



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-64-70>
УДК 621.771.23

Поступила 02.04.2025
Received 02.04.2025

ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КРЕКИНГОВЫХ ТРУБ В ХОДЕ ИХ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

С. В. ПИЛИПЕНКО, А. В. ДУДАН, О. П. ШТЕМПЕЛЬ, Т. В. ВИГЕРИНА, Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой, г. Новополоцк, Беларусь, ул. Блохина, 29.
E-mail: 44-08@mail.ru

Приведены результаты исследований предела прочности крекинговых труб длительной эксплуатации. Показано, что прочностные характеристики материала труб снизились при незначительном увеличении показателей пластичности. Уменьшение значения условного предела текучести составило 39,94 %, предела прочности – 40,05 %. Установлено, что образцы трубы, бывшей в эксплуатации до достижения предела прочности, получили на 25 % большую деформацию (по вытяжке), чем образцы, изготовленные из новой трубы. В ходе исследований методом термомеханических коэффициентов произведены расчеты ожидаемых величин истинного предела текучести материала обеих труб. Эти значения для материала трубы, бывшей в эксплуатации, значительно отличаются от табличных данных. Соответственно при расчете такой конструкции, например на прочность, необходимо экспериментальным методом определять истинное значение предела текучести. Если же используются теоретические методы, то следует учитывать влияние времени эксплуатации конструкции на изменение механических характеристик ее металла.

Ключевые слова. Крекинговые трубы, истинный предел текучести, остаточный ресурс трубы, старение.

Для цитирования. Пилипенко, С. В. Изменение механических характеристик крекинговых труб в ходе их длительной эксплуатации / С. В. Пилипенко, А. В. Дудан, О. П. Штемпель, Т. В. Вигерина // Литье и металлургия. 2025. № 2. С. 64–70. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-64-70>.

CHANGING THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF CRACKING PIPES DURING THEIR LONG-TERM OPERATION

S. V. PILIPENKO, A. V. DUDAN, O. P. SHTEMPEL, T. V. VIGERINA, Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk, Novopolotsk, Belarus, 29, Blokhina str. E-mail: 44-08@mail.ru

The article presents the results of a study on the strength characteristics (tensile strength) of cracking pipes after prolonged operation. It was found that the strength properties of the pipe material deteriorated, while plasticity characteristics showed a slight increase. The decrease in conditional yield strength reached 39.94 %, and the reduction in tensile strength was 40.05 %. It was established that specimens taken from the used pipe underwent 25 % more elongation before fracture compared to specimens made from a new pipe. Using thermomechanical coefficients, the expected values of true yield strength for both materials were calculated. The results showed that the true yield strength of the used pipe material differs significantly from tabulated values, suggesting that for strength assessment of such structures, the true σ_T should be determined experimentally. If theoretical approaches are used, the influence of operational time on changes in mechanical properties of the metal must be taken into account.

Keywords. Cracking pipes, true yield strength, residual pipe life, material aging.

For citation. Pilipenko S. V., Dudan A. V., Shtempel O. P., Vigerina T. V. Changing the mechanical characteristics of cracking pipes during their long-term operation, 2025, no. 2, pp. 64–70. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-64-70>.

Введение

Бесшовные трубы из широкого сортамента сталей активно используются в аппаратах переработки углеводородов. В процессе эксплуатации они подвергаются воздействию агрессивных сред, причем в условиях температур, увеличивающих скорость ползучести материала трубы, приводящих к старению, термической усталости. Такое оборудование работает в широком диапазоне температур, по сути, при многократной термообработке, способной изменить механические характеристики материала даже без учета влияния процесса старения. Оценка остаточного срока службы подобных трубопроводов является важной научно-технической задачей, так как аспект их надежности и долговечности имеет важное значение для безаварийной эксплуатации агрегатов [1, 2].

