая из мелкозернистого, полиздрического феррита и бейнита с повышенной плотностью дислокаций. Этому способствует более высокая скорость охлаждения проката данной стали при его производстве.