

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕЛАКСАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В СТАЛИ 25Х17Н2Б-Ш И МЕДИ М1 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОЛЬЦЕВЫХ ОБРАЗЦОВ РАВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗГИБУ

А.В. Проскурин
С.П. Саюн

niik@vniitf.ru

ФГУП «РФЯЦ — ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина»,
г. Снежинск, Челябинская обл., Российская Федерация

Аннотация

Проведены исследования релаксации напряжений коррозионно-стойкой стали марки 25Х17Н2Б-Ш при температуре 20 и 100 °С, отожженной меди марки М1 двух типов (мягкой и подвергшейся предварительной пластической деформации) при температуре 20 °С, используемых при изготовлении деталей стыковых соединений трубопроводов высокого давления. Исследования проведены на кольцевых образцах равного сопротивления изгибу по методу Одингга. Показано влияние температуры на скорость релаксации напряжений в стали 25Х17Н2Б-Ш, а также влияние предварительной пластической деформации отожженной меди на ее релаксационные характеристики, особенно заметное в первые часы после нагружения. В результате анализа опытных данных с использованием нелинейной регрессии определены числовые значения параметров уравнений, применяемых для описания процесса релаксации напряжений. С использованием полученных выражений рассчитаны и построены графики релаксации напряжений исследуемых материалов. Проведено сравнение напряжений, рассчитанных с использованием полученной модели релаксации для стали марки 25Х17Н2Б-Ш при температуре 20 °С, с результатами релаксации напряжений контрольного образца из того же материала, результаты испытаний которого не использовались при разработке математической модели. Расчетные данные показали хорошую сходимость с опытными данными, полученными на контрольном образце, что свидетельствует о корректности работы математической модели

Ключевые слова

*Релаксация напряжений,
брус равного сопротивления
изгибу, нагружение,
выдержка, нелинейная
регрессия, характеристики
релаксации*

Поступила 21.05.2020

Принята 26.09.2020

© Автор(ы), 2021

Введение. Материалы деталей конструкций стыковых соединений трубопроводов гидравлических и пневматических систем, работающих в условиях высокого давления, должны сочетать в себе высокие прочностные и упругие свойства для сохранения сборочных усилий, обеспечивающих герметичность соединения. В процессе эксплуатации с течением времени в материалах постоянно нагруженных деталей соединений трубопроводов происходит релаксация напряжений и, как следствие, уменьшение усилий сборки, что может привести к нарушению герметичности. Это относится и к уплотнительным элементам, изготовленным из мягких материалов, например из меди. Поэтому при конструировании ответственных узлов для обеспечения их работоспособности в течение длительной эксплуатации должно учитываться явление релаксации напряжений в материалах деталей, находящихся в нагруженном состоянии [1]. Для обоснованного выбора материала такой конструкции необходимы характеристики релаксации напряжений, полученные опытным путем. Кроме того, опытные данные могут быть использованы для верификации и разработки расчетных моделей, описывающих поведение материала в нагруженном состоянии с течением времени.

Чаще всего исследования релаксации напряжений в металлах проводятся при повышенных температурах (до 1200 °С) и недостаточно длительном времени выдержки под нагрузкой (десятки, сотни часов) [2–8]. Поэтому объем сведений в литературе о релаксации напряжений в материалах при нормальной температуре (20 ± 5) °С и длительном времени выдержки достаточно ограничен.

Получены сведения о релаксации напряжений в коррозионно-стойкой стали марки 25X17H2Б-Ш (ТУ 14-1-1062-74*) при температуре 20 и 100 °С и меди марки М1 (ГОСТ 859-2014**) при температуре 20 °С. Использовалась медь двух типов: мягкая медь — образцы для испытаний подвергались отжигу, упрочненная медь — образцы для испытаний изготовлены из заготовки, подвергшейся после отжига пластической деформации.

Из имеющихся методов испытаний на релаксацию напряжений [4], как указано в [9, 10], самым простым в реализации и наиболее подходящим для длительных испытаний является метод кольцевых образцов

* ТУ 14-1-1062-74. Прутки и полосы из коррозионно-стойкой стали марки 25X17H2Б-Ш электрошлакового переплава. Технические условия. Держатель подлинника: ЦССМ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина».