Для выявления несплошностей в материале труб применяют акустические, магнито-шумовые и другие методы контроля, не требующие разрушения целостности трубопровода [3, 4]. С их помощью выявляют опасные участки, уже имеющие внутренние разрушения. Сложнее определить неразрушающими методами изменение механических характеристик. Иногда начало процесса разрушения можно определить по пластической деформации, но это не всегда удается сделать. Можно оценить изменение твердости наружного слоя, однако на трубе остаются хоть и небольшие, но все же повреждающие поверхность трубы следы. Методы определения очагов начала пластической деформации неразрушающими испытаниями только начинают развиваться. Например, проводятся опыты по исследованию акустической эмиссии в различных стадиях пластической деформации. По мнению авторов, они являются одним из перспективных направлений развития данной отрасли научного знания.

Известно, что механические характеристики металлов изменяются под влиянием таких факторов, как температура, степень и скорость деформации, время эксплуатации изделия и др. [5, 6]. Существует достаточно много научных работ, посвященных прогнозированию влияния первых трех факторов, а вот исследованию влияния времени эксплуатации металлических изделий на изменение механических характеристик материала в конкретных условиях, обобщению этих сведений в универсальные законы уделяется мало внимания [1–4, 7].

Цель настоящей работы – совершенствование используемых методов определения прочностных характеристик для материалов деталей технологического оборудования (крекинговых труб), эксплуатируемого при высоких температурах и (или) в агрессивных средах длительное время.

Методы исследования

Исследования осуществляли на установке для проведения испытаний на длительную прочность WDW-100RD электромеханического типа нагружения с управлением через персональный компьютер со специальным программным обеспечением для испытаний на растяжение (рис. 1). Машина укомплектована высокотемпературной печью для проведения испытаний на длительную прочность и ползучесть. Диапазон нагрева печи составляет 300–1200 °С. Программное обеспечение позволяет в автоматическом режиме определять такие основные характеристики, как предел текучести, временное сопротивление, условный предел текучести, относительное удлинение после разрыва, относительное удлинение при максимальной нагрузке, полное относительное удлинение после разрыва, модуль упругости, относительное сужение.

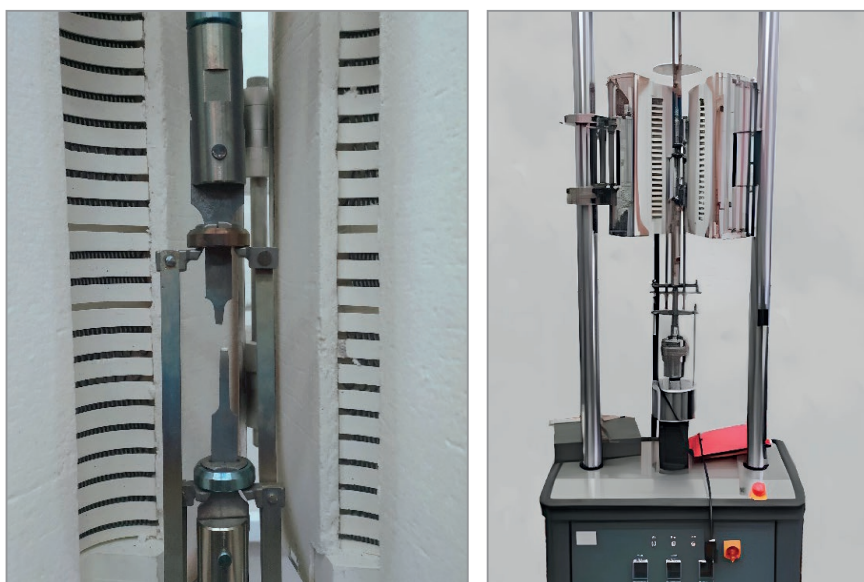


Рис. 1. Установка для испытаний на длительную прочность

Анализ исследований

Как отмечено выше, изменению механических характеристик металлов под влиянием температуры, степени и скорости деформации посвящено много работ. Например, из известных, универсальных теоретических методов определения реального предела текучести можно выделить метод термомеханических

