

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

УДК 669.14.018.44 : 621.039.5

**ПЛОТНОСТЬ И КОЭФФИЦИЕНТ ТЕРМИЧЕСКОГО
РАСШИРЕНИЯ СТАЛИ 12Х18Н10Т В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР
ОТ 100-850 °С ДЛЯ РЕАКТОРОВ ВВЭР**

© 2021 А.З. Альхмуд, А.Б. Круглов

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

В статье представлены результаты исследования плотности стали 12Х18Н10Т и коэффициента термического расширения ТКЛР (α) в диапазоне температур от 100 до 850 °С. Измерения проводились с помощью dilatометра DIL-405 С. Сталь 12Х18Н10Т заменит традиционные оболочковые материалы ТВЭЛ, которые изготавливаются из циркониевого материала. Оболочка из стали 12Х18Н10Т может использоваться в качестве толерантного топлива. Показано, что теплофизические свойства и точные dilatометрические результаты исследований стали 12Х18Н10Т, делают возможным использование стальных оболочек в ТВС РУ ВВЭР. В статье приведены результаты сравнения с аналогичными данными системы ГСССД.

Ключевые слова: толерантное топливо, плотность, коэффициент термического расширения, dilatометр.

Поступила в редакцию 01.09.2021

После доработки 08.10.2021

Принята к печати 15.10.2021

Введение

После ядерных аварий, произошедших в мире, возникла необходимость в изучении и разработке материалов, используемых на атомных электростанциях как наиболее важный материал для защиты в активной зоне ядерных реакторов из циркониевых материалов в легководных реакторах [1]. Циркониевая оболочка взаимодействует с водой в процессе охлаждения реактора, и при высоких температурах сильно реагирует, в результате чего образуется большое количество атомов водорода [2, 3]. Поэтому изучаются термические свойства материалов, которые могут быть использованы в качестве альтернативы циркониевому сплаву.

Измерения ТКЛР (α) были проведены на dilatометре DIL-402 С. Для обеспечения точности измерения теплофизических свойств и использования новых конструкционных материалов необходимы эталонные материалы – вещества с известными и стабильными свойствами для использования их в экспериментальных методиках и для контроля исправности экспериментального оборудования. Измерения были проведены по рабочему эталону dilatометра из Al_2O_3 [4].

Исследование влияния циклов нагрева и охлаждения на ТКЛР образцов из стали 12Х18Н10Т

Измерения термического расширения на dilatометре проводится в два этапа. На первом в dilatометр устанавливается рабочий эталон термического расширения и в исследуемом диапазоне температур проводится регистрация сигнала датчика перемещения и температуры. На втором этапе, выполняемом по температурному режиму первого, измерения проводятся с исследуемым образцом. Результат двух

измерений анализируются с помощью программы Proteus Thermal Analysis [4, 5]. На рисунке 1 представлено влияние циклов нагрева и охлаждения на ТКЛР образцов из стали 12X18H10T.

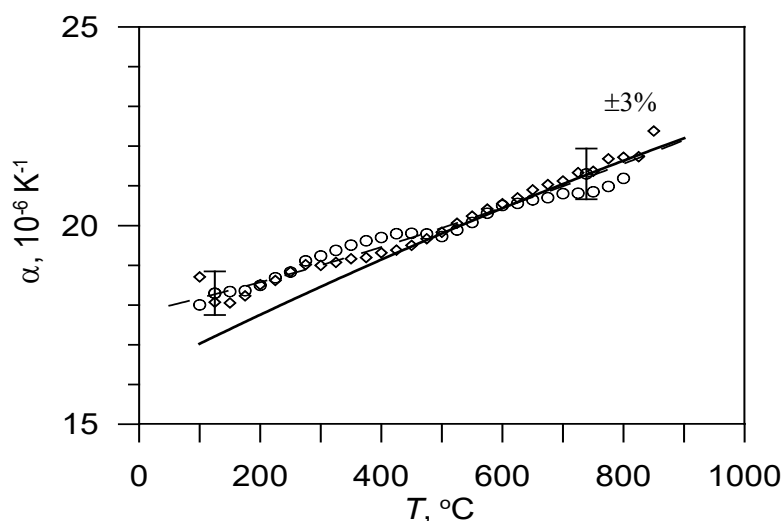


Рисунок 1 – ТКЛР (α) стали 12X18H10T: $\circ$ – один цикл нагрева до $T = 850$ °C; $\diamond$ – 25 циклов нагрева; - - - - - интерполяция результатов измерений; сплошная линия – ТКЛР стали 12X18H10T по данным [6-8] [TEC (α) of steel 12X18H10T: $\circ$ is one heating cycle up to $T = 850$ °C; $\diamond$ is 25 heating cycles; - - - - - is interpolation of measurement results; solid line is TEC of steel 12X18H10T according to [6-8]

На рисунке 2 отражено влияние термоциклирования на ТКЛР стали 12X18H10T.

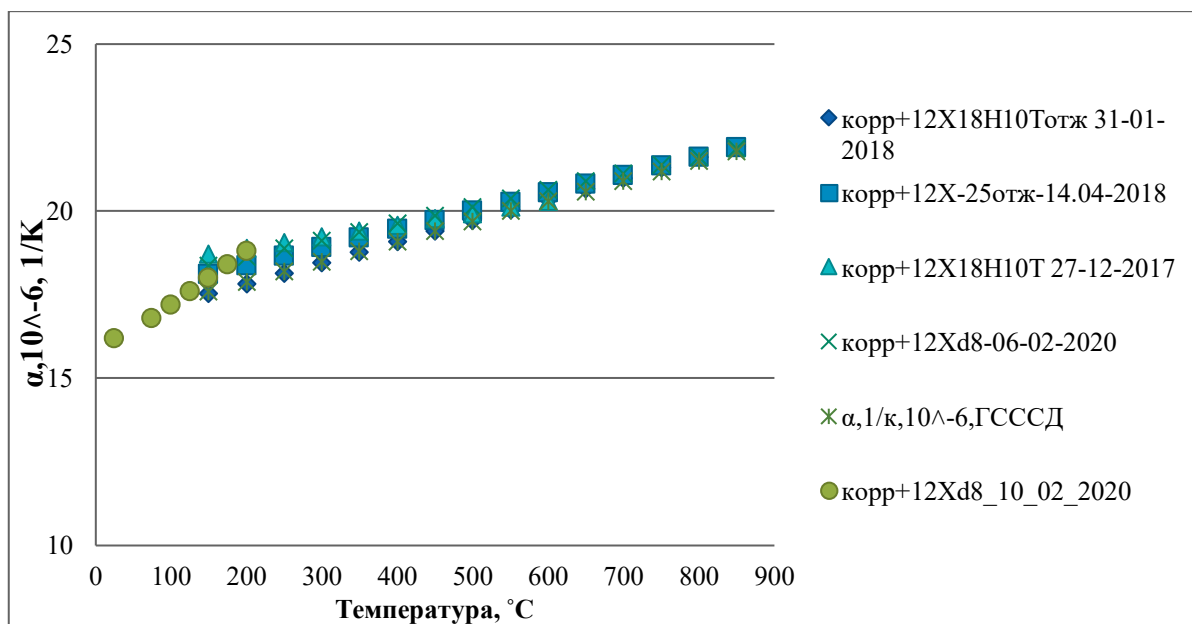


Рисунок 2 – Сравнение данных ТКЛР образца с разницей в год для стали 12X18H10T и данные из ГСССД [Comparison of the TEC data for a sample with a difference in a year for steel 12X18H10T and data from the State Service of Standard Reference Data]

В таблице 1 показана физическая плотность для стали 12X18H10T в интервале температур 100-900 °C. По данным о ТКЛР плотность исследуемого материала рассчитывается по формуле:

$$\rho(T) = \rho(T_0) \times \left(1 + \int_{T_0}^T \alpha(T) dT\right)^{-3},$$

где $\rho(T_0)=7920 \text{ кг/м}^3$ плотность при температуре $T_0 = 20^\circ\text{C}$.

Таблица 1 – Плотность для стали 12X18H10T в интервале температурах 100-900 °C [Density for steel 12X18H10T in the temperature range 100-900 °C]

Температуры, T °C	Плотность, кг/м ³ , ρ
100	7886
200	7841
300	7796
400	7747
500	7697
600	7646
700	7591
800	7529
900	7471

На рисунке 3 представлена графическая зависимость плотности стали 12X18H10T в интервале температур 100-900 °C.

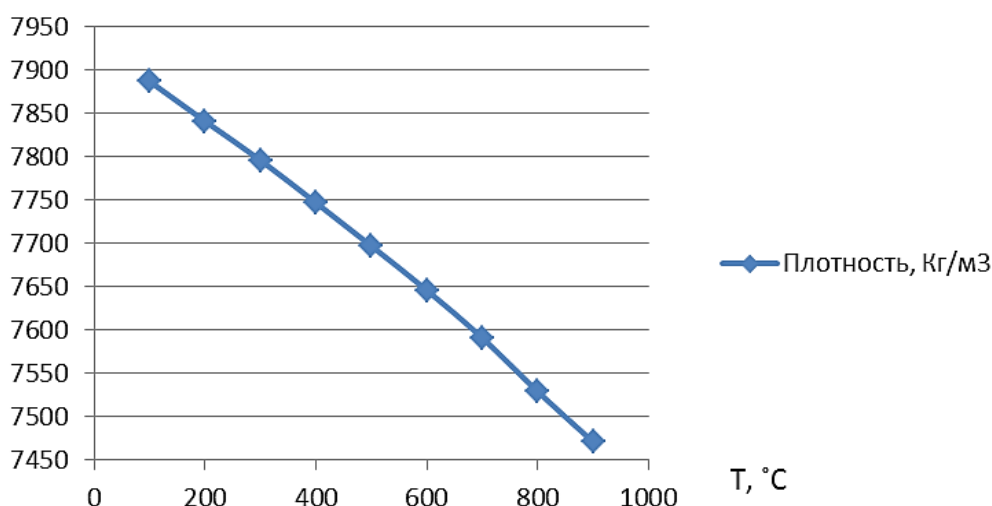


Рисунок 3 – Зависимость плотности стали 12X18H10T в интервале температур 100-900 °C [Dependence of the density of steel 12X18H10T in the temperature range 100-900 °C]

Плотность циркониевого сплава Э-110 составляет $\sim 8000 \text{ кг/м}^3$ [9] при температурах 500°C , а для стали 12X18H10T $\sim 7700 \text{ Кг/м}^3$ при этой же температуре. Эти результаты показывают, что физические свойства материалов близки друг к другу, поэтому они могут быть использованы в ядерных реакторах. Проведен анализ существующих направлений разработки оболочек для толерантного топлива [10-12].

Вывод

Получены новые экспериментальные данные по плотности и коэффициентам термического расширения стали 12X18H10T. Показано хорошее согласие с существующими данными об изменении плотности в исследуемом интервале температур. Испытания стали из 12X18H10T, которые проводились в течение многих лет, показали, что при точных методах измерений, ее коэффициент термического расширения стабилен во времени. Благодаря этому и некоторым другим свойствам

исследованная сталь может быть рекомендована для изготовления и дилатометрии в диапазоне температур 100-850 °С.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириллов, П.Л. Теплофизические свойства материалов ядерной техники / П.Л. Кириллов. – Москва : ИздАТ, 2007. – 194 с.
2. Лескин С.Т., Шелегов А.С., Слободчук В.И. Физические особенности и конструкция реактора ВВЭР-1000: Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2011. – 116 с.
3. Денисов, В.П. Реакторные установки ВВЭР для атомных электростанций / В.П. Денисов, Ю.Г. Драгунов. – Москва : ИздАТ, 2002. – 477 с.
4. Выговский, С.Б. Физические конструкционные особенности ядерных энергетических установок с ВВЭР / С.Б. Выговский, Н.О. Рябов, А.А. Семенов, Е.В. Чернов, Л.Н. Богачек. – Москва : НИЯУ МИФИ, 2011. – 376 с.
5. Походун, А.И. и др. Экспериментальные методы исследований. Измерения теплофизических величин / А.И. Походун, А.В. Шарков. – Санкт-Петербург : СПб ГУ ИТМО, 2006. – 87 с.
6. Группа компаний NETZSCH : официальный сайт www.netzsch.com.
7. Таблицы стандартных справочных данных. Стали 12Х18Н9Т и 12Х18Н10Т. Удельная теплоемкость и удельная энтальпия в диапазоне температур 400-1380К при атмосферном давлении. ГСССД 32-82. – Москва : Издательство Стандартов, 1983.
8. Таблицы стандартных справочных данных. Молибден, монокристаллическая окись алюминия, сталь 12Х18Н10Т. Температурный коэффициент линейного расширения. ГСССД 59-83. – Москва : Издательство Стандартов, 1984.
9. Alhmod A.Z., Kruglov V.B, Internal Report at National Research Nuclear University (MEPhI). – Russia, Moscow, 2019.
10. Massalski, T.B., Okamoto, H., Subramanian, P.R., & Kacprzak, L. (1991). Binary Alloy Phase Diagrams (ASM International, Materials Park, OH, 1990), 2983-2986.
11. Savchenko, A.M., Konovalov, Y.V., Laushkin, A.V., & Yuferov, O.I. (2017). Low-Melting Zirconium Alloys. Letters on Materials, 7(3), 229-233.
12. Самойлов, О.Б. Безопасность ядерных энергетических установок / О.Б. Самойлов, Г.Б. Уснин, А.М. Бахметьев. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 280 с.

REFERENCES

- [1] Kirillov, P.L. Teplofizicheskie svoystva materialov yadernoj tekhniki [Thermophysical Properties of Nuclear Engineering Materials]. Moscow: IzdAT, 2007 (in Russian).
- [2] Leskin S.T., Shelegov A.S., Slobodchuk V.I. Fizicheskie osobennosti i konstrukciya reaktora VVER-1000: Uchebnoe posobie. [Physical Features and Design of the WWER-1000 Reactor: Textbook]. Moscow: NRNU MEPhI, 2011. 116 p. (in Russian).
- [3] Denisov V.P., Dragunov Yu.G. Reaktornye ustanovki VVER dlya atomnyh elektrostancij [WWER Reactor Installations for Nuclear Power Plants]. Moscow: IzdAT, 2002 (in Russian).
- [4] Vygovsky S.B., Ryabov N.O., Semenov A.A., Chernov E.V., Bogachek L.N. Fizicheskie konstrukcionnye osobennosti yadernyh energeticheskikh ustanovok s VVER [Physical Design Features of Nuclear Power Plants with VVER]. Moscow: NRNU MEPhI, 2011. 376 p. (in Russian).
- [5] Pokhodun A.I., Sharkov A.V. Eksperimental'nye metody issledovaniy. Izmereniya teplofizicheskikh velichin [Experimental research methods. Measurements of Thermophysical Quantities]. St. Petersburg: SPb SU ITMO, 2006. 87 p. (in Russian).
- [6] Gruppa kompanij NETZSCH [NETZSCH Group of Companies]: official website www.netzsch.com.
- [7] Tablicy standartnyh spravocnyh dannyh. Stali 12H18N9T i 12H18N10T. Udel'naya teploemkost' i udel'naya ental'piya v diapazone temperatur 400-1380K pri atmosfernom davlenii. GSSSD 32-82 [Tables of Standard Reference Data. Steel 12X18N9T and 12X18N10T. Specific Heat Capacity and Specific Enthalpy in the Temperature Range 400-1380 K at Atmospheric Pressure. Service of Standard Reference Data 32-82]. Moscow: Publishing House of Standards. 1983 (in Russian).
- [8] Tablicy standartnyh spravocnyh dannyh. Molibden, monokristallicheskaya okis' alyuminiya, stal' 12H18N10T. Temperaturnyj koefficient linejnogo rasshireniya. GSSSD 59-83. [Tables of Standard Reference Data. Molybdenum, Monocrystalline Aluminum Oxide, Steel 12X18H10T. Temperature Coefficient of Linear Expansion. Service of Standard Reference Data 59-83]. Moscow: Publishing House of Standards. 1984 (in Russian).

- [9] Alhmoud A.Z., Kruglov V.B Internal Report at National Research Nuclear University (MEPhI). Russia, Moscow, 2019 (in English).
- [10] Massalski, T.B., Okamoto, H., Subramanian, P.R., & Kacprzak, L. (1991). Binary Alloy Phase Diagrams (ASM International, Materials Park, OH, 1990), 2983-2986 (in English).
- [11] Savchenko, A.M., Kononov, Y.V., Laushkin, A.V., & Yuferov, O.I. (2017). Low-Melting Zirconium Alloys. Letters on Materials, 7(3), 229-233 (in English).
- [12] Samojlov, O.B. i dr. Bezopasnost' yadernyh energeticheskikh ustanovok [Safety of Nuclear Power Plants]. Moscow: Energoatomizdat, 1989. 280 p. (in Russian).

Density and Coefficient of Thermal Expansion of 12X18H10T Steel in the Temperature Range from 100-850 °C for WWER Reactors

A.Z. Alhmoud¹, A.B. Kruglov²

National Research Nuclear University «MEPhI», Kashirskoye shosse, 31, Moscow, Russia 115409

¹*ORCID iD: 0000-0002-8213-1455*

e-mail: ahmad_homoud@yahoo.com

²*e-mail: abkruglov@mephi.ru*

Abstract – The article presents the results of studying the density of steel 12Kh18N10T and the coefficient of thermal expansion TEC (α) in the temperature range from 100 to 850°C. The measurements were carried out using a DIL-405 C dilatometer. Steel 12Kh18N10T will replace traditional TVEL cladding materials, which are made of zirconium material. The cladding made of steel 12X18H10T can be used as a Tolerant fuel. It is shown that the thermophysical properties and accurate dilatometric results of studies of steel 12Kh18N10T make it possible to use steel cladding in fuel assemblies of a WWER reactor. The article presents the results of comparison with similar data from the State Service of Standard Reference Data system.

Keywords: accident tolerant fuel, density, coefficient of thermal expansion, dilatometer.