** ГОСТ 859-2014 Медь. Марки. М., Стандартинформ, 2015.

или метод Одингга. Этот метод использован в настоящей работе. При испытаниях кольцевой образец, сконструированный в виде бруса равного сопротивления изгибу (рис. 1), нагружается путем изменения ширины прорези вставленным в нее клином определенного размера. Требуемое начальное напряжение создается выбором соответствующей толщины клина. Для измерений ширины прорези на образце рядом с прорезью прибором Виккерса наносятся метки. Расстояние C_1 между метками измеряется перед началом испытаний. Затем образец нагружается клином, и в нагруженном состоянии измеряется расстояние C_2 между метками. В нагруженном образце в процессе выдержки происходят процессы релаксации первоначальных напряжений. После выдержки в течение времени t образец разгружается и снова измеряется расстояние C_{1t} между метками. Расстояние C_{1t} больше, чем расстояние C_1 до нагружения, так как упругая деформация уменьшается за счет релаксации напряжений.

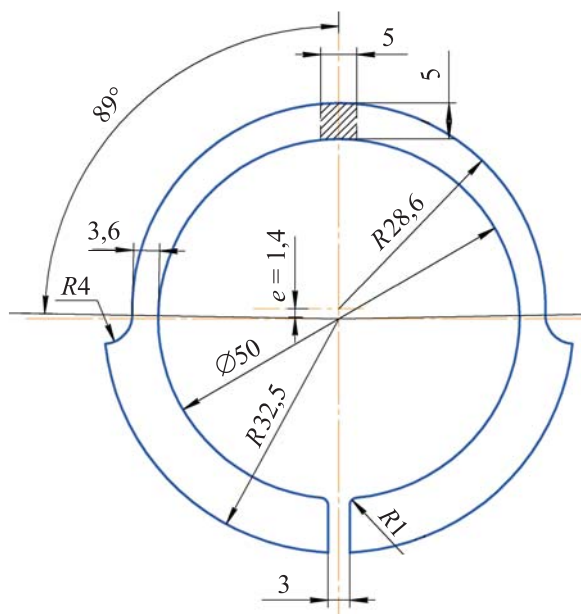


Рис. 1. Кольцевой образец равного сопротивления изгибу

Значения начального $\sigma_{\text{нач}}$ (в момент времени $t = 0$) и релаксированного σ_t напряжения в образце определяются по изменению первоначальной ширины прорези с применением следующих формул [1, 11]:

$$\sigma_{\text{нач}} = AE(C_2 - C_1); \quad (1)$$

$$\sigma_t = AE(C_2 - C_{1t}), \quad (2)$$

где $A = 0,000583 \text{ мм}^{-1}$ — коэффициент, зависящий от геометрических размеров образца [9, 11]; E — модуль упругости материала образца; C_{1t} — расстояние между метками после выдержки образца в нагруженном состоянии.

После измерения расстояния C_{1t} образец опять нагружается до размера C_2 тем же клином, этим обеспечивается постоянство деформированного состояния образца в течение всего испытания. Повторяя через установленные промежутки времени t_i измерения расстояния C_{1t_i} после разгрузки и расчета значений напряжений, можно получить зависимость релаксации напряжений в координатах напряжение–время.

Для исследований релаксации напряжений в стали марки 25X17H2Б-Ш использовано шесть образцов (условной нумерации: усл. № 1–№ 6). Для получения требуемых показателей механических свойств и твердости образцы после изготовления подвергали термической обработке (закалка в вакууме при $(970 \pm 15) \text{ }^\circ\text{C}$, двукратный отпуск в вакууме при $(710 \pm 20) \text{ }^\circ\text{C}$). Механические характеристики стали 25X17H2Б-Ш после термообработки следующие: твердость 28...33 HRC; предел прочности $\sigma_b = 900 \text{ МПа}$; условный предел текучести $\sigma_{0,2} = 760 \text{ МПа}$; модуль упругости $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$.

Образцы усл. № 1–№ 3 выдерживали в нагруженном состоянии при температуре $(20 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$, а образцы усл. № 4–№ 6 выдерживали в нагруженном состоянии при температуре $(100 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$.