коэффициентов, предложенный еще В. И. Зюзиным. В современном виде (с уточнениями П. Л. Клименко, А. А. Горбанева, Д. А. Деркача и др.) он выглядит следующим образом [5, 6]:

$$\sigma_T = \sigma_{T0} k_t k_\varepsilon k_u, \quad (1)$$

где σ_{T0} – предел текучести, Н/мм², при температуре $t = 1000$ °С, степени деформации $\varepsilon = 0,1$, скорости деформации $u = 10$ с⁻¹; k_t , k_ε и k_u – коэффициенты, учитывающие влияние температуры, степени и скорости деформации соответственно, рассчитанные по формулам [5, 6]:

$$\text{для } \varepsilon < 0,15 \quad k_t = 0,57 + 0,0045(1200 - t) \sqrt{\left| \frac{1200 - t}{t} \right|}; \quad (2)$$

$$\text{для } \varepsilon \geq 0,15 \quad k_\varepsilon = 4,7\sqrt{\varepsilon} - 4,5\varepsilon; \quad (3)$$

$$\text{для } u = 1-100 \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \quad k_\varepsilon = 0,85 + 0,82\sqrt{\varepsilon}; \quad (4)$$

$$\text{для } 100 < u \leq 300 \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \quad k_u = 0,8 + 0,065\sqrt{u}; \quad (5)$$

$$\text{для } 300 < u \leq 1000 \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \quad k_u = 0,8 + 0,085\sqrt{u}, \quad (6)$$

$$k_u = 2,3 - 0,000025u. \quad (7)$$

В [1] представлен ряд теоретических (рис. 2) и экспериментальных (рис. 3) исследований влияния времени наработки изделия и температуры на изменение предела прочности стали 10Х23Н18. В экспериментальной части исследовали изменения предела прочности не только основного материала трубы (рис. 3, а), но и материала сварного шва этой же трубы (рис. 3, б).

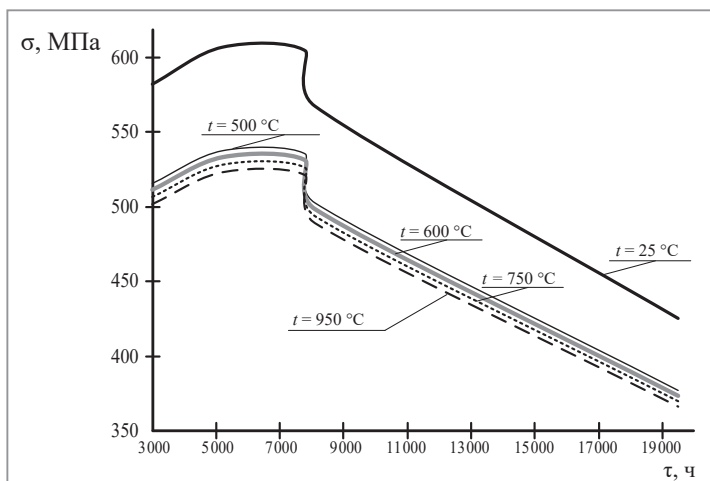


Рис. 2. Результаты расчета изменения предела прочности стали 10Х23Н18 в зависимости от времени наработки изделия и температуры [1]

