

©Оболенская Т.А., Евсюкова Л.А., Лазаренко В.И., Серeda Н.В.

## ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА СТАЛЕЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ

### 1. Актуальность проблемы

В связи с тем, что материал трубопроводов, применяемых в теплоэнергетике, работает в условиях высоких температур, которые существенно влияют на показатели прочности и пластичности, физико-механические свойства сталей, из которых они изготавливаются, приобретают главенствующее значение. Следует учитывать, что при высоких температурах и напряжениях в стали многих марок с течением времени происходят изменения структуры, ухудшающие свойства стали.

### 2. Постановка проблемы

Возникла необходимость в изучении физико-механических свойств различных марок сталей в зависимости от эксплуатационных условий.

### 3. Основной материал

В Нормах приняты следующие основные характеристики прочности материала при расчетной температуре  $t$ :

$\sigma_e^t$  – временное сопротивление стали разрыву (предел прочности);

$\sigma_T^t$  – условный (при остаточной деформации 0,2 %) предел текучести стали при растяжении;

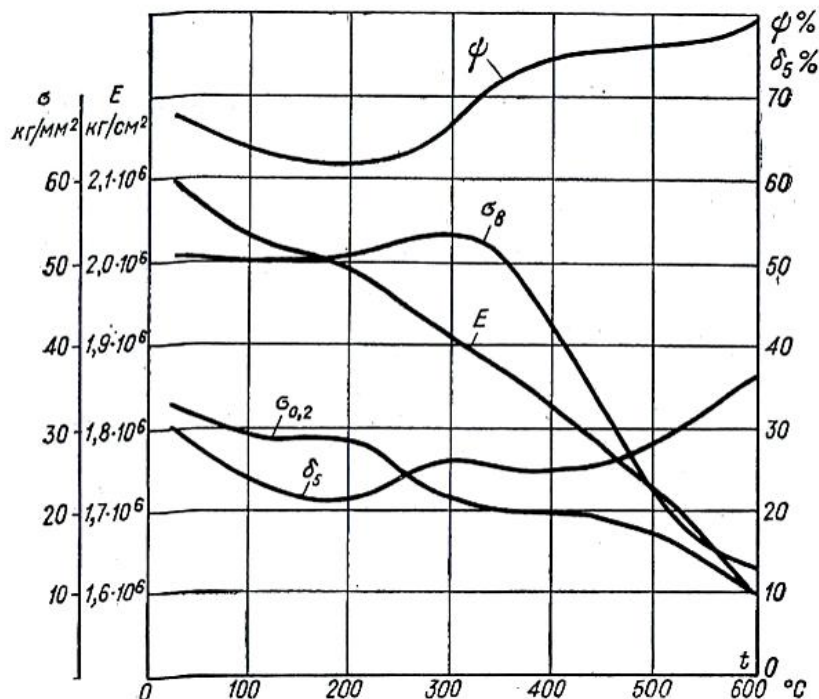
$\sigma_{d.n.}^t$  – условный предел длительной прочности при растяжении (напряжение, вызывающее разрушение через 100000 ч).

В качестве допускаемого напряжения,  $\sigma_{дон}$  при рабочей температуре в Нормах принята наименьшая из трех величин:

$$\sigma_{\text{дон}} \leq \frac{\sigma_s^t}{2,6}; \quad \sigma_{\text{дон}} \leq \frac{\sigma_T^t}{1,5}; \quad \sigma_{\text{дон}} \leq \frac{\sigma_{\text{дн}}^t}{,5}.$$

Методы определения  $\sigma_s$  и  $\sigma_m$ , а также относительного удлинения  $\delta$  и сужения поперечного сечения  $\psi$  достаточно известны и установлены стандартом. Предел текучести стали может быть повышен за счет пластической деформации (холодного наклепа). Однако холодный наклеп ухудшает стойкость по отношению к коррозии, понижает пластические свойства и ударную вязкость. Во избежание этого сталь, получившую холодный наклеп, подвергают термообработке.

Температура существенно влияет на показатели прочности и пластичности, как это видно из рис. 1. При повышении температуры временное сопротивление сначала возрастает, достигая максимума в интервале 250-300 °С, но затем, при дальнейшем повышении температуры, быстро снижается. Показатели пластичности, наоборот, сначала снижаются, достигая при 250-300 °С минимума, а при дальнейшем повышении температуры вновь повышаются.