Для исследований релаксации напряжений в меди марки М1 использовано пять образцов (усл. № 7–№ 11). Заготовками образцов из меди служили диски диаметром 100 и высотой 12 и 35 мм, вырезанные из прутка ГKR XXX 100 М1 (ГОСТ 1535–91*). Образцы усл. № 7 и 8, изготовленные из заготовок высотой 12 мм, перед нагружениями отжигали в вакуумной печи при давлении не более $1 \cdot 10^{-1} \text{ мм рт. ст.}$ и температуре $600 \dots 700 \text{ }^\circ\text{C}$. Заготовки высотой 35 мм для образцов усл. № 9–№ 11 сначала отжигали с указанными ранее режимами, а затем подвергали пластической деформации (осадке) $\approx 60 \%$, после чего из них вырезали образцы.

Основные механические характеристики меди марки М1, полученные по результатам испытаний на растяжение образцов, изготовленных в соответствии с ГОСТ 1497–84**, следующие: $\sigma_b = 205$ и 385 МПа и удлине-

* ГОСТ 1535–91. Прутки медные. Технические условия. М., Межгосударственный стандарт, 1991.

** ГОСТ 1497–84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. М., Стандартинформ, 2008.

ние при разрыве $\delta = 25,2$ и $4,52$ % (до и после пластической деформации); $E = 1,1 \cdot 10^5$ МПа.

Кривые релаксации в начальный период процесса имеют резко падающий участок, который затем сменяется другим значительно более плавным, характеризующим собой процесс релаксации с весьма умеренной скоростью падения напряжений [4]. На первом этапе релаксации преобладающую роль играет диффузионная пластичность [12–14]. Для описания этого процесса И.А. Одингом была предложена следующая зависимость:

$$\sigma = \sigma_{\text{нач}} e^{-kt/(1+bt)}, \quad (3)$$

где k , b — коэффициенты, зависящие от свойств металла; t — время релаксации.

Для описания второго этапа процесса релаксации в [2, 15] рекомендована зависимость, полученная с использованием экспериментальных данных,

$$\sigma = \sigma_0 e^{-(t/t_0)^p}, \quad (4)$$

где σ_0 — начальное напряжение второго этапа процесса релаксации (расчетная величина); p — показатель релаксационной податливости, изменяющийся в пределах от 0 до 1; t_0 — величина, которую в [15] предложено называть коэффициентом внутризеренной стабильности металла (чем больше t_0 , тем медленнее снижается напряжение на этом этапе релаксации).

Параметры k , b из выражения (3) и σ_0 , p , t_0 из (4) определяли по полученным экспериментальным зависимостям изменения напряжений от времени для каждого образца с использованием нелинейной регрессии.

Для определения конца первого этапа релаксации напряжений и начала второго этапа сделано допущение, что продолжительность первого этапа ограничена моментом времени, которому принадлежит последняя экспериментальная точка из точек, использованных для нахождения параметров k и b выражения (3). Число этих точек выбрано таким, при котором среднее квадратическое отклонение экспериментальных точек выражения (3) было минимальным.

Максимальное время нагружения образцов составило до 7536 ч (314 сут).

В таблице приведены значения начальных напряжений, реализованные в образцах, а также расчетные значения коэффициентов k , b , σ_0 , p , t_0 , определенные по экспериментальным данным. На рис. 2, б и 3, б

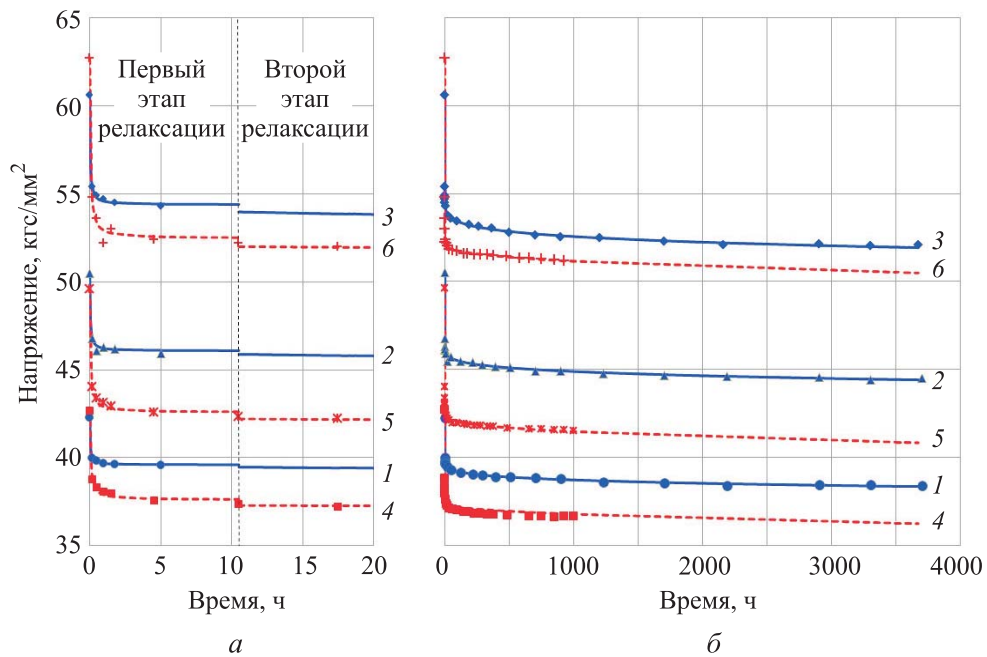


Рис. 2. Графики изменения напряжений в течение времени в образцах из стали:
 кривые 1–6 — образцы усл. № 1–№ 6 соответственно

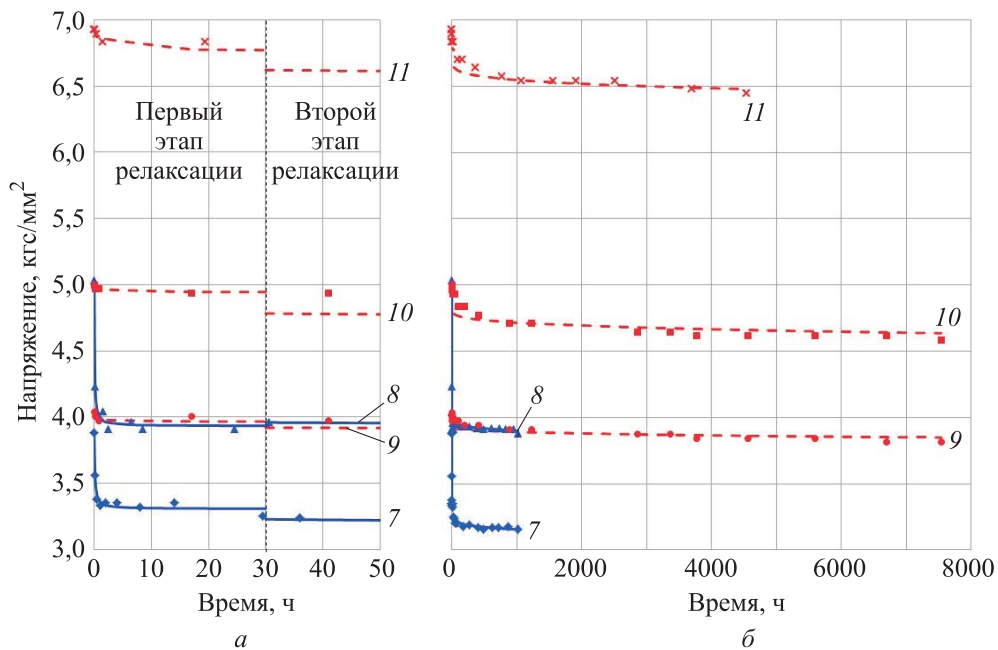


Рис. 3. Графики изменения напряжений в течение времени в образцах из меди:
 кривые 7–11 — образцы усл. № 7–№ 11 соответственно

для образцов усл. № 1–№ 6 и усл. № 7–№ 11 приведены графики уравнений (3) и (4) со значениями коэффициентов из таблицы. Для большей наглядности графики первого и второго этапов релаксации приведены на рис. 2, а и 3, а с другим масштабом времени (этапы релаксации напряжений разделены штриховой линией). Для сравнения также показаны экспериментальные точки, использованные для вычисления коэффициентов.

**Начальные напряжения, реализованные в образцах,
и расчетные значения коэффициентов из выражений (3), (4)**

Условный номер образца	$\sigma_{\text{нач}}$, МПа (кгс/мм ²)	k	b	σ_0	t_0	p
1	422,74 (42,274)	2,051	31,364	39,97	140 500	0,205
2	505,01 (50,501)	2,64	28,78	46,6	156 000	0,190
3	605,80 (60,580)	3,025	28,004	54,8	224 900	0,183
4	426,94 (42,694)	2,023	15,957	37,15	1867	0,509
5	496,0 (49,600)	2,963	19,425	42,334	2974	0,426
6	626,9 (62,690)	3,475	19,506	52,182	5193	0,383
7	38,79 (3,879)	1,361	8,516	3,338	497 600	0,149
8	50,34 (5,034)	3,507	14,188	3,98	4936	0,386
9	40,40 (4,040)	0,103	5,6	3,932	20 890	0,351
10	50,02 (5,002)	0,025	2,14	4,824	30 170	0,276
11	69,26 (6,926)	0,018	0,77	6,704	120 000	0,220

Более наглядно процесс релаксации напряжений в материале можно представить с помощью зависимости величины падения напряжения в процессе релаксации от величины начального напряжения и времени действия нагрузки. Такие зависимости, построенные по результатам испытаний образцов из стали 25Х17Н2Б-Ш при температуре 20 и 100 °С, приведены на рис. 4. С использованием выражения (4) и значений коэффициентов из таблицы, определяли значения напряжений $\sigma(t_i)$ в разные моменты времени t_i (200, 2000, 4000...10 000 ч) для каждого начального напряжения $\sigma_{\text{нач}}$, реализованных в образцах (см. таблицу). Затем определяли величину падения напряжений (в процентах) в результате релаксации за выбранные промежутки времени:

$$\Delta\sigma_i = \sigma_{\text{нач}} - \sigma_i; \quad (5)$$

$$\Delta\sigma_i(\%) = \frac{\Delta\sigma_i \cdot 100}{\sigma_{\text{нач}}}. \quad (6)$$

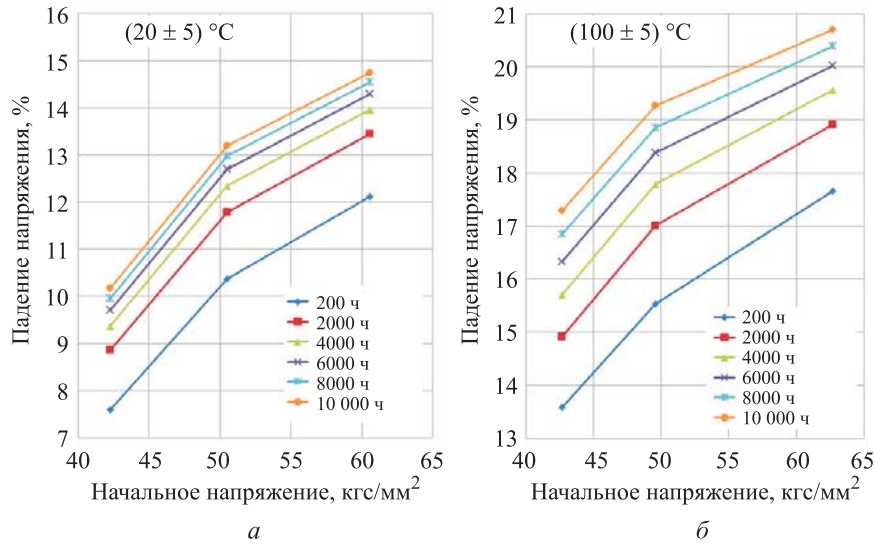


Рис. 4. Зависимости падения напряжения в образцах из стали при релаксации от начального напряжения при 20 (а) и 100 °С (б)

Приведенные таким образом данные дают возможность наглядно оценить изменение величины напряжения в результате релаксации напряжений и степень влияния какого-либо фактора, например температуры, на этот процесс. Например, из рис. 4 следует, что при увеличении начального напряжения повышается и значение падения напряжения в процессе релаксации. Значение падения напряжения в процессе релаксации увеличивается также при повышении температуры выдержки.

Для практического применения при оценке величины релаксации напряжений удобнее использовать обобщенную математическую модель в виде расчетных выражений. Например, необходимо оценить изменение напряжений за промежуток времени, превышающий первый этап релаксации ($t > 10$ ч — для стали 25Х17Н2Б-Ш; $t > 30$ ч — для упрочненной меди марки М1). Из данных таблицы следует, что значения коэффициентов (σ_0 , p , t_0) из выражения (4) могут зависеть от начального напряжения $\sigma_{\text{нач}}$, поэтому зависимости $\sigma_0(\sigma_{\text{нач}})$, $t_0(\sigma_{\text{нач}})$, $p(\sigma_{\text{нач}})$ можно найти путем аппроксимации значений этих коэффициентов. Таким образом, обобщенные математические модели, описывающие процесс релаксации напряжений, можно представить в виде следующих систем:

$$\begin{aligned} \sigma(t) &= \sigma_0(\sigma_{\text{нач}}) e^{-\left(\frac{t}{t_0(\sigma_{\text{нач}})}\right)^2} p(\sigma_{\text{нач}}) \quad \text{при } t > 10 \text{ ч;} \\ \sigma_0(\sigma_{\text{нач}}) &= 0,8102\sigma_{\text{нач}} + 5,705; \\ t_0(\sigma_{\text{нач}}) &= 270,51\sigma_{\text{нач}}^2 - 23\,213\sigma_{\text{нач}} + 638\,360; \\ p(\sigma_{\text{нач}}) &= 0,000062\sigma_{\text{нач}}^2 - 0,007544\sigma_{\text{нач}} + 0,413714 \end{aligned} \quad (7)$$

— математическая модель релаксации напряжений в стали 25Х17Н2Б-Ш при температуре 20 °С;

$$\begin{aligned} \sigma(t) &= \sigma_0(\sigma_{\text{нач}}) e^{-\left(t/(t_0(\sigma_{\text{нач}}))\right)^{p(\sigma_{\text{нач}})}} \quad \text{при } t > 10 \text{ ч;} \\ \sigma_0(\sigma_{\text{нач}}) &= 0,7518\sigma_{\text{нач}} + 5,0483; \\ t_0(\sigma_{\text{нач}}) &= 166,75\sigma_{\text{нач}} - 5269,9; \\ p(\sigma_{\text{нач}}) &= 0,0003\sigma_{\text{нач}}^2 - 0,0383\sigma_{\text{нач}} + 1,5872 \end{aligned} \quad (8)$$

— то же при температуре 100 °С;

$$\begin{aligned} \sigma(t) &= \sigma_0(\sigma_{\text{нач}}) e^{-\left(t/(t_0(\sigma_{\text{нач}}))\right)^{p(\sigma_{\text{нач}})}} \quad \text{при } t > 30 \text{ ч;} \\ \sigma_0(\sigma_{\text{нач}}) &= 0,9629\sigma_{\text{нач}} + 0,0283; \\ t_0(\sigma_{\text{нач}}) &= 12835\sigma_{\text{нач}}^2 - 106410\sigma_{\text{нач}} + 241294; \\ p(\sigma_{\text{нач}}) &= 1,1293\sigma_{\text{нач}}^{-0,853} \end{aligned} \quad (9)$$

— математическая модель релаксации напряжений в упрочненной меди марки М1 при температуре 20 °С.

При необходимости для оценки изменений напряжений в течение первых часов после нагружения (первый этап процесса релаксации) можно построить аналогичную модель с помощью коэффициентов k и b из выражения (3).

Для дальнейшего использования математическая модель (7) была протестирована по результатам исследований релаксации напряжений на дополнительном образце из стали марки 25Х17Н2Б-Ш, которые не использовались при построении математической модели. Результаты расчетного моделирования релаксации напряжений с помощью математической модели (7) и экспериментальные данные дополнительного образца приведены на рис. 5.

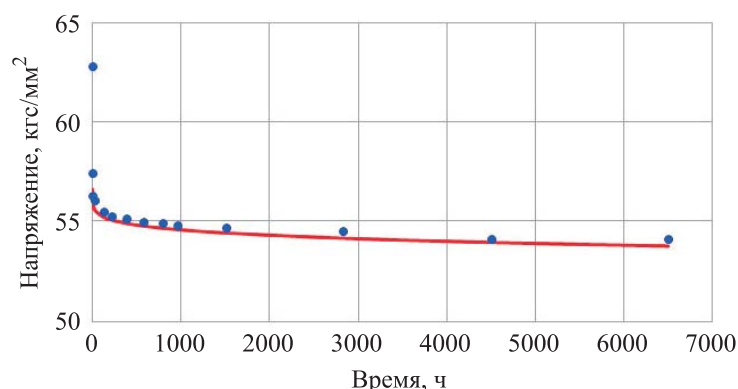


Рис. 5. Результаты расчетного моделирования релаксации напряжений и экспериментальные данные тестового образца

Отметим хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных, что свидетельствует об адекватности математических моделей (7), (8) и (9) и возможности их использования.

Выводы. В результате проведенных исследований получены математические модели, характеризующие изменение напряжений при релаксации в коррозионно-стойкой стали марки 25X17H2Б-Ш при температуре 20 и 100 °С и отожженной меди марки М1 двух типов (недеформированной и подвергшейся предварительной пластической деформации) при температуре 20 °С. Показано, что скорость релаксации напряжений в стали марки 25X17H2Б-Ш с повышением температуры до 100 °С меняется в сторону увеличения, что свидетельствует о снижении ее релаксационной стойкости. Релаксация напряжений в упрочненной меди, т. е. меди, подвергшейся предварительной пластической деформации, выражена меньше, чем в мягкой, которая не подвергалась предварительной пластической деформации, особенно в первые часы после нагружения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бабкин В.Т., Зайченко А.А., Александров В.В. и др. Герметичность неподвижных соединений гидравлических систем. М., Машиностроение, 1977.
- [2] Локощенко А.М. Ползучесть и длительная прочность металлов. М., ФИЗМАТЛИТ, 2016.
- [3] Волкова Т.И., Цейтлин В.З., Петропавловская З.Н. Методика испытания на релаксацию при растяжении в специальном приспособлении. *Вопросы металловедения котлотурбинных материалов. Труды ЦНИИТМАШ*, 1955, вып. 71, с. 70–80.
- [4] Матвеев С.И., ред. Релаксация и ползучесть металлов. М., Машгиз, 1952.
- [5] Антикайн П.А. Металловедение. М., Металлургия, 1972.
- [6] Гинцбург Я.С. Релаксация напряжений в металлах. М., Metallurgizdat, 1957.
- [7] Тайра С., Отани Р. Теория высокотемпературной прочности материалов. М., Металлургия, 1986.
- [8] Бернштейн М.Л., Рахштадт А.Г., ред. Методы испытаний и исследования. М., Металлургия, 1991.
- [9] Борздыка А.М., Гецов Л.Б. Релаксация напряжений в металлах и сплавах. М., Металлургия, 1972.
- [10] Работнов Ю.Н. Ползучесть конструкций. М., Наука, 2014.
- [11] Одинг И.А., ред. Новый метод испытания металлов на релаксацию и ползучесть. М., Машгиз, 1949.
- [12] Одинг И.А. К вопросу о природе релаксации и ползучести металлов. *Вестник машиностроения*, 1949, № 2, с. 6–14.

[13] Одинг И.А. Релаксация и ползучесть с учетом неравномерного распределения напряжения. *Известия АН СССР. ОТН*, 1948, № 10, с. 1561–1575.

[14] Одинг И.А. Релаксация и ползучесть металлов. *Вестник машиностроения*, 1946, № 5, с. 25–35.

[15] Постников В.С., ред. Релаксационные явления в металлах и сплавах. *Тр. 3-й Всесоюз. науч. конф.* М., Металлургиздат, 1963.

Проскурин Анатолий Викторович — д-р техн. наук, заместитель главного конструктора ФГУП «РФЯЦ — ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина» (Российская Федерация, 456770, Челябинская обл., г. Снежинск, ул. Васильева, д. 13).

Саюн Сергей Петрович — инженер-исследователь ФГУП «РФЯЦ — ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина» (Российская Федерация, 456770, Челябинская обл., г. Снежинск, ул. Васильева, д. 13).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Проскурин А.В., Саюн С.П. Результаты исследований релаксации напряжений в стали 25Х17Н2Б-Ш и меди М1 с использованием кольцевых образцов равного сопротивления изгибу. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2021, № 2 (137), с. 59–71. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2021-2-59-71>

**RESULTS OF STUDYING STRAIN RELAXATION
IN STEEL 25Kh17N2B-Sh (25X17H2B-III) AND COPPER M1
USING ANNULAR SAMPLES OF EQUAL BENDING RESISTANCE**

A.V. Proskurin
S.P. Sayun

niik@vniitf.ru

**Russian Federal Nuclear Center — Zababakhin All-Russian Scientific Research
Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Chelyabinsk Region, Russian Federation**

Abstract

The paper introduces the research into stress relaxation of corrosion-resistant steel 25Kh17N2B-Sh (25X17H2B-III) at temperatures of 20 and 100 °C, annealed copper M1 of two types — soft and subjected to preliminary plastic deformation — at a temperature of 20 °C, used in the manufacture of parts for butt joints of high-pressure pipelines. The research was carried out on annular samples of equal bending resistance according to the method of Oding. The study shows the action of temperature on the rate of stress relaxation in steel 25Kh17N2B-Sh (25X17H2B-III), as well as the effect of preliminary plastic deformation of annealed copper on its relaxation characteristics, which

Keywords

Stress relaxation, bar of equal bending resistance, stress, holding, nonlinear regression, relaxation properties

is especially noticeable in the first hours after loading. As a result of the analysis of experimental data and by means of nonlinear regression, we determined the numerical values of the parameters of the equations used to describe the process of stress relaxation. Using the obtained expressions, we calculated and plotted the curves of stress relaxation in the materials under study. Furthermore, we compared the stress values calculated using the obtained relaxation model for steel 25Kh17N2B-Sh (25X17H2B-III) at a temperature of 20 °C with the results of stress relaxation of a control sample from the same material, the test results of which were not used in the development of a mathematical model. The calculated data showed good similarity with the experimental data obtained on the test sample, which indicates the correct operation of the mathematical model

Received 21.05.2020

Accepted 26.09.2020

© Author(s), 2021

REFERENCES

- [1] Babkin V.T., Zaychenko A.A., Aleksandrov V.V., et al. Germetichnos' nepodvizhnykh soedineniy gidravlicheskiykh sistem [Airtightness of fixed joints of hydraulic systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977.
- [2] Lokoshchenko A.M. Polzuchest' i dlitel'naya prochnost' metallov [Creep and long-term strength of metals]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2016.
- [3] Volkova T.I., Tseytlin V.Z., Petropavlovskaya Z.N. Test procedure for tensile relaxation in a special device. *Material science issues of boiler-and-turbine materials. Tr. TsNIITMASH*, 1955, vol. 71, pp. 70–80 (in Russ.).
- [4] Matveev S.I., ed. Relaksatsiya i polzuchest' metallov [Relaxation and creep of metals]. Moscow, Mashgiz Publ., 1952.
- [5] Antikayn P.A. Metallovedenie [Material engineering]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1972.
- [6] Gintsburg Ya.S. Relaksatsiya napryazheniy v metallakh [Stress relaxation in metals]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1957.
- [7] Tayra S., Otani R. Teoriya vysokotemperaturnoy prochnosti materialov [Theory of high-temperature material strength]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986.
- [8] Bernshteyn M.L., Rakhshadt A.G., eds. Metody ispytaniy i issledovaniya [Test and research methods]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1991.
- [9] Borzdyka A.M., Getsov L.B. Relaksatsiya napryazheniy v metallakh i splavakh [Stress relaxation in metals and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1972.
- [10] Rabotnov Yu.N. Polzuchest' konstruktsey [Structure creep]. Moscow, Nauka Publ., 2014.
- [11] Oding I.A., ed. Novyy metod ispytaniya metallov na relaksatsiyu i polzuchest' [New test method for metal relaxation and creep]. Moscow, Mashgiz Publ., 1949.

[12] Oding I.A. On question of relaxation and creep character of metals. *Vestnik mashinostroeniya*, 1949, no. 2, pp. 6–14 (in Russ.).

[13] Oding I.A. Relaxation and creep with account for non-uniform stress distribution. *Izvestiya AN SSSR. OTN*, 1948, no. 10, pp. 1561–1575 (in Russ.).

[14] Oding I.A. Metal relaxation and creep. *Vestnik mashinostroeniya*, 1946, no. 5, pp. 25–35 (in Russ.).

[15] Postnikov V.S., ed. [Relaxation phenomena in metals and alloys]. *Tr. 3-y Vsesoyuz. nauch. konf.* [Proc. 3rd Soviet Union Sc. Conf.]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1963 (in Russ.).

Proskurin A.V. — Dr. Sc. (Eng.), Deputy of Chief Designer, Russian Federal Nuclear Center — Zababakhin All-Russian Scientific Research Institute of Technical Physics (Vasileva ul. 13, Snezhinsk, Chelyabinsk Region, 456770 Russian Federation).

Sayun S.P. — Research Engineer, Russian Federal Nuclear Center — Zababakhin All-Russian Scientific Research Institute of Technical Physics (Vasileva ul. 13, Snezhinsk, Chelyabinsk Region, 456770 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Proskurin A.V., Sayun S.P. Results of studying strain relaxation in steel 25Kh17N2B-Sh (25X17H2Б-III) and copper M1 using annular samples of equal bending resistance. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2021, no. 2 (137), pp. 59–71 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2021-2-59-71>