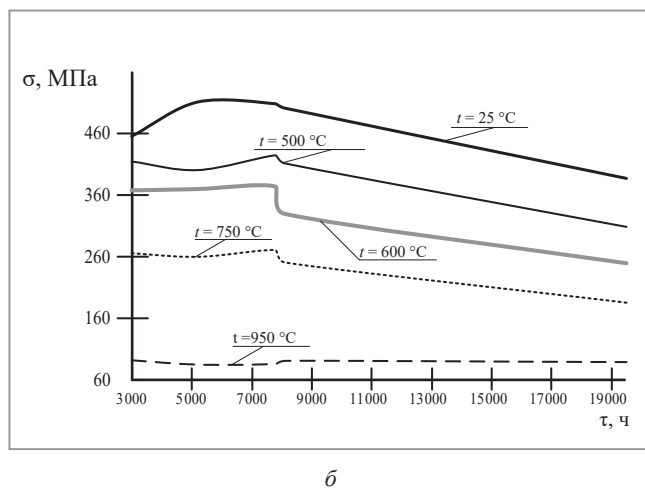
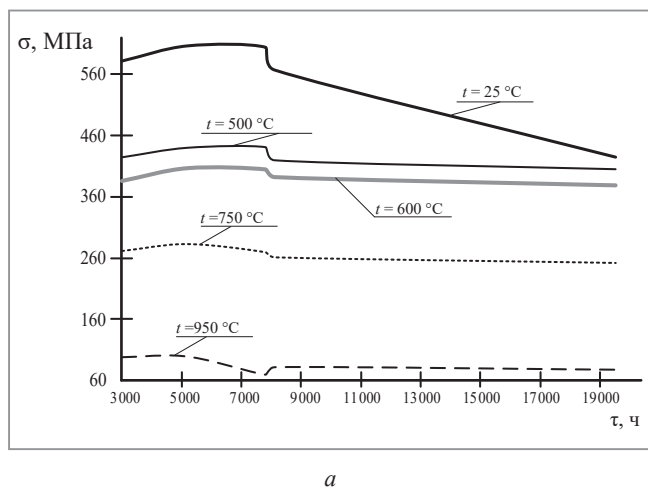


Рис. 3. Результаты экспериментальных исследований изменения предела прочности стали 10Х23Н18 в зависимости от времени наработки изделия и температуры [1]: а – основной материал трубы; б – сварной шов

Для математического моделирования влияния срока службы трубы на предел прочности ее материала выбрана модель [1, 8]

$$\sigma_B^{t,\tau} = \sigma_B^{t,0} \left(\frac{\tau^*}{\tau_0} \right)^{m_{\sigma_B}}, \quad (8)$$

где τ_0 – время при кратковременном статическом разрыве; τ^* – текущее время нагружения; m_{σ_B} – экспериментально определяемый показатель степени:

$$m_{\sigma_B} = \lg \left(\frac{\sigma_B^{t,0}}{\sigma_B^{t,\tau^*}} \right) \lg \left(\frac{\tau^*}{\tau_0} \right). \quad (9)$$

Как видно из рис. 2, 3, а, реальные функции значений предела прочности совпадают только на температуре 25 °С; чем больше температура, тем значительнее расхождения. При этом реальные значения предела прочности меньше расчетных, что опасно с точки зрения оценки работоспособности конструкции.

В таблице приведено сравнение экспериментальных данных по пределу прочности основного металла трубы и сварного шва в зависимости от температуры и времени эксплуатации [1]. При температуре до 750 °С предел прочности основного материала трубы показывает более высокие значения, чем материал шва. При температурах 500 и 600 °С с течением времени эксплуатации трубы эта разница возрастает. При температуре 750 °С наблюдается более сложная зависимость, где материал шва становится крепче материала трубы (хоть и не на большую величину). В области значения температуры около 950 °С с течением времени материал шва становится даже крепче основного материала трубы.

Соотношение предела прочности основного металла трубы ($\sigma_{\text{мат.тр}}$) и сварного шва ($\sigma_{\text{шва}}$) в зависимости от температуры и времени эксплуатации [1]

Время, ч	$((\sigma_{\text{мат.тр}} - \sigma_{\text{шва}}) / \sigma_{\text{мат.тр}}) \cdot 100\%$				
	25 °С	500 °С	600 °С	750 °С	950 °С
3 000	21,56	2,12	4,66	2,21	7,14
5 200	15,60	8,86	8,87	8,16	15,15
7 800	15,73	3,63	7,43	–0,37	–21,43
8 100	11,46	1,67	15,82	4,21	–9,76
19 500	8,71	23,51	34,04	26,59	–12,82

В [9] приведены исследования влияния срока эксплуатации котельной трубы из стали 20 на микроструктуру ее материала (рис. 4). В ходе эксплуатации размер зерен увеличился, особенно это заметно на микроструктуре металла трубы, разрушенной в результате 242 тыс. ч эксплуатации (рис. 4, в) [9]. Средний размер ферритных зерен увеличился в 4 раза, перлитных же колоний – в 2 раза.