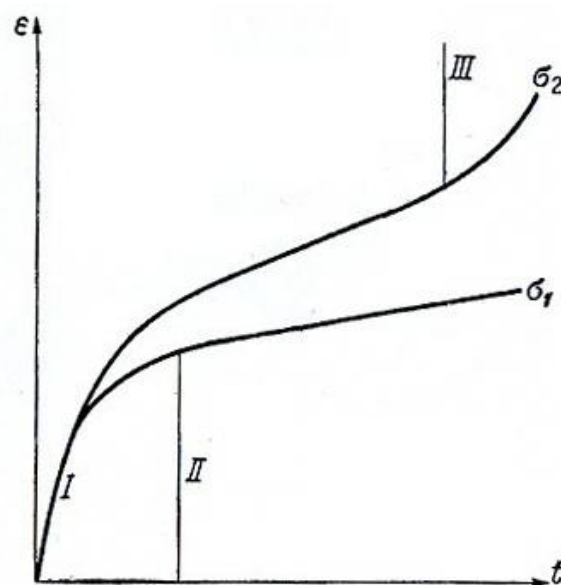


**Рис. 1** – Изменение прочностных характеристик стали 20 в зависимости от температуры

Таким образом, наиболее высоким значениям временного сопротивления отвечает наиболее низкая пластичность углеродистой стали. Пределы текучести и пропорциональности при повышении температуры монотонно снижаются. Площадка текучести у малоуглеродистой стали имеет место при температуре до 250 °С, при более высоких температурах она отсутствует.

При высоких температурах у стали становится заметным свойство ползучести. Процесс ползучести заключается в непрерывном росте деформации под действием нагрузки и температуры

На рис. 2 показаны процессы ползучести на диаграмме деформация-время для различных уровней напряжения.



**Рис. 2** – Деформации ползучести при различных растягивающих напряжениях

Различают три стадии ползучести:

I – неустановившейся ползучести, II – установившейся, III – конечной стадии (разрушения).

На I стадии ползучесть протекает с убывающей скоростью, асимптотически приближающейся к установившейся скорости ползучести. Длительность I стадии может достигать нескольких сотен часов. С течением времени, если растягивающее напряжение и температура достаточно велики,

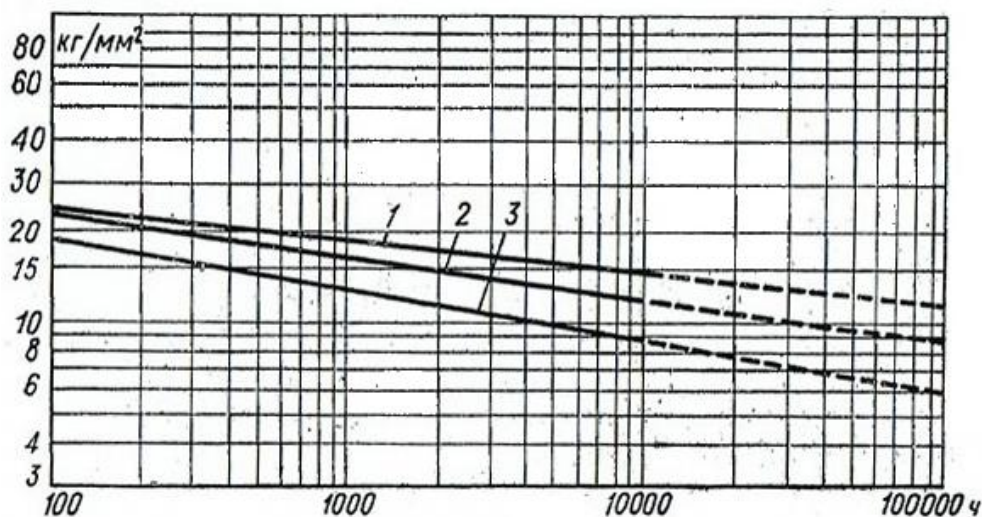
скорость ползучести начинает возрастать и, наконец, происходит разрыв образца.

Напряжение, при котором происходит разрыв образца, называют пределом длительной прочности для заданных времени и температуры. Следует отметить, что общая деформация ползучести, при которой происходит разрыв материала, относительно невелика, составляя 5-10 % у мягких углеродистых сталей и 1-2 % у легированных сталей с высоким сопротивлением ползучести. В связи с этим было бы неправильным назначать допускаемые напряжения в трубопроводах исходя из какой-то одной, одинаковой для всех марок стали скорости ползучести, тем более, что прирост диаметра трубопроводов, вызванный ползучестью, не является сам по себе препятствием для дальнейшей эксплуатации трубопровода. Более правильным, как это принято в Нормах, обосновывать допускаемые напряжения на базе предела длительной прочности. Скорость ползучести при принятом уровне допускаемых напряжений, не превосходит, как правило,  $10^{-2}$  мм/(мм·ч) или 1 % за 100000 ч работы трубопровода.

Для определения условного предела длительной прочности при заданном времени (100000 ч) проводятся испытания серии образцов при различных нагрузках. Результаты испытаний наносятся на диаграмму, по оси абсцисс которой откладываются логарифмы времени, прошедшего до разрушения, как показано на рис. 3.

Зависимости длительности испытания до разрушения имеют вид прямых или ломаных линий, что дает возможность путем экстраполяции определить длительную прочность при обусловленных 100000 ч на основании более кратковременных испытаний.

При высоких температурах и напряжениях в стали многих марок с течением времени происходят изменения структуры, ухудшающие свойства стали. Поэтому теперь стремятся проводить испытания большой длительности (10-20 тысяч и более часов).



**Рис. 3** – Длительная прочность стали 12Х1МФ

1 – при температуре 500 °С, 2 – то же при 580 °С, 3 – то же, при 600 °С.

Общесоюзными стандартами принята в настоящее время следующая система обозначения марок качественных и легированных сталей. Первые две цифры обозначают среднее содержание углерода в сотых долях процента, следующие за цифрами буквы указывают на содержание в стали легирующих элементов, отвечающих буквам: Х – хром, Н – никель, М – молибден, Ф – ванадий, В – вольфрам, Т – титан, Б – ниобий, Р – бор, Г – марганец, С – кремний (силиций).

При содержании легирующего элемента в размере 1 % и более вслед за индексом элемента ставится число, указывающее на среднее содержание в стали этого элемента в процентах; при содержании легирующего элемента менее 1% вслед за индексом элемента цифра отсутствует. Марганец и кремний входят в состав каждой стали и буквами Г и С отмечается только повышенное содержание этих элементов в стали сверх обычного.

Таким образом, обозначение марки 12Х1МФ указывает, что в этой стали содержится в среднем 0,12% углерода, 1% хрома ( $Cr = 0,9 \div 1,2 \%$ ), и менее 1 % молибдена и ванадия ( $Mo = 0,4 \div 0,55 \%$  и  $V = 0,15 \div 0,35 \%$ ).

Наряду с обозначениями легированных сталей по ГОСТ применяются и заводские обозначения марок (ЭИ – 257, ЭИ – 531, ЭП – 17, ЭП – 695-р и т.д.)

Для трубопроводов энергетических установок используют следующие стали.

*Углеродистая сталь 20* качественная, мартеновская, спокойная, с гарантированным химическим составом и механическими свойствами. Среднее содержание углерода 0,20 %, наивысшее допустимое 0,24 %, что обеспечивает хорошую свариваемость стали без сопутствующего подогрева.

Стоимость труб из стали марок 20 и 10 одинакова, однако допускаемые напряжения у стали 20 на 15-20 % выше, чем у стали 10, а следовательно, необходимая толщина стенок труб на 13-17 % меньше, чем аналогичных труб из стали 10.

Бесшовные трубы из стали 20 изготавливаются в настоящее время вплоть до диаметра 465 мм. Трубы из этой стали могут применяться для паропроводов с температурой до 450 °С (40 атм 440 °С) и питательных трубопроводов любых давлений. Углеродистая сталь 10 при одинаковой цене со сталью 20 обладает, как отмечалось, более низкими прочностными качествами. В связи с этим применение труб из стали 10 может быть целесообразным только в тех случаях, когда условиям прочности удовлетворяет минимальная по сортаменту толщина стенок труб из стали 10 (одинаковая в этом случае с толщиной стенок из стали 20).

Такими, например, являются трубы диаметром 89 мм и меньше при условном давлении  $P_{y64}$  и ниже. При условных давлениях  $P_{y25}$  и ниже допустимо применение труб из стали 10 с минимальной толщиной стенки, включая диаметр 426 мм. Однако применение на одной и той же монтажной площадке труб одинакового размера из различной по прочности стали является, вообще говоря, нежелательным, так как приводит иногда к ошибочной сварке в трубопровод более высоких параметров кусков труб из стали 10, не обладающих достаточной для этих параметров прочностью.

*Сталь углеродистая* обыкновенного качества марок Ст3 и Ст2 применяется для изготовления труб бесшовных на параметры до 23 атм 300 °С и для изготовления сварных труб на условное давление  $P_{y16}$  и ниже при

температуре до 300 °С. Сталь Ст3 по прочностным характеристикам близка к стали 20, а сталь Ст2 по своей прочности приближается к стали 10.

*Сталь 15ГС* с повышенным содержанием марганца и кремния применяется для изготовления труб питательных трубопроводов с рабочим давлением 185, 230 и 380 кг/см<sup>2</sup>. Допускаемое напряжение у этой стали на 25 % выше, чем у стали 20, и это позволяет при одинаковом внутреннем диаметре уменьшить вес труб на 30 % и снизить жесткость труб (экваториальный момент инерции поперечного сечения) на 36 %. Цена труб из стали 15ГС выше, чем труб, изготавливаемых из стали 20.

Теплостойкие низколегированные стали перлитного класса применяются для паропроводов с температурой 450-570 °С. В прошлом, при стандартной температуре пара 510 °С, применялись хромомолибденовые стали марок 12МХ и в последствии 15ХМ, но затем при повышении температуры пара до 540 и 565-570 °С оказалось необходимым перейти на более прочные при высоких температурах хромомолибденованадиевые стали 12ХІМФ и 15ХІМІФ.

Для изготовления паропроводов с температурой 540 и 570 °С и толщиной стенки до 40 мм применяется сталь 12ХІМФ. Ограничение толщины стенки вызвано тем, что у труб с большой толщиной стенки не удастся обеспечить необходимую термообработку и, в частности, получить требуемую ударную вязкость. Трубы с толщиной стенки 45 мм и более изготавливаются в настоящее время из стали 15ХІМІФ с повышенным содержанием молибдена. Номинальные допускаемые напряжения у этой стали примерно на 13 % выше, чем у стали 15ХІМФ, но она менее технологична и примерно в полтора раза дороже стали 12ХІМФ. Но и из стали 15ХІМІФ при параметрах пара 255 атм и 565 °С не удастся получить трубы с проходом более 205 мм (толщина стенки 60 мм), что при больших мощностях современных блоков требует сооружения много ниточных паропроводов. В этом отношении представляет интерес высоко хромистая сталь ЭИ756 (ІХ12В2МФ), допускаемое напряжение для которой при температуре пара 565 °С на 30 % выше, чем у стали 15ХІМІФ, что

дает возможность изготовления труб с площадью прохода, в два раза большей, и сокращения вдвое числа ниток паропроводов.

Сталь ЭИ756 применена для изготовления паропроводов на отдельных установках для получения опытных данных о работе этой стали в эксплуатационных условиях.

*Высоколегированные стали аустенитного* класса имеют по сравнению с низколегированными сталями более высокие показатели длительной прочности и сопротивления ползучести. Из сталей аустенитного класса на отдельных установках нашли применение стали X18H12T (ЭЯТ), X16H16B2МБР (ЭП182) и др.

Аустенитные стали характеризуются высокой стойкостью против коррозии, в связи с чем их называют нержавеющей. В тоже время аустенитные стали значительно дороже низколегированных и требуют большого расхода дефицитного никеля. Поэтому применение этих сталей целесообразно только при температурах выше 600 °С, а также в тех случаях, когда необходимо обеспечить отсутствие коррозии в трубопроводах, как, например, в трубопроводах первичного контура атомных энергетических установок.

Стали аустенитного класса обладают высокой пластичностью и ударной вязкостью, однако конечная деформация ползучести, при которой происходит разрушение, незначительна по своей величине и в несколько раз меньше, чем у перлитных сталей.

Надежность аустенитных трубопроводов остается ещё не вполне решенной проблемой, о чем в достаточной мере свидетельствует большое количество статей, непрерывно появляющихся в периодической печати, посвященных вопросам межкристаллитной коррозии, трещинообразованию, улучшению сварки и другим вопросам повышения надежности трубопроводов и пароперегрева тельных элементов, выполняемых из различных марок аустенитной стали.



### **Список использованных источников:**

1. Рудамино Б. В. Проектирование трубопроводов тепловых электростанций / Б. В. Рудамино, Ю. Н. Ремжин. – Л. : Энергия, 1970. – 208 с.
2. Ким Д. П. О тепловом расчете магистральных нефтепроводов / Д. П. Ким, Ш. И. Рахматуллин // Нефтяное хозяйство. – 2006. – № 1. – С. 104–105.

***Оболенская Т.А., Евсюкова Л.А., Лазаренко В.И., Серeda Н.В.***

«Основные свойства сталей, применяемых для энергетических трубопроводов».

Статья посвящена анализу физико-механических свойств сталей в условиях работы при высоких температурах и выбору наиболее соответствующих для условий эксплуатации марок сталей.

**Ключевые слова:** стали, физико-механические свойства, трубопроводы энергетические

***Оболенська Т. О., Євсюкова Л.О., Лазаренко В.І., Серeda Н. В.***

«Основні властивості сталей, які використовуються для енергетичних трубопроводів».

Стаття присвячена аналізу фізико-механічних показників сталей в умовах роботи при високих температурах и виборі найбільш відповідних для умов експлуатації марок сталей.

**Ключові слова:** сталі, фізико-механічні властивості, трубопроводи енергетичні

***Obolenskaya T.A., Yevsjukova L.A., Lazarenko V.I., Sereda N.V.*** “The main properties of steels which are used for energetically tubing’s”.

The article is devoted to the analysis of physical-mechanical properties of the steels for conditions of work in the high temperatures and choice of more corresponding of steel marks for exploitation conditions.

**Key words:** steels, physical-mechanical properties, energetically tubing’s

Стаття надійшла до редакції 24 листопада 2010 року