

АНАЛИЗ ТЕПЛОУСТОЙЧИВЫХ СТАЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

А.А. Меденков, В.А. Петрова

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Процессы ползучести, карбидный распад твёрдого раствора, изменяя тонкое строение стали, влияют на морфологию структурных составляющих перлитных сталей. Это позволяет с помощью металлографического исследования оценивать степень изменений, происходящих в металле при ползучести. Основные структурные составляющие перлитных сталей - это феррит, перлит, сорбит отпуска, являющийся продуктом отпуска бейнита. Стабильность перечисленных структурных составляющих различна и зависит от температурно-силовых условий эксплуатации. В равных температурно-силовых условиях термическая стабильность зёрен с продуктами распада аустенита изменяется в следующем порядке в сторону возрастания стабильности, перлит переотпуска, перлит нормализации, равноосный фрагментированный сорбит отпуска, игольчатый сорбит отпуска. Минимальной термической стабильностью обладает перлит, образовавшийся в стали при переотпуске.

Рассмотрим изменения, протекающие в перечисленных структурных составляющих в процессе эксплуатации.

В исходном состоянии после термической обработки зёрна структурно-свободного феррита неоднородны по содержанию углерода и количеству карбидных частиц, дальнейшее выделение карбидов в процессе ползучести также идёт неравномерно. В областях с повышенной плотностью карбидов в силу их тормозящего действия наблюдается повышенная плотность дислокации, что способствует более интенсивному выделению карбидов. В результате исходная неравномерность в плотности распределения карбидных частиц сохраняется. Это можно выявить по травимости ферритных зёрен: феррит, образовавшийся при более высоких температурах, остаётся более светлым и после длительной эксплуатации, чем феррит, образовавшийся при более низких температурах.

На второй стадии ползучести в ферритных зёрнах начинается процесс образования субграниц, декорированных дисперсными карбидами, который продолжается на третьей стадии. Выделение дисперсных карбидов и формирование субграниц вызывает повышение твёрдости феррита. По мере развития

ползучести в феррите происходит рост карбидных частиц, на границах зёрен образуются скопления крупных карбидов, вокруг которых появляются зоны, свободные от дисперсных карбидных частиц. В теле ферритных зёрен формируются зародыши рекристаллизации.

Таким образом, в феррите при ползучести протекают как упрочняющие, так и разупрочняющие процессы. О том, какой из них превалирует, можно судить по значениям микротвёрдости феррита. Изменение микротвёрдости от температуры и времени эксплуатации хорошо описывается параметрической зависимостью Ларсена-Мюллера. Сначала микротвёрдость феррита несколько возрастает, затем по мере интенсификации разупрочняющих процессов происходит снижение микротвёрдости. Кроме того, развитие процессов рекристаллизации приводит к миграции границ и, как следствие, к росту зерна феррита.

В исходном состоянии в структуре теплоустойчивых сталей можно наблюдать два типа перлита: перлит, образовавшийся из равновесного аустенита, полученного при нагреве под нормализацию, и перлит, образовавшийся из неравновесного аустенита, появившегося при перегреве во время отпуска в область температур, несколько превышающих A_1 (перлит переотпуска). В стали 12Х1МФ перлит, образовавшийся при нормализации, имеет тонкопластинчатое строение. Вторичный перлит, образовавшийся при отпуске, выделяется по границам исходных зёрен и имеет грубо пластинчатое строение. Длительная работа в условиях ползучести приводит к существенным изменениям в перлите. Пластинчатая форма цементита в перлите является термодинамически нестабильной, что обуславливает сфероидизацию цементитных пластин. Процесс сфероидизации начинается с образования в пластинах цементита. Скорость сфероидизации контролируется скоростью объёмной диффузии углерода в феррите и, следовательно, зависит от легирования стали. В качестве оценочного критерия степени сфероидизации перлита взято отношение длины цементитных пластин к их ширине.

Зёрна сорбита отпуска стали 12Х1МФ представляют собой смесь продуктов распада

ПОЛЗУНОВСКИЙ АЛЬМАНАХ №3 2008

аустенита в различных температурных интервалах (от нижней части области перлитного превращения до нижней части бейнитной области). Чем выше температура распада аустенита, тем меньше стабильность образовавшейся структуры в условиях ползучести.

В металле с ферритно-сорбитной структурой сорбит отпуска является, в основном, продуктом отпуска верхнего бейнита и представляет собой фрагментированную ферритную матрицу с высокой плотностью дислокаций и карбидами. Длительная работа в условиях высоких температур приводит к развитию процессов возврата и рекристаллизации. При этом за счёт миграции субграниц и рекристаллизации происходит уменьшение протяжённости субграниц, выявляемых металлографически, до полного их исчезновения с образованием так называемого сорбита отпуска. На поздних этапах развития рекристаллизационных процессов структура сорбита отпуска трансформируется в ферритную структуру с большим числом карбидов. Процесс трансформации сорбитных зёрен обычно наблюдается в пароперегревательных трубах в тех случаях, когда температура эксплуатации труб превышает расчётную и при отработке ресурса. Процесс трансформации сорбитных зёрен качественно описывается следующей схемой: фрагментированный сорбит отпуск — бесструктурный сорбит отпуск — феррит и карбиды.

Существует определённая связь степени трансформации зёрен сорбита отпуска с температурно-временными условиями работы. Развитие процессов рекристаллизации снижает микротвёрдость сорбита отпуска. Степень разупрочнения сорбита отпуска можно оценить при сравнении твёрдости зёрен феррита и сорбита отпуска. В стали 12Х1МФ изменение разности их микротвёрдости в сторону уменьшения описывается параметрической зависимостью.

Рассмотренные изменения в фазовом составе и структуре сталей при ползучести многогранны и приводят как к разупрочнению, так и упрочнению металла. Кратковременные механические свойства являются интегральными характеристиками сопротивления металла приложенным непрерывно возрастающим нагрузкам, поэтому по механическим свойствам можно судить о суммарном влиянии процессов ползучести на прочность и пластичность стали. Закономерности изменения механических свойств металла при ползучести в основном изучались на паропроводных трубах.

Современные критерии надёжности определённым образом связаны с оценкой времени работы изделия до отказа. Именно в этом проявляется эффективность системы диагностики.

На входном контроле проводились следующие исследования: механические испытания на разрыв, на холодный изгиб, на твёрдость и на сплющивание труб (табл. 1); также были проведены металлографические исследования микро- и макроструктуры.

Микроструктура в момент поставки представляет собой феррит и участки перлита с величиной зерна 7-8 баллов по шкале ГОСТ 5639-51.

Загрязнение металла неметаллическими включениями типа оксидов и сульфидов не превышает 2 баллов по шкале ГОСТ 1778-42.

Вторичное исследование проводилось после 300000 часов эксплуатации. На этом этапе проводился химический анализ основного металла, измерена его твёрдость (табл. 1) и проведены металлографические исследования.

Исследования проводились с двух сторон от сварного соединения для получения более полной информации о предмете исследований.

Таблица 1 - Твёрдость основного металла

№ трубы	НВ
1	143
2	143

Макроструктура, выявленная в результате контроля, является удовлетворительной, каких-либо дефектов не выявлено. Микроструктура сварных труб представляет собой перлит и феррит с величиной зерна 9-10 баллов по шкале ГОСТ 5639-82; также наблюдается полосчатая структура до 4 баллов ряда Б по шкале ГОСТ 5640-68.

В результате проведенных исследований было выявлено, что структура паропроводов и их механические характеристики находятся в удовлетворительном состоянии согласно требованиям РТМ-1С.

Но, несмотря на то, что труба после такого продолжительного срока эксплуатации находится согласно результатам проведенных исследований в удовлетворительном состоянии, необходимо учесть следующее: некоторые требования, заложенные в нормативных документах на механические кратковременные характеристики, не отражают действительные критические показатели, а, следовательно, при ориентировании на эти требования результат диагностики окажется неточным.

Рассмотрен температурный режим эксплуатации паропровода в течение суток. За 24 часа по диаграмме наблюдается в среднем пять скачков температуры с амплитудой более десяти градусов, то есть происходит пять циклов температурной нагрузки.

На этом рисунке показана зависимость твёрдости стали от количества циклической тепловой нагрузки. Как видно из графика, нет постепенного снижения твёрдости с увеличением числа термических циклов. Наоборот, наблюдаются спады и возрастания твёрдости в течение определённого числа циклов. Это связано с тем, что под влиянием термической нагрузки и внутренних напряжений меняется структурно-фазовый состав в стали. Например, твёрдость повышается при образовании карбидов в процессе эксплуатации.

Рассмотрим изменение твёрдости у труб с различным временем эксплуатации (рис. 2). Измерения проводились от наружной поверхности паропровода к внутренней. В результате обработки опытных данных можно сделать вывод об образовании градиента твёрдости по сечению, т.е. выявляется уменьшение твёрдости при переходе от наружной поверхности к внутренней.

Таким образом, тепловая циклическая нагрузка оказывает значительное влияние на структуру материала и, следовательно, на твёрдость. Влияние этой нагрузки нельзя недооценивать, так как возрастание количества циклов и температурного разбега в процессе эксплуатации паропровода может привести к аварии.

При уменьшении температурного разбега и числа циклов, соответственно, можно

достичь превышения расчётного ресурса, поэтому необходимо внимательно следить за технологическими режимами.

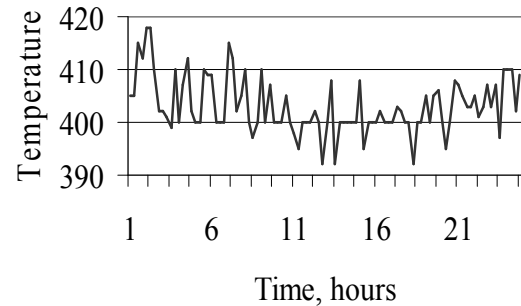


Рисунок 1 – Зависимость температуры от времени

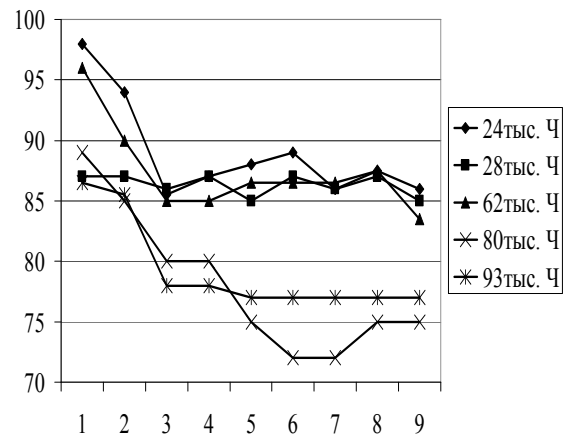


Рисунок 2 – Изменение твёрдости по сечению труб