ISSN: 0368–0797. Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2019. Том 62. № 4. С. 290 – 302.
© 2019. *Беломытцев М.Ю., Моляров В.Г.*

УДК 669.14:620.17

ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ ФЕРРИТО-МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ 16Х12МВСФБР (ЭП-823)

***Беломытцев М.Ю.*[1]**, *д.т.н., профессор кафедры металловедения и физики прочности* (myubelom@yandex.ru)

***Моляров В.Г.*[2]**, *к.т.н., старший научный сотрудник, зам. зав. отделом материаловедения и сварки нефтяного оборудования* (molyaron@mail.ru)

[1] Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)
[2] АО «ВНИИНЕФТЕМАШ»
(115191, Россия, Москва, 4-й Рощинский проезд, 19)

Аннотация. Базовыми характеристиками феррито-мартенситных жаропрочных сталей с 12 % хрома являются показатели прочности и сопротивления ползучести при температурах 600 – 750 °С. Сталь 16Х12МВСФБР (ЭП-823) рассматривается как основной материал для изготовления оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) разрабатываемого реактора с естественной безопасностью типа БРЕСТ. В литературе имеются данные о ее механических характеристиках при испытании на растяжение в диапазоне температур 20 – 750 °С и ограниченные характеристики длительной прочности, сведения о скорости ползучести отсутствуют. Закономерности ползучести стали ЭП-823 исследовали на металле трех плавок массой 3 кг каждая. Применяли испытание на сжатие на воздухе цилиндрических образцов размером ~ 5 ÷ 6 мм при температуре 600 − 760 °С и напряжении 70 – 310 МПа. База испытаний при сжатии не превышала 11 ч. Структура после закалки и отпуска состояла из отпущенного мартенсита и 6 – 12 % (объемн.) δ-феррита, размер зерна – не более 20 мкм. Показано, что описание результатов испытаний на ползучесть в двойных логарифмических координатах ($\log\sigma - \log\dot{\varepsilon}$) обеспечивает лучшее совпадение результатов аппроксимации и эксперимента, чем в полулогарифмических ($\sigma - \log\dot{\varepsilon}$). Анализ параметрических зависимостей по Холломону $P_S = (T/1000)[C_S - \log(\dot{\varepsilon})]$ и Ларсену-Миллеру $P_E = (T/1000)[C_E - \log(\sigma)]$ позволил найти уравнения связи для нахождения скорости ползучести для заданного уровня напряжений 100 – 220 МПа в виде $\log(\dot{\varepsilon}) = -19{,}355 + 9{,}17(T/1000)\log(\sigma)$ и пределов ползучести по заданным допускам на скорость ползучести 0,01 – 1 %/ч в виде $\log(\sigma) = 4{,}304 - 0{,}109(T/1000)[20 - \log(\dot{\varepsilon})]$. Расчеты пределов ползучести и скоростей ползучести по парным моделям и моделям Холломона (Ларсена-Миллера) дают близкие результаты, но предпочтение следует отдать описанию по Холломону (Ларсену-Миллеру), поскольку эти модели учитывают все три варьируемых фактора. Приведены результаты контрольных испытаний по схеме растяжения в тех же условиях. Показано, что между результатами испытаний на сжатие и на растяжение при определении характеристик прочности существует линейная зависимость, выражаемая уравнением $\sigma_{0,2\ сж} = 1{,}3\sigma_{0,2\ раст}$. При анализе ползучести установлено, что скорости ползучести для стали одной марки (09Х12В3БР) и одной плавки при разных способах нагружения (растяжении или сжатии) имеют сходные значения, в то время как скорости ползучести для стали одной марки (ЭП-823), но разных плавок даже при одном способе нагружения (сжатии) могут различаться на порядок.

Ключевые слова: жаропрочные стали, высокохромистые стали, мартенсит, δ-феррит, изотермическая диаграмма распада аустенита, жаропрочность, предел текучести, сжатие, растяжение, ползучесть, пределы ползучести, параметр Ларсена-Миллера, уравнения ползучести.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-4-290-302

Введение

Жаропрочные стали с 12 % хрома и структурой, состоящей из смеси зерен мартенсита отпуска и высокотемпературного δ-феррита, используются в качестве конструкционных материалов в работающих атомных реакторах с жидкометаллическими теплоносителями и рассматриваются как кандидаты для использования в проектируемых энергетических установках аналогичного назначения большей мощности [1 – 5]. Их преимущество перед сталями с аустенитной структурой для подобного же назначения – низкие показатели радиационного распухания, что дает возможность повышать экономичность реакторов, увеличивая степень выгорания тяжелых атомов [6 – 8] через продолжительность топливной кампании [9 – 11]. В условиях работы элементов и деталей узлов конструкций при температурах выше 600 °С показатели сопротивления тепловой ползучести являются базовыми характеристиками жаропрочности [12 – 14]. Известно о применении в реакторах на быстрых нейтронах сталей феррито-мартенситного структурного класса 12Х12М2БФР (ЭП-450) [15 – 19] и 16Х12МВСФБР (ЭП-823) [16, 17, 19 – 24], а также рассматриваемых для использования в тех же назначениях новых перспективных сталей 20Х12НМВФБАР (ЧС-139) [16] и 16Х12В2ФТаР (ЭК-181) [17, 25 – 27]. В литературе имеются данные о механических характеристиках этих сталей при испытании на растяжение в диапазоне температур 20 – 750 °С [26 – 33]. Ограниченные характеристики для скорости ползучести известны только для стали ЭП-450 [34] и ЭК-181 [35 – 37]. Для стали

16Х12МВСФБР (ЭП-823), рассматриваемой как основной материал для изготовления оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) разрабатываемого реактора с естественной безопасностью типа БРЕСТ [38, 39], такие данные отсутствуют. В настоящей работе приведены результаты исследования закономерностей ползучести стали 16Х12МВСФБР (ЭП-823), рассмотрена «свертка» такой информации через расчет параметра Ларсена-Миллера и определены пределы ползучести для некоторых температурно-силовых условий.

Методика исследований

Исследования проводили на стали 16Х12МВСФБР (ЭП-823). Слитки массой 3 кг были выплавлены в вакуумной индукционной печи марки LEYBOLD-HERA-RUS в НИТУ «МИСиС». Для оценки воспроизводимости результатов были сделаны три плавки. Шихтовые материалы применяли в виде кусков чистых металлов, кусков технического углерода с содержанием примесей не более 0,1 % (по массе), азотистого феррохрома с содержанием азота не менее 10 % (по массе) и примесей не более 0,1 % (по массе) для получения сталей, чистых по неметаллическим включениям, а также для предотвращения появления у них склонности к отпускной хрупкости. Слитки расковывали вгорячую на пруток сечением примерно 16×16 мм. Небольшие части полученных прутков раскатывали вгорячую на лист толщиной 2 мм. Основным методом исследования были испытания на сжатие цилиндрических образцов с характерным размером 5 – 6 мм. Это позволило на порядок сократить время получения механических характеристик. Также проводили сравнительные испытания на растяжение плоских образцов с рабочей частью 20×3×1 мм. Все исследования проводили на воздухе при температурах 20 – 720 °С для получения кратковременных свойств и при 600 – 760 °С для получения характеристик сопротивления ползучести. Химический состав стали ЭП-823 трех плавок и содержание в их структуре δ-феррита в сравнении с требованиями технических условий приведены в табл. 1.

Таблица 1

Марочный химический состав стали 16Х12МВСФБР (ЭП-823) и химические составы стали ЭП-823 плавок *1 – 3*

Table 1. **Base chemical composition of steel 16Cr12MoWSiVNbB (EP-823) and chemical compositions of steel EP-823 heats *1 – 3***

Элемент	Содержание по ТУ 14-1-925–74 [40]	Содержание элемента, % (по массе) в плавке		
		1	*2*	*3*
C	0,14 – 0,18	0,180	0,180	0,170
Si	1,0 – 1,3	1,250	0,200	1,180
Mn	0,5 – 0,8	0,640	0,740	0,660
S	≤0,01	0,003	0,009	0,010
P	≤0,015	0,013	0,015	0,014
Cr	10 – 12	11,500	11,400	10,000
Ni	0,50 – 0,80	0,710	0,700	0,610
Mo	0,60 – 0,90	0,670	0,670	0,810
W	0,5 – 0,8	0,550	0,500	0,630
Nb	0,2 – 0,4	0,320	0,320	0,320
V	0,2 – 0,4	0,320	0,330	0,290
Ti	≤0,05	0,004	0,001	0,001
Ta	*	≤0,01	0,001	0,010
B	0,006**	0,003	0,003	0,006
N	≤0,050	0,010	0,010	0,015
Другое	Ce ≤0,1**	Cu = 0,17; Ce = 0,1**	Cu = 0,12; Ce = 0,05	Cu = 0,005; Ce = 0,14
Содержание δ-феррита, % (объемн.)	1 – 30***	6,3	12	8,7

* Легирование этим элементом не предусмотрено, содержание в итоговом составе не регламентировано.

** Расчетная величина по шихте.

*** Предельный разброс данной величины по литературным данным.

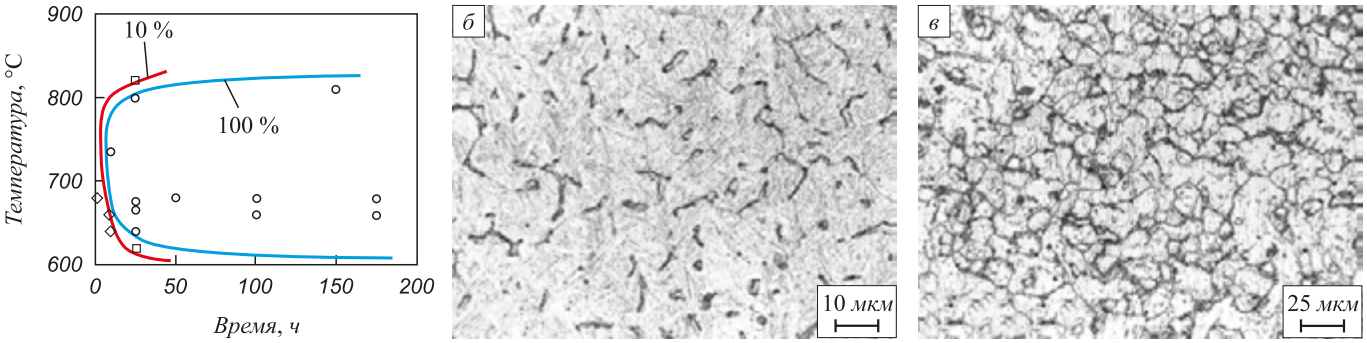

Рис. 1. Структурно-кинетические характеристики стали ЭП-823:
а – диаграмма изотермического распада переохлажденного аустенита стали ЭП-823, плавка *1* (◇ – признаки распада аустенита по диффузионному механизму отсутствуют; □ – есть признаки диффузионного распада; ○ – структура ферритного типа после полного распада аустенита по диффузионному механизму); *б* – структура стали ЭП-823, плавка *3*, после закалки на мартенсит (темные области по границам светлых областей с мартенситной структурой – δ-феррит); *в* – структура стали ЭП-823, плавка *2*, после изотермической закалки на феррит

Fig. 1. Structural-kinetic characteristics of EP-823 steel:
a – isothermal diagram of austenite decomposition of the EP-823 steel, heat *1* (◇ – attributes of austenite decomposition on diffusion mechanism are absent; □ – there are attributes on diffusion mechanism of austenite decomposition; ○ – structure like ferrite-type after full austenite decomposition on diffusion mechanism); *б* – structure of the EP-823 steel, heat *3*, after quenching in oil on martensitic phase (dark areas on borders of light areas with martensitic structure – δ-ferrite); *в* – structure of steel EP-823, heat *2*, after isothermal quenching on ferrite

Режим термической обработки стали ЭП-823 закалка с последующим высокотемпературным отпуском. Структурно-кинетические характеристики стали ЭП-823 приведены на рис. 1. С учетом характерного параметра диаграммы изотермического распада стали ЭП-823 (рис. 1, *а*), а именно времени инкубационного периода начала распада переохлажденного аустенита (для температуры «носа С-образной кривой», равной 735 °С, оно составляет 10 ч) охлаждение с любой скоростью выше ~ 1 °С/мин позволит предотвратить распад переохлажденного аустенита по диффузионному механизму и получить структуру с максимально возможным содержанием мартенсита (такая скорость охлаждения гарантируется не только закалкой и нормализацией, но и не самым медленным остыванием вместе с печью). Значения температуры Ac_1 стали ЭП-823 находятся в диапазоне 800 – 880 °С, а температуры Ac_3 – в диапазоне 900 – 980 °С. Основываясь на этих данных и данных из литературных источников, авторами были приняты параметры термической обработки, представленные в табл. 2.

Результаты и их обсуждение

Предварительными испытаниями были определены пределы текучести стали ЭП-823 при температурах от 20 до 720 °С и параметры зеренной структуры после полного цикла термических обработок. Эти данные приведены в табл. 3. На их основе назначались уровни напряжений при испытании на ползучесть. Найдено, что между результатами испытаний на сжатие и на растяжение существует линейная зависимость (рис. 2), выражаемая уравнением $\sigma_{0,2\ сж} = 1{,}3\sigma_{0,2\ раст}$.

Исходя из этого, большинство представленных результатов кратковременных испытаний получено при испытании на сжатие. Испытания на растяжение проводились для контроля, были немногочисленны и отмечены в табл. 3.

Для испытаний на ползучесть уровни напряжений выбирали в диапазоне 0,35 – 0,85 от соответствующего предела текучести. Пример характерной первичной кривой ползучести в координатах «время испытания –

Таблица 2

Параметры термической обработки стали ЭП-823

Table 2. **Parameters of heat treatment of steel EP-823**

Параметры высокотемпературной стадии обработки				Параметры отпуска			
температура нагрева, °С	время выдержки, мин	среда нагрева	способ и среда охлаждения	температура нагрева, °С	время выдержки, ч	среда нагрева	способ и среда охлаждения
1100	20	Аргон	Закалка в масло или нормализация на воздухе	760	1,5	Аргон	На спокойном воздухе

Таблица 3

Пределы текучести и размер зерна исследуемых сталей после базовой термической обработки

Table 3. **Yield strength and grain size of test steels after basic heat treatment**

Параметр		Вид нагружения				
		сжатие, плавка *1*	сжатие, плавка *2*	сжатие, плавка *3*	растяжение, плавка *1*	растяжение*
Предел текучести, МПа, при температуре испытания, °С	20	864,1 ± 58,45	766,9 ± 20,52	874,7 ± 148,20	675 ± 42,0	740 – 645
	300	817,5 ± 53,75	–	–	620 ± 35,0	550 – 560
	400	785,3 ± 41,70	–	–	590 ± 21,0	530 – 535
	500	633,7 ± 53,90	–	–	495 ± 35,0	440 – 470
	600	485,4 ± 13,18	–	–	351 ± 14,0	305 – 310
	680	263,9 ± 28,38	–	–	207 ± 18,0	240 – 250
	700	268,0 ± 22,00	–	–	200 ± 13,5	180 – 190
	720	251,5 ± 5,84	282,7 ± 12,00	265,1 ± 23,90	195 ± 6,0	170 – 190
Размер «зерна», мкм	мартенсит	18	20	20	20	–
	δ-феррит	4,0	7,3	8,0	5,5	–

* Сравнительные данные из работ [18, 21 – 23, 32 – 33, 37, 39, 40 – 45] для испытания на растяжение; часть результатов получена интерполяцией по экспериментальным точкам.

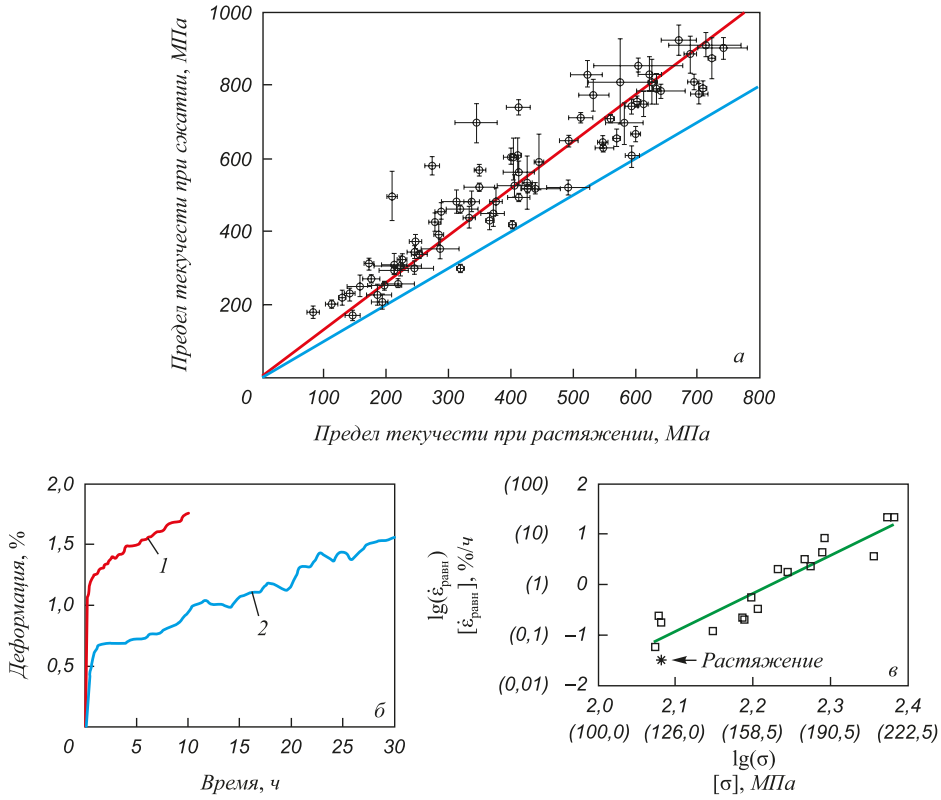

Рис. 2. Взаимосвязь результатов испытаний на растяжение и сжатие:
а – опыты на 40 экспериментальных сталях с 12 % Cr для определения характеристик прочности при температурах 20 – 720 °С;
б, *в* – опыты на стали 09Х12В3БР для определения характеристик ползучести при температуре 690 °С и напряжении 120 МПа:
б – первичные кривые ползучести при сжатии (*1*) и растяжении (*2*); *в* – зависимость скорости ползучести от напряжения в двойных логарифмических координатах при нагружении сжатием и растяжением (указано стрелкой)

Fig. 2. Interrelation of tests results for tensile and compression:
a – experiences on 40 experimental steels with 12 % of Cr for definition of strength characteristics at temperatures of 20 – 720 °C; *б*, *в* – experiences on steel 09Cr12W3NbB for definition of creep characteristics at 690 °C and at pressure of 120 MPa: *б* – primary curves of creep at compression and at tensile; *в* – dependence of creep velocity on pressure in double logarithmic coordinates at compression and at tensile (specified by an arrow)

абсолютное укорочение» представлен на рис. 2, *б*. На такого рода кривых всегда присутствуют:

– нулевая стадия упругого нагружения, длящаяся не более 1 мин;

– первая стадия неустановившейся ползучести, длящаяся не более 3 ч;

– вторая стадия установившейся ползучести, длящаяся до конца испытания.

Испытания проводили не более 11 ч и заканчивали всегда во время деформации образца на второй стадии. После испытания измеряли конечные размеры образцов (диаметр и высоту). Обработка первичных кривых ползучести включала общепринятые процедуры:

– визуальное разбиение кривой ползучести на стадии;

– установление продолжительности и деформации на всех стадиях.

По этим данным определяли истинную скорость ползучести на установившейся стадии, %/ч, и истинное напряжение в момент начала стадии установившейся ползучести, МПа (деформация на этой стадии была меньше, чем на стадии неустановившейся ползучести). Набор пар данных «уровни напряжений – соответствующие им скорости ползучести» составлял исходный массив для построения зависимости «напряжение – скорость ползучести» в двойных логарифмических ($\log\sigma - \log\acute{\varepsilon}$, либо $\log\acute{\varepsilon} - \log\sigma$) и в полулогарифмических ($\sigma - \log\acute{\varepsilon}$, либо $\log\acute{\varepsilon} - \sigma$) координатах методом наименьших квадратов в виде прямой линии. Из литературных источников следует, что именно такие варианты описания опытов по ползучести используются в экспериментах [46]. Диапазон варьирования факторов в опытах (σ, T, $d_{зерна}$) соответствует области степенной ползучести [47], что и определяет методику дальнейшего математического анализа. По сумме квадратов отклонений экспериментальных точек от линии аппроксимации определяли лучшее из двух описаний (двойное логарифмическое или полулогарифмическое) для каждого массива экспериментальных точек. Статистический анализ этих данных, приведенный в табл. 4, показал, что во всех случаях двойное логарифмическое представление результатов ползучести дает лучшее совпадение результатов аппроксимации и эксперимента. В связи с этим далее будут анализироваться результаты, полученные только аппроксимацией в двойных логарифмических координатах. Примеры графических зависимостей, характеризующих скорость ползучести в зависимости от напряжения, приведены на рис. 3.

Данные каждого массива, характеризующие ползучесть при фиксированной температуре, использовались для получения исходных линейных уравнений $y = b + ax$ (y описывает напряжение, x – скорость ползучести, s – среднеквадратичное отклонение в пересчете на МПа) двух типов:

– зависимости скорости ползучести от напряжения вида

$$\log(\acute{\varepsilon}) = \log(a_E) + n_E\log(\sigma) \qquad (1a)$$

(эти уравнения позволяли рассчитывать скорости ползучести при любых заданных уровнях напряжений; их значения приведены в табл. 5);

– зависимости напряжения от скорости ползучести вида

$$\log(\sigma) = \log(a_S) + n_S\log(\acute{\varepsilon}) \qquad (1б)$$

(по этим уравнениям рассчитывали пределы ползучести по заданным допускам на скорость ползучести; значения пределов ползучести приведены в табл. 6).

Полученные характеристики уравнений (1*а*) и (1*б*) приведены в табл. 4.

Для уменьшения размерности матрицы опытных данных (в рассматриваемом случае матрицы «температура – напряжение – скорость ползучести») и нахождения аналитических зависимостей между переменными может применяться процедура определения параметра Ларсена-Миллера [13]. По этой методике, отработанной и широко применяемой для описания результатов опытов на длительную прочность с определением вре-

Таблица 4

Показатели моделей аппроксимации данных ползучести в виде *y = ax + b* для расчета пределов ползучести

Table 4. **Parameters of models for approximating the creep data in the form *y = ax + b* to calculate the creep limits**

Сталь	$T_{испыт.}$, °C	Показатели модели описания данных						Отношение $s1/s2$
		$\log\sigma - \log\acute{\varepsilon}$			$\sigma - \log\acute{\varepsilon}$			
		a	*b*	*s*1	*a*	*b*	*s*2	
ЭП-823, плавка *1*	600	0,067	2,406	11,826	40,321	260,266	12,526	0,944
	650	0,047	2,275	5,447	20,19	194,046	5,677	0,959
	700	0,103	2,161	16,982	40,689	140,465	18,936	0,897
	740	0,101	2,083	5,574	25,212	108,724	7,608	0,733
ЭП-823, плавка *2*	700	0,119	2,030	5,939	31,756	115,510	6,431	0,924
ЭП-823, плавка *3*	700	0,122	2,070	7,527	32,174	124,864	8.165	0,960

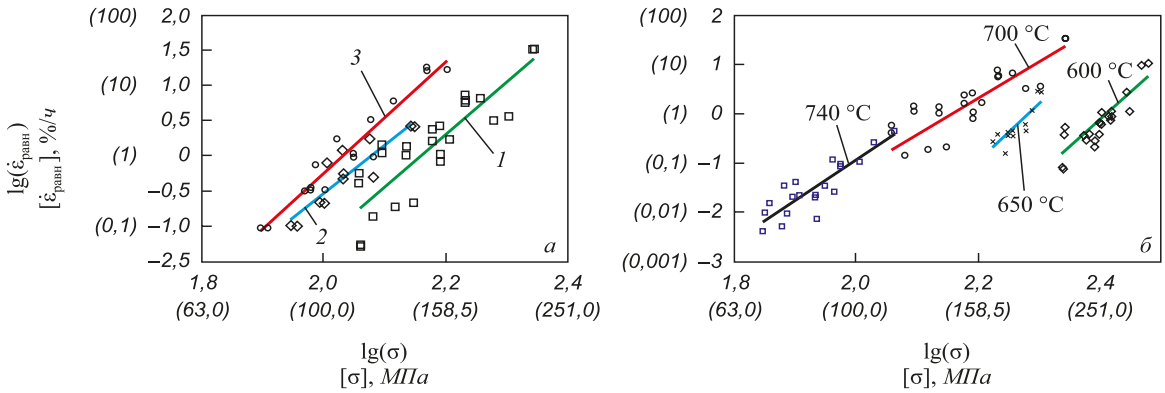

Рис. 3. Зависимость скорости установившейся ползучести стали ЗП-823 от напряжения в двойных логарифмических координатах при испытании на сжатие:
а – при 700 °С плавок *1*, *2* и *3* (указаны цифрами на графике); *б* – при 600, 650, 700 и 740 °С (температуры указаны на графике) плавки *1*

Fig. 3. Dependence of creep velocity of steel EP-823 on pressure in double logarithmic coordinates at compression test:
a – tests at 700 °C of heats *1*, *2* and *3* (are specified by figures on the scheme); *б* – tests at 600, 650, 700 and 740 °C (temperatures are specified on the scheme) for heat *1*

мени до разрушения τ_P, сначала определяется параметр Ларсена-Миллера $P = (T/1000)[C + \log(\tau_P)]$, а затем строится графическая зависимость напряжений σ, при которых проводились испытания, от параметра *P*. Эта зависимость является рабочей для анализа и прогноза данных. Для константы *C* авторами предлагается значение, равное 20. Известная из опытов зависимость $(\acute{\varepsilon}\tau_P) = \text{const}$ [46] позволяет предложить такую же методику и для анализа данных по скорости ползучести, когда параметром P_S будет являться выражение

$$P_S = \frac{T}{1000}[C_S - \log(\acute{\varepsilon})], \qquad (2),$$

где *T* – абсолютная температура, К; C_S – некоторая константа (постулируемая в методике Ларсена-Миллера как равная 20); $\acute{\varepsilon}$ – скорость ползучести на установившейся стадии, %/ч.

На рис. 4, *а* приведена взаимозависимость параметров P_S (вычисленных по уравнению (2)) и экспериментальных значений напряжений. Наличие линейной связи параметра Ларсена-Миллера с логарифмами напряжений вида $\log(\sigma) = a_S + b_S P_S$ (где коэффициенты $a_S = 4{,}304$, $b_S = -0{,}109$) позволяет предложить уравнение

Таблица 5

Сопоставление логарифмов скоростей ползучести стали ЭП-823, рассчитанных для температуры 700 °С по разным температурно-силовым моделям

Table 5. **Comparison of logarithms of creep velocities of steel EP-823, calculated for the temperature of 700 °C for different temperature-power models**

Напряжение, МПа	Расчет логарифмов скоростей ползучести по моделