

Расчетно-экспериментальные исследования остаточного ресурса длительной прочности легированных жаропрочных сталей



О. Ю. Ганзуленко,
доцент кафедры
материаловедения
и технологии
художественных изделий¹,
канд. техн. наук, эл. почта:
Ganzulenko_OYu@pers.spmi.ru



А. В. Емельянов,
заведующий научно-
испытательной лабораторией
конструкционных
и строительных материалов
«Политехтест КСМ»², эл. почта:
a.emelianov@onti.spbstu.ru



Ю. Э. Хангу,
ведущий инженер научно-
испытательной
лаборатории
конструкционных
и строительных материалов
«Политехтест КСМ»²,
канд. техн. наук, эл. почта:
khangu2010@yandex.ru

Приведены фундаментальные исследования материала для изготовления энергетического и химического оборудования с целью обеспечения надежности его работы и длительной эксплуатации в условиях высоких температур и коррозионно-агрессивных сред. Представлена методика расчета остаточного ресурса длительной прочности жаропрочных сталей после их продолжительной эксплуатации при повышенных температурах для прогнозирования и определения возможности их дальнейшей работы после выработки ресурса материала без дополнительной обработки. Для стали 10X2M, применяемой для производства промышленных емкостей, работающих под давлением при высоких температурах, приведены расчеты с использованием экспресс-метода, проведены испытания на длительную прочность данной марки стали после ее эксплуатации, выполнен анализ полученных экспериментальных и расчетных данных. Представлены исследования микроструктуры методом оптической металлографии, проведена оценка микроповрежденности металла и степени деградации структуры образцов отработанного материала и образцов после разрушения при испытаниях на длительную прочность отработанной стали. Проанализировано изменение структуры, характер зависимости длительной прочности отработанной стали, рассмотрены процессы, происходящие при повторной эксплуатации. Анализ полученных данных свидетельствует о восстановлении характеристик зависимости длительной прочности при невысоких нагрузках и повышенных температурах эксплуатации, даны рекомендации по возможности дальнейшего использования элементов энергетического и химического оборудования. В процессе выполнения работы изучена возможность использования статистического метода изучения данных о нагрузках, воздействующих на металл при высоких температурах, которая позволяет определить негативные последствия от условий эксплуатации, увеличить точность прогнозирования срока службы элементов конструкций, а также использовать полученные данные для их повторной эксплуатации. Возможность применения предложенных расчетов по определению остаточного ресурса сталей подтверждена результатами металлографических исследований.

Ключевые слова: остаточный ресурс, поврежденность металла, длительная прочность, поры ползучести, долговечность, микроструктура.

DOI: 10.17580/chm.2024.09.07

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия.

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

Введение

С каждым годом все более остро встает вопрос обеспечения надежности работы сосудов, газонефтепроводов и элементов конструкций энергетического оборудования, так как износ различных установок, в том числе и в результате истощения ресурса материалов, из которых они изготовлены, в значительной степени превышает темпы технического обновления во многих отраслях промышленности [1–3]. Большая часть оборудования энергетической промышленности находится в состоянии полного износа. Данный вопрос усугубляется отсутствием научно обоснованной стратегии диагностики оборудования, определения остаточного ресурса материалов, а также несовершенным уровнем эффективности классических методов контроля состояния металла [4–6].

Анализ существующих в настоящее время подходов к оценке остаточного ресурса оборудования, которые применяются в различных отраслях промышленности, позволил выделить несколько общих тенденций. Распространенная ранее тенденция использования вероятностных методик оценки остаточного ресурса, основанная на статистике отказов деталей и конструкций, признана устаревшей. В последние годы для определения остаточного ресурса конкретного оборудования эксперты рекомендуют использовать комплексный подход, который заключается в анализе комплекса испытаний, включающих методы разрушающего и неразрушающего контроля материала, принимая во внимание прочностные расчеты. Разработка и усовершенствование нового диагностического оборудования со специальными пакетами программ для автоматизированного определения структурных параметров, их геометрии и геометрии дефектов заложены

в основе современных методов неразрушающего контроля напряженно-деформированного состояния оборудования и конструкций [7–9].

При длительной эксплуатации оборудования энергетического сектора (химических агрегатов, атомных энергетических установок, оборудования тепловой энергетики), для изготовления большинства которых используют жаропрочные стали, в материале накапливаются и развиваются повреждения даже при отсутствии первоначальных дефектов, которые могли быть получены в изделии при изготовлении конструкций. И даже при соблюдении правил эксплуатации производственного оборудования внутренние процессы, протекающие при его работе, приводят к нарушению работоспособности отдельных конструктивных элементов оборудования [10–12].

Традиционный метод контроля длительной прочности материала предполагает разрушение стандартных образцов, размеры которых должны быть удовлетворены требованиям соответствующих ГОСТов при их изготовлении из элементов конструкций. Испытания образцов проводят под действием статических нагрузок и температуры в течение длительного времени, временная база для испытаний составляет не менее 100–1000 ч [13–15]. По полученным результатам строят зависимости в логарифмических координатах, которые позволяют спрогнозировать остаточный ресурс материала конструкции производственного оборудования. Существующий метод оценки остаточного ресурса длительной прочности является экономически невыгодным. Иногда такие испытания требуют остановки производственного процесса на значительный период времени, что не всегда может быть допустимо в условиях того или иного производства, а в некоторых случаях проведение соответствующих испытаний может быть существенно осложнено.

Целью данного исследования является применение уже существующего экспресс-метода [13] для оценки остаточного ресурса и анализа механизмов повреждения на микроуровне, происходящих в отработанном материале при испытаниях на длительную прочность, а также влияния этих повреждений на получаемые характеристики.

Материал и методика исследования

В основе проведения расчетов лежит уравнение состояния материала Ньютона для вязкой жидкости и зависимость коэффициента вязкости среды от температуры и напряжения. Для описания скорости ползучести воспользуемся выражением

$$\xi_c = \frac{\sigma}{\eta^*} e^{-(U_0 - m^* \sigma) / kT}, \quad (1)$$

где ξ_c — скорость ползучести; σ — условное напряжение; U_0 — начальная энергия активации процесса разрушения; m^* — структурный параметр (элементарный объем); k — постоянная Больцмана ($1,381 \cdot 10^{-23}$ Дж/К) [16]; η^* — эффективная вязкость.

Переход для расчета зависимости долговечности материала от модели ползучести материала к модели длительной прочности может использовать в своей основе такой критерий длительной прочности, который сможет

продемонстрировать взаимосвязь процесса усталости материала при статической нагрузке в зависимости от деформации ползучести (скорости деформации) и долговечности [17]. Если допустить, что на стадии установившейся ползучести описанные выше процессы происходят согласованно, то условие для длительной прочности можно записать в виде [18]

$$\xi_c \cdot t = \varepsilon_{c, \text{пред}} = \text{const}, \quad (2)$$

где $\varepsilon_{c, \text{пред}}$ — предельная деформация ползучести; t — продолжительность работы материала до разрушения. Предельную деформацию ползучести берут в расчет на установившемся участке. Тогда выражение для расчета длительности работы материала до разрушения можно записать в виде

$$t = \frac{\eta^* \varepsilon_{c, \text{пред}}}{\sigma} e^{(U_0 - m^* \sigma) / kT} = \frac{\eta_e^*}{\sigma} e^{(U_0 - m^* \sigma) / kT}, \quad (3)$$

где $\eta^* \varepsilon_{c, \text{пред}} = \eta_e^*$ — параметр, пропорциональный эффективному коэффициенту вязкости.

Полученные выражения можно сравнить с известной формулой Журкова [19]. Видно, что используя для расчета относительно высокие напряжения при проведении вычислений по формуле (1), можно провести аналогию с выражением С. Н. Журкова

$$t = t_0^* e^{(U_0 - \gamma \sigma) / kT}, \quad (4)$$

где $t_0^* = 10^{-13}$ с обозначает смысловую нагрузку периода тепловых колебаний атомов [19]; γ — структурный параметр материала.

Анализ выражения (3) позволяет сделать заключение, что долговечность материала является неограниченной при нулевых нагрузках. При наличии у материала физического предела длительной прочности σ^* формулу (4) можно представить следующим образом:

$$t = \frac{\eta_e^*}{\sigma - \sigma^*} e^{(U_0 - m^* \sigma) / kT}, \quad (5)$$

предсказывая неограниченную долговечность материала уже при физическом пределе длительной прочности. При $T(K) = \text{const}(t)$ выражение (1) принимает вид

$$t = \frac{\eta_e^0}{\sigma} e^{-\left(\frac{\sigma}{m}\right)}, \quad (6)$$

в котором для расчета взяты следующие константы:

$$\eta_e^0 = \eta_e^* e^{U_0 / kT}, \quad \eta^0 = \eta_e^0 / \varepsilon_{c, \text{пред}} \quad \text{и} \quad m = kT / m^*, \quad (7)$$

где η^0 — условная вязкость; η_e^0 — параметр, пропорциональный условной вязкости.

Результаты определения длительной прочности стали 20ХМФЛ представлены на рис. 1. Испытания проводили при температуре 540 °С, численные данные для расчета заимствованы из работы [20]. Обработку литературных данных проводили поэтапно. Сначала с помощью программы GetDataGrpфDigitizer оцифровали представленные результаты, затем с использованием программы Origin 8 устанавливали корреляционные уравнения в полулогарифмических координатах ($\sigma - \lg(t/t_0)$, $t_0 = 1$ с).

Уравнение аппроксимации для данных материала стали имеет вид

$$\sigma = 430,9 - 67,19 \lg(t/t_0),$$

а постоянные уравнения (6) равны $m = 29,18$ МПа и $\eta_e^0 = 6,801 \cdot 10^8$ МПа·ч.

С учетом полученных коэффициентов расчетная кривая для исходного материала представлена на рис. 1 (черная линия).

Черными точками показаны результаты испытаний образцов того же металла при температуре 540 °С, изготовленных из изделия после его эксплуатации в течение 108 тыс. ч.

В соответствии с предложенным в работе [13] экспресс-методом вычислили отношение пределов длительной прочности отработанного и исходного металла при длительности 10 ч:

$$(196,5 : 363,7) = 0,54,$$

а затем — новые коэффициенты уравнения искомой зависимости:

$$m = 0,54 \cdot 29,18 = 15,757 \text{ МПа}, \quad \eta_e^0 = 0,54 \cdot 6,801 \cdot 10^8 = 3,7 \cdot 10^8 \text{ МПа·ч.}$$

Расчетная прямая, построенная по уравнению с использованием скорректированных коэффициентов, показана на этом же рисунке красной линией; она находится в удовлетворительном согласии с прямыми опытными данными для отработанного металла (точки показаны черным цветом) в диапазоне от 10 до 2000 ч.

Аналогичный результат получен в работе [13] для стали 12ХМ после ее эксплуатации в агрессивной газосырьевой среде. Продолжительность наработки ресурса стали составила 330 тыс. ч, температура эксплуатации 300 °С. Снижение длительной прочности также установлено для отработанных жаропрочных сталей марок 08Х13, 15Х5М, 15ХМ, 12Х18Н9, 20ХМФ1 и других в диапазоне температур 380–550 °С.

В данной работе предложенный метод прогнозирования остаточной долговечности исследован для стали 10Х2М, применяемой для производства промышленных емкостей, работающих под давлением, а также для оборудования нефтехимической промышленности. Выбор марки стали обусловлен более широкой областью ее применения (предназначена для изготовления парогенераторов стационарных АЭУ на быстрых

нейтронах, работающих при повышенных (до 510 °С) температурах в контакте с жидким натрием, водой, паром и для теплообменного оборудования тепловых электростанций, а также для изделий нефтехимической промышленности) по сравнению с более распространенной сталью 12Х1МФ, применяемой для производства труб пароперегревателей, коллекторов высокого давления, эксплуатируемых на тепловых станциях. Образцы из стали марки 10Х2М были в эксплуатации в течение 148 тыс. ч при температуре 325 °С. Испытания на длительную прочность проводили на комплексе РУП лаборатории «Политехтест КСМ» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Установка соответствует требованиям ГОСТа 28845–90 [21]. Предел допустимой относительной погрешности приложения нагрузки к образцу составляет +/- 1 %, предел допустимой погрешности регулирования температуры +/- 4 °С, точность определения времени до разрушения образца +/- 1 с. Металлографическое исследование микроструктуры образцов проводили с помощью оптического микроскопа Carl Zeiss Axio Observer A1.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 2 представлены результаты определения длительной прочности для стали 10Х2М при температуре испытаний 650 °С. Заметим, что в работе [22] отсутствуют результаты испытаний на определение длительной прочности стали в состоянии поставки при данной температуре. В связи с этим для проведения расчетов константы выражения (3) обработали экспериментальные данные из источника [22], определенные для температуры 500 °С, а затем их пересчитали для температуры проведенных испытаний:

$$U_0 = 5,641 \cdot 10^{-13} \text{ МН·м}, \quad m^* = 3,819 \cdot 10^{-16} \text{ м}^3, \quad \eta_e^* = 6,724 \cdot 10^{-15} \text{ МПа·ч.}$$

Из графика на рис. 2 видно, что при продолжительности испытаний длительной прочности исходного (черная линия на рисунке) и отработанного металлов (красная линия) более 200 ч, данные практически не отличаются, а при менее 200 ч сравниваемые значения долговечности могут существенно различаться. Это означает, что при меньших значениях напряжений зависимость длительной прочности

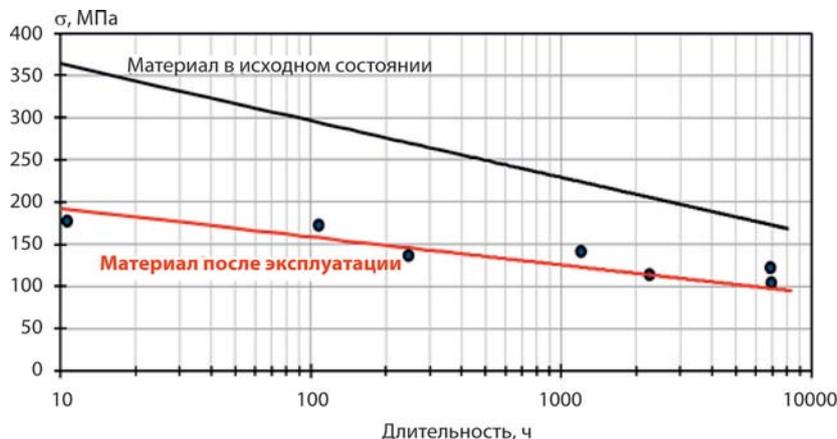


Рис. 1. Расчетные зависимости длительной прочности и экспериментальные данные (точки черного цвета на графике) для стали 20ХМФЛ при температуре испытаний 540 °С [13]

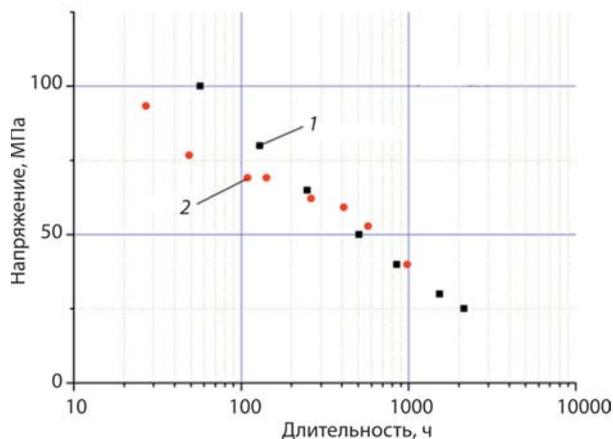


Рис. 2. Расчетные (1) и экспериментальные (2) данные длительной прочности для стали 10X2M при температуре испытаний 650 °С

возвращается к первоначальным показателям неотработанного материала.

В процессе эксплуатации стали при высоких температурах происходит изменение ее структуры, так называемое эксплуатационное старение, в результате которого имеет место сфероидизация перлитно-бейнитных колоний, выделяемые карбиды располагаются неравномерно по границам и внутри зерен феррита, вытягиваясь в неравномерные цепочки [23, 24]. Вследствие явления ползучести под действием нагрузок, особенно со сложной схемой нагружения для длинных трубопроводов с изгибами [25], развивается процесс повреждения металла, начинающийся с образования микропор, которые со временем сливаются в более крупные и образуют цепочки пор с дальнейшим формированием микротрещин [26, 27]. Наибольшая интенсивность структурных изменений и повреждаемости металла ввиду накопления пластической деформации происходит в поверхностном слое высоконагруженных деталей [28], а также в области сварных соединений сталей [11, 29, 30].

На **рис. 3** представлена структура стали 10X2M после окончания выработанного ресурса. В соответствии с Приложением 2 [31], в структуре наблюдается значительная степень сфероидизации с расположением сфероидов цемента на периферии зерен и отсутствием границ перлитных колоний, что соответствует баллу 5. Микроповрежденность в соответствии с Приложением 3 [31], незначительная, соответствует баллу 2 и характеризуется наличием единичных пор ползучести.

Структуру образцов отработанной стали после испытаний на длительную прочность изучали методом оптической металлографии. Полученные результаты представлены в **таблице** (номер образца соответствует порядковому номеру красной точки на графике рис. 2 слева направо).

По результатам проведенных исследований установлено, что изменения, происходящие в микроструктуре стали, находятся в рамках одного балла изменений в структуре в соответствии с эталонами, и высший балл полной сфероидизации перлита можно присвоить только последнему образцу (№ 8) — 984 ч, где внутри зерна размер и число карбидов уменьшаются,

Микроструктура стали после разрушения образцов при испытаниях на длительную прочность отработанного материала

Номер образца	$\sigma_{650}^{\text{С}}$, МПа	Длительность до разрушения, ч	Микроструктура образца, ×1000
1	93	27	
2	76	49	
3	69	110	
6	62	262	
8	40	984	

а по границам зерен — возрастают. Микроповрежденность стали не сопровождается существенным увеличением количества пор ползучести, слияния пор и микротрещин также не наблюдается. Следует отметить, что по мере увеличения

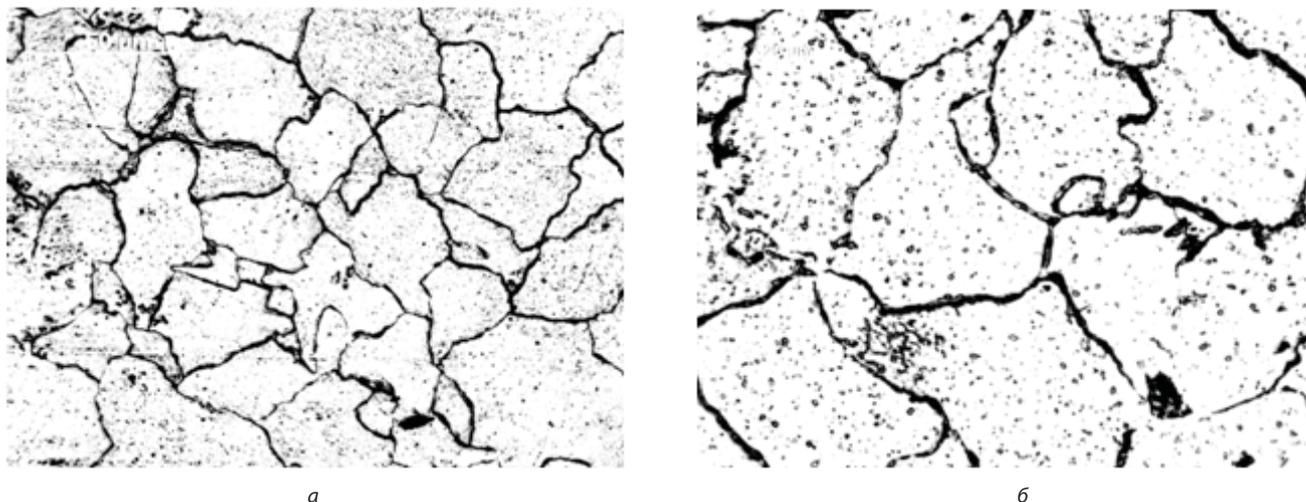


Рис. 3. Микроструктура стали 10X2M после завершения периода эксплуатации, x500 (а); x1000 (б)

продолжительности нахождения материала при температуре 650 °С в структуре снижается содержание сфероидов внутри зерен феррита, а по границам зерен образцов № 2 и 3 наблюдаются участки перлитных колоний с зернистыми карбидами. Это обстоятельство, вероятно, связано с благоприятными структурными изменениями в материале при достаточно высоких температурах. По мере возрастания времени до разрушения образцов наблюдается увеличение размера зерна феррита от 5–6 до 3–4 баллов по ГОСТ 5639–82 [32], что подтверждается данными графика, представленного на рис. 2: длительная прочность образцов коррелирует с расчетными данными длительной прочности неотработанного материала.

С целью восстановления служебных свойств материала можно применить восстановительную термическую обработку, которая, как правило, заключается в нормализации и высокотемпературном отпуске [33–35]. В результате подбора параметров восстановительной термообработки микроструктуру стали можно восстановить, и она будет иметь состав структурных составляющих, приближенных к состоянию поставки материала [36–38]. Также для повышения долговечности жаропрочных сталей авторами работы [11] предложено создание защитных диффузионных слоев хромированием либо силицированием.

Заключение

Исследование структуры материалов при испытаниях на длительную прочность является важным этапом в разработке

и оптимизации материалов для различных промышленных и инженерных приложений, особенно работающих в сложных условиях эксплуатации.

Представленные результаты позволяют выявить характер и механизмы повреждения, происходящие в материале при высокотемпературных испытаниях на микроуровне, а также оценить их влияние на длительную прочность материалов.

При анализе микроструктуры стали выявлено, что с увеличением длительности эксплуатации отработанного материала существенная деградация структуры не наблюдается; балл изменений микроструктуры, кроме последнего образца (№ 8), и балл микроповрежденности стали остаются на том же уровне, что и до проведения испытаний.

Полученные результаты расчетных и экспериментальных данных показали возможности использования оценки остаточного ресурса стали 10X2M, а также эксплуатации отработанной стали при высоких температурах и пониженных нагрузках в течение определенного времени, даже без применения восстановительной термообработки, которая является энергозатратной технологией.

Библиографический список

См. англ. блок

“Chernye metally”, 2024, No. 9, pp. 44–49
DOI: 10.17580/chm.2024.09.07

Calculation and experimental studies of the residual resource of long-term strength of alloyed heat-resistant steels

Information about authors

O. Yu. Ganzulenko, Cand. Eng., Associate Prof., Dept. of Materials Science and Technology of Art Products¹, e-mail: Ganzulenko_OYu@pers.spmi.ru;

A. V. Emelyanov, Head of the Scientific Testing Laboratory of Structural and Building Materials “Polytehtest KSM”², e-mail: a.emelianov@ontis.spbstu.ru;

Yu. E. Khangu, Cand. Eng., Leading Engineer, Scientific Testing Laboratory of Structural and Building Materials “Polytehtest KSM”², e-mail: khangu2010@yandex.ru

¹ Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia.

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia.

Abstract: The article is devoted to the fundamental research of the material for energy and chemical equipment in order to ensure operational reliability and long-term operation in conditions of high temperatures and corrosive environments. The paper presents a methodology for calculating the residual life of long-term strength of heat-resistant steels after their long-term operation at elevated temperatures to predict and determine the possibility of their further operation after the material’s service life has been exhausted without additional processing. For steel 10Kh2M,

calculations are presented using the express method, tests are carried out for the long-term strength of this steel grade after its operation, and the obtained experimental and calculated data are analyzed. A study of the microstructure by optical metallography is presented, as a result of which the micro-damage of the material was assessed. The degradation score of the structure of samples of used material and samples after destruction during long-term strength tests of used steel was also determined. The changes in structure and the dependence character of the long-term strength of the used steel are analyzed, and the processes occurring during reuse are considered. Analysis of the data obtained indicates the restoration of the characteristics of the dependence of long-term strength at low loads and elevated operating temperatures, recommendations are given on the possibility of further usage of power and chemical elements equipment. In the process of carrying out the work, the possibility of using a statistical method for studying data on loads acting on metal at high temperatures was explored, which makes it possible to determine the negative consequences of operating conditions, increase the accuracy of predicting the residual service life of structural elements and use the obtained data for their reuse. The completed study was confirmed by the sufficient information content and reliability of the metallographic research method used to determine the damage to steel to make it possible to apply the proposed calculations to determine the residual life of steels.

Key words: residual life, metal damage, long-term strength, creep pores, durability, microstructure.

References

- Azmetov Kh. A., Pavlova Z. Kh., Azmetov Kh. Kh. Ensuring reliability and safety of main oil pipelines. *Problemy sbora, podgotovki i transportirovki nefiti i nefteproduktov*. 2019. No. 5. pp. 83–94.
- Shammazov I. A., Batyrov A. M., Sidorkin D. I., Van Nguyen T. Study of the effect of cutting frozen soils on the supports of above-ground trunk pipelines. *Appl. Sci*. 2023. Vol. 13. 3139. DOI: 10.3390/app13053139.
- Bolobov V. I., Popov G. G. Methodology for testing pipeline steels for resistance to rill corrosion. *Zapiski Gornogo instituta*. 2021. Vol. 252. pp. 854–860. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.7.
- Perveitalov O. G., Nosov V. V., Borovkov A. I., Khanukhov K. M. et al. Calculation of durability and fatigue life parameters of structural alloys using a multilevel model of acoustic emission pulse flow. *Metals*. 2023. Vol. 13, Iss. 1.4. DOI: 10.3390/met13010004.
- Murmansky B. E., Aronson K. E., Brodov Yu. M. The influence of damageability of equipment of technological subsystems on functional failures of steam turbine units. *Nadezhnost i bezopasnost energetiki*. 2017. No. 10 (4). pp. 322–329. DOI: 10.24223/1999-5555-2017-10-4-322-329.
- Onishkov N. P., Korotkin V. I. On the assessment of contact fatigue life of chemically-thermally strengthened gear wheels. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2017. Vol. 17. No. 3. pp. 5–13. DOI: 10.23947/1992-5980-2017-17-3-5-13.
- Ababkov N. V. Identification of zones of stable localization of deformations by methods of non-destructive testing in structural and heat-resistant steels. *Innovations in mechanical engineering (InMash-2020): proceedings of the XI International scientific and practical conference, Biysk, October 22–23, 2020*. Biysk: Izdatelstvo Altayskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni I. I. Polzunova, 2020. pp. 23–29.
- Smirnov A. N., Ababkov N. V., Oshchepkov N. F. et al. Evaluation of the resource of long-term operating metal of fuel and energy complex equipment based on structural criteria. *Svarka i diagnostika*. 2015. No. 5. pp. 9–12.
- Wenchun Jiang, Shaohua Li, Yun Luo, Shugen Xu. Creep damage analysis of a lattice truss panel structure high temp. *Mater. Proc*. 2017. Vol. 36. Iss. 1. pp. 89–96.
- Dobrotvorskyy A. M., Maslikova E. I., Andreeva V. D. Influence of operational factors on the coils material structure of technological tubular furnaces. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2015. Vol. 81. No. 9. pp. 32–40.
- Dobrotvorskyy A. M., Gyulikhandanov E. L., Maslikova E. I. Degradation of the structure and properties of pipes made of heat-resistant steels after long-term operation at oil refineries. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 2016. No. 1 (238). pp. 136–144.
- Balina O. V., Nasonov V. V. Thermal fatigue of the thermal power plant steam pipeline material. *Inzhenerny vestnik Dona*. 2021. No. 5.
- Grigoryev A. O., Emelyanov A. V., Hangu Yu. E., Sherstnev V. A. Calculation of the long-term strength resource of heat-resistant steels. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 2013. No. 3 (178). pp. 199–205.
- Dobrotvorskyy A. M., Sokolov V. L., Antonov M. I., Shevyakova E. P. et al. Changes in mechanical properties of furnace coil metal during long-term operation. *Khimicheskaya tekhnika*. 2016. No. 1. pp. 26–31.
- Shakhnazarov K. Y., Pryakhin E. I., Troshina E. Y. Rationale for signs of transformation in iron near 200 °C. *Letters on Materials*. 2022. Vol. 12, Iss. 4. pp. 298–302. DOI: 10.22226/2410-3535-2022-4-298-302.
- Arshakuni A. L., Lokoshchenko A. M., Kiselevsky V. N. et al. Regularities of creep and long-term strength: handbook. Edited by S. A. Shesterikov. Moscow: Mashinostroenie, 1983. 101 p.
- Naumenko K., Altenbach H. Modeling high temperature materials behavior for structural analysis. Part I: Continuum Mechanics Foundations and Constitutive Models. Springer, 2016. 381 p.
- Naumenko K., Altenbach H. Modeling high temperature materials behavior for structural analysis. Part II. Solution Procedures and Structural Analysis Examples. Springer, 2019. 224 p.
- Zhurkov S. N. Kinetic concept of the strength of solids. *Int. J. Fracture Mech*. 1965. Vol. 1, Iss. 4. pp. 311–323.
- Brovman M. Ya. Creep deformation of beams under compression and bending stresses. *Mechanics of Solids*. 2017. Vol. 52. Iss. 1. pp. 75–80.
- GOST 28845–90. Machines for creep, long-term strength and relaxation testing materials. General technical requirements. Introduced: 01.01.1993.
- PNAE G-7-002-86. Standards for calculation of strength of equipment and pipelines of nuclear power plants. Introduced: 01.07.1987.
- Ding Kai Jian. Structural-phase transformations of heat-resistant steels and alloys not associated with undergoing polymorphic transformations. *Interaktivnaya nauka*. 2023. No. 5 (81). pp. 53–58. DOI: 10.21661/r-559448.
- Dobrotvorskyy A. M., Gyulikhandanov E. L., Maslikova E. I. Degradation of the structure and properties of pipes made of heat-resistant steels after long-term operation at oil refineries. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Metallurgiya i materialovedenie*. 2016. No. 1 (238). pp. 136–144.
- Bakhtizin R. N., Zaripov R. M., Korobkov G. E., Masalimov R. B. Evaluation of the influence of internal pressure causing additional bending of a pipeline. *Zapiski Gornogo instituta*. 2020. Vol. 242. p. 160. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.160.
- Vologzhanina S. A., Ermakov B. S., Ermakov S. B., Khuznakhmetov R. M. Relationship between operating conditions and the emergence of nano- and ultradispersed grain boundary defects in welded joints. *Tsvetnyye Metally*. 2023. No. 8. pp. 80–85.
- Popov G., Bolobov V., Zhuikov I., Zlotin V. Development of the kinetic equation of the groove corrosion process for predicting the residual life of oil-field pipelines. *Energies*. 2023. Vol. 16, Iss. 20. DOI: 10.3390/en16207067.
- Bezyazychny V. F., Scherek M., Pervov M. L., Timofeev M. V. et al. Study of the influence of temperature on the ability of metals to accumulate energy during their plastic deformation. *Zapiski Gornogo instituta*. 2019. Vol. 235. p. 55. DOI: 10.31897/PMI.2019.1.55.
- Pryakhin E. I., Sharapova D. M. Understanding the structure and properties of the heat affected zone in welds and model specimens of high-strength low-alloy steels after simulated heat cycles. *CIS Iron and Steel Review*. 2020. Vol. 19. pp. 60–65.
- Maksarov V. V., Vasin S. A., Efimov A. E. Dynamic stabilization in reaming internal surfaces of welded components. *Russian Engineering Research*. 2021. Vol. 10. pp. 939–943. DOI: 10.3103/S1068798X2110018X.
- Order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision dated 15.12.2020 No. 535 "On approval of federal norms and rules in the field of industrial safety. Rules for the implementation of operational control of metal and extension of the service life of the main elements of boilers and pipelines of thermal power plants" (Registered 31.12.2020 No. 61985).
- GOST 5639–82. Steels and alloys. Methods of detection and determination of grain size. Introduced: 01.01.1983.
- Bazhin V. Yu., Bashar Issa. Effect of heat treatment on the microstructure of steel coils of a heating tube furnace. *Zapiski Gornogo instituta*. 2021. Vol. 249. pp. 393–400. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.8.
- Dmitriy V. V., Garashchenko E. S., Glushko A. V., Sokolova V. N. et al. Recovery heat treatment of steam pipelines and their welded joints (review). *Avtomaticheskaya svarka*. 2019. No. 1. pp. 18–21.
- Karankevich V. V. Recovery heat treatment as a method for increasing the service life of thermal power plant steam pipelines. *Actual issues of power engineering: proceedings of the 73rd Scientific and technical conference of students and postgraduates*. Belarusian National Technical University, Power Engineering Faculty, Section "Thermal Power Plants". Minsk: BNTU, 2017. pp. 553–556.
- Zavsegolov A. A. Issues of wear of heat power equipment and prospects for the use of recovery heat treatment. *Innovations in mechanical engineering: collection of works of the X International scientific and practical conference, Kemerovo, November 26–29, 2019*. Kemerovo: T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 2019. pp. 583–586.
- Loskutov S. A., Koryagin Yu. D., Bukin Yu. A. Optimization of the structure and properties of long-term operating metal of steam pipelines made of 12Kh1MF steel by recovery heat treatment. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Metallurgiya»*. 2014. Vol. 14. No. 4. pp. 45–51.
- Kudryavtsev A. S., Markova Yu. M., Artemyeva D. A. Changes of steel grade 10Cr2Mo as a result of structural and phase transformations caused by long-term high-temperature operation. *Chernye Metally*. 2023. No. 5. pp. 53–58.