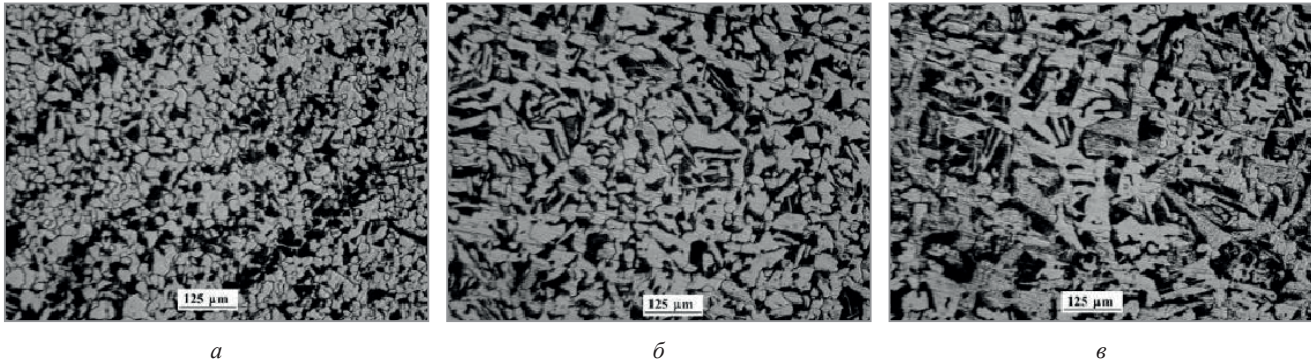


Рис. 4. Микроструктура образцов материала трубы из стали 20 в исходном состоянии (а); после 219 тыс. ч эксплуатации (б) и разрушившегося в результате 242 тыс. ч эксплуатации (в) [9]

Теоретическим методом остаточное время эксплуатации трубопровода можно оценить по зависимости [9]:

$$\tau_{\text{ост}} = \frac{\tau_{\text{тек}} (K_{\text{удл}} - K_{\text{с.-м}})}{K_{\text{удл}}}, \quad (10)$$

где $\tau_{\text{тек}}$ – текущее время эксплуатации трубопровода; $K_{\text{удл}}$ – коэффициент технического состояния оборудования в момент локализации процесса деформации на эксплуатируемом изделии; $K_{\text{с.-м}}$ – структурно-механический критерий:

$$K_{\text{с.-м}} = \left(\frac{\sigma_{\text{д}} a_2 - a_1}{\sigma_{\text{л}} a_2 + a_1} \right) K^{\text{кр}} K^{\text{пов}}, \quad (11)$$

где $\sigma_{\text{д}}$ – напряжение, действующее в местах с избыточной плотностью дислокаций; $\sigma_{\text{л}}$ – напряжение сдвига; a_1, a_2 – деформационный показатель; $K^{\text{кр}}$ – коэффициент кратковременной сопротивляемости; $K^{\text{пов}}$ – поправочный коэффициент.

Данная методика оценки остаточного времени эксплуатации трубопровода требует значительных временных затрат, в том числе и на проведение экспериментальных исследований.

Описание материала исследований

Для исследований влияния времени эксплуатации трубы на изменение ее механических характеристик выбран отрезок (сталь 20, 159×8 мм) змеевика печи подогрева кубового продукта ректификационной колонны. Данный змеевик находился в эксплуатации 131 400 ч. Внутри змеевика прокачивали дизельное топливо, снаружи – дымовые газы. Температура эксплуатации – от 370 до 800 °С. Из материала трубы змеевика изготавливали образцы для проведения испытаний на разрыв. Для сравнения идентичные образцы изготавливали из металла новой трубы. Опыты на разрыв проводили после нагрева образцов от комнатной температуры до 500 °С (рис. 5).

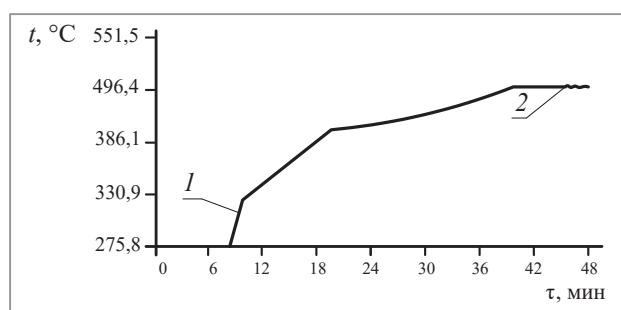


Рис. 5. Изменение температуры нагрева образца:
1 – не показана часть графика, начиная от комнатной температуры; 2 – точка начала опыта

В ходе испытаний на растяжение получены зависимости напряжение – деформация, показанные на рис. 6.

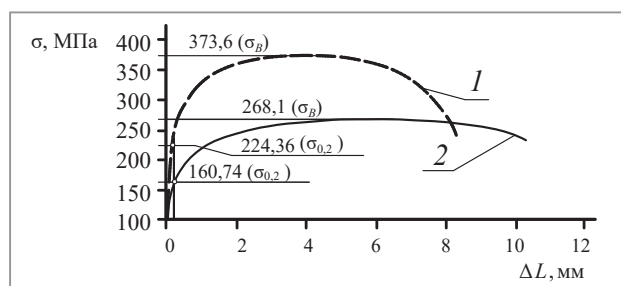


Рис. 6. Влияние степени деформации на условный предел текучести и предел прочности металла трубы из стали 20:
1 – новая труба; 2 – труба после 131 400 ч эксплуатации

Из рис. 6 видно, что в ходе 131 400 ч эксплуатации трубы прочностные характеристики металла снизились при незначительном увеличении характеристик пластичности. Уменьшение показателя условного предела текучести составило 39,94 %, предела прочности – 40,05 %.

Предел прочности материала бывшей в эксплуатации трубы $\sigma_{B1} = 268,1$ МПа, металла новой трубы $\sigma_{B2} = 373,6$ МПа. Интересно, что образцы трубы, бывшей в эксплуатации, до достижения предела прочности получили на 25 % большую деформацию (по вытяжке), чем образцы, изготовленные из новой трубы.

В ходе исследований методом термомеханических коэффициентов произведены расчеты ожидаемых величин истинного предела текучести материала обеих труб. При этом учитывались такие факторы, как

температура, степень и скорость деформации. Для обеих труб в качестве σ_{T0} принималось табличное значение $\sigma_{T0} = 85$ МПа (при $t = 1000$ °С, $\varepsilon = 0,1$, $u = 10$ с⁻¹). Получены следующие значения σ_{TI} :

- для металла новой трубы $\sigma_{TI.1} = 248,2$ МПа (относительно экспериментальных данных больше на 10,6%);
- для металла трубы, прошедшей 131 400 ч эксплуатации, $\sigma_{TI.2} = 251,4$ МПа (относительно экспериментальных данных больше на 56,4%).

Исходя из полученных расчетов, можно сделать вывод, что σ_{T0} металла бывшей в эксплуатации трубы существенно отличается от табличных данных. Использование общепринятых значений σ_{T0} для теоретической оценки такого типа прочностных характеристик недопустимо. Следует экспериментальным методом определять истинное значение σ_T . Если же используются теоретические методы, то необходимо учитывать влияние времени эксплуатации конструкции на изменение механических характеристик ее металла (проверенным, неоднократно используемым методом).

При этом даже если конструкция длительное время эксплуатировалась при температуре окружающей среды, наблюдаются значительные изменения микроструктуры металла и его механических характеристик. Об этом свидетельствуют результаты исследований эксплуатационных характеристик металла швеллера из Ст3 с 86-летним сроком эксплуатации в строительной конструкции (рис. 7) [7].

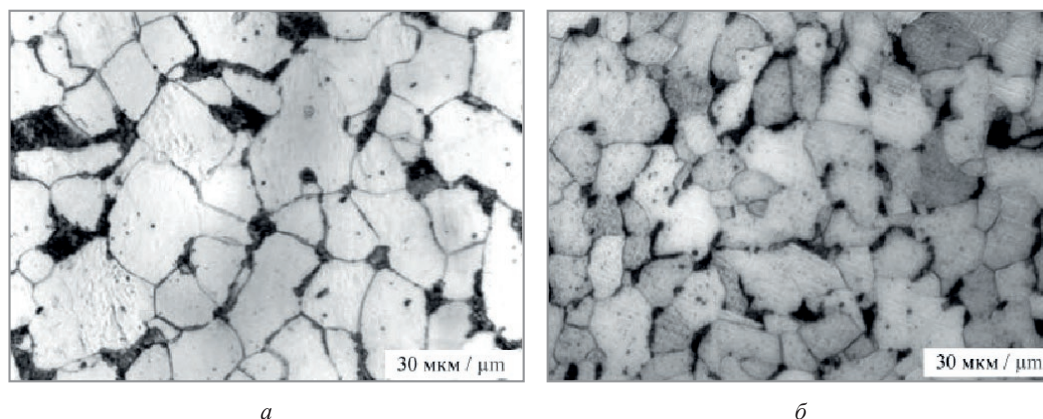


Рис. 7. Микроструктура образцов металла трубы из Ст3 в исходном состоянии (а); после эксплуатации на протяжении 86 лет (б) [7]

Как видно из рис. 7, в микроструктуре наблюдаются изменение морфологии перлита, разнотернистость и фрагментарная перестройка структурных элементов [7].

Выводы

Современные теоретические методы вычисления прочностных характеристик для материалов деталей технологического оборудования, испытывающих воздействие высоких температур и (или) агрессивных сред после длительной эксплуатации, определяют завышенные показатели. Использование их в расчетах на длительную прочность дает искаженные, не соответствующие действительности результаты. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют, что в результате длительной эксплуатации крекингowych труб прочностные характеристики их материала уменьшаются: предел текучести снизился на 39,4%, предел прочности – на 40,05% при повышении пластичности относительно материала труб, не бывших в эксплуатации. Поэтому совершенствование методики определения прочностных характеристик материалов, бывших в длительной эксплуатации при повышенных температурах, с использованием современного оборудования позволит существенно скорректировать данные для определения остаточного срока службы нефтехимического оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Расчетно-экспериментальная оценка изменений механических характеристик аустенитной стали в процессе эксплуатации / А.Г. Чиркова [и др.] // Науч. тр. НИПИ Нефтегаз ГНКАР. – 2019. – № 4. – С. 67–72.
2. Рентгенодilatометрические температурные исследования стенки котельной трубы / А.С. Заворин [и др.] // Изв. Томского политех. ун-та. – 2006. – Т. 309, № 5. – С. 103–106.
3. Evolution of dislocation patterns in fee metals / P.Landau [et al.] // Mater. Sci. Engng. – 2009. – Vol. 3. – P. 012004.
4. Liu, B.The axial crack testing model for long distance oil-gas pipeline based on magnetic flux leakage internal inspection method / B. Liu, L. Y. He, Y. Cao // Measurement. – 2017. – Vol. 103. – P. 275–282.

5. **Пилипенко, С. В.** Теоретические основы холодной пильгерной прокатки труб / С. В. Пилипенко. – Новополюцк: Полоцкий гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой, 2022. – 288 с.
6. **Клименко, П. Л.** Упрочнение стали при горячей деформации / П. Л. Клименко. – Днепропетровск: Пороги, 2009. – 103 с.
7. **Шахабов, М. М.** Эксплуатационные характеристики стальных конструкций длительного срока эксплуатации / М. М. Шахабов, А. Б. Сивенков, Д. А. Корольченко // Вестн. МГСУ. – 2023. – Т. 18, № 6. – С. 864–879.
8. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Безопасность средств хранения и транспорта энергоресурсов / Н. А. Махутов. – М.: МГОФ «Знание», 2019. – 928 с.
9. **Абабков, Н. В.** Методология прогнозирования и оценки остаточного ресурса конструкционной и хромомолибденованадиевых сталей с применением структурно-механического критерия: дис. ... д-р техн. наук / Н. В. Абабков. – Томск, 2024. – 300 с.

REFERENCES

1. **Chirkova A. G., Mahutov N. A., Kuzev I. R., Gafarova V. A.** Raschetno-jeksperimental'naja ocenka izmenenij mehanicheskikh harakteristik austenitnoj stali v processe jekspluatatsii [Computational and experimental evaluation of changes in the mechanical characteristics of austenitic steel during operation]. *Nauchnye trudy NIPi Neftegaz GNKAR = Scientific works of NIPi Neftegaz SOCAR*, 2019, no 4, pp. 67–72.
2. **Zavorin A. S., Makeev A. A., Ljubimova L. L., Tashlykov A. A.** Rentgenodilatometricheskie temperaturnye issledovaniya stenki kotel'noj trubicy [X-ray dilatometric temperature studies of the boiler pipe wall]. *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta = News of Tomsk Polytechnic University*, 2006, vol. 309, no. 5, pp. 103–106.
3. **Landau P., Shneck R. Z., Makov G., Venkert A.** Evolution of dislocation patterns in fee metals. *Mater. Sci. Engng*, 2009, vol. 3, p. 012004.
4. **Liu B., He L. Y., Cao Y.** The axial crack testing model for long distance oil-gas pipeline based on magnetic flux leakage internal inspection method. *Measurement*, 2017, vol. 103, pp. 275–282.
5. **Pilipenko S. V.** *Teoreticheskie osnovy holodnoj pil'gernoj prokatki trub* [Theoretical foundations of cold pilger pipe rolling]. Novopolock, Polockij gos. un-t im. Evfrosinii Polockoj Publ., 2022, 288 p.
6. **Klimenko P. L.** *Uprochnenie stali pri gorjachej deformatsii* [Hardening of steel during hot deformation]. Dnepropetrovsk, Porogi Publ., 2009, 103 p.
7. **Shahabov M. M., Sivenkov A. B., Korol'chenko D. A.** Jekspluatatsionnye harakteristiki stal'nyh konstrukcij dlitel'nogo sroka jekspluatatsii [Operational characteristics of long-life steel structures]. *Vestnik MGSU = MGSU Bulletin*, 2023, vol. 18, no. 6, pp. 864–879.
8. **Mahutov N. A.** *Bezopasnost' Rossii. Pravovye, social'no-jekonomicheskie i nauchno-tehnicheskie aspekty. Bezopasnost' sredstv hranenija i transporta jenergoresursov* [Russia's security. Legal, socio-economic, scientific and technical aspects. Safety of energy storage and transport facilities]. Moscow, MGOF «Znanie» Publ., 2019, 928 p.
9. **Ababkov N. V.** *Metodologija prognozirovaniya i ocenki ostatochnogo resursa konstrukcionnoj i hromomolibdenovanadijevych stalej s primeneniem strukturno-mehanicheskogo kriterija: dis. ... dokt. tekhn. nauk* [Methodology for forecasting and estimating the residual life of structural and chromium-molybdenum-vanadium steels using a structural and mechanical criterion: dis. ... doc. tech. sciences]. Tomsk, 2024, 300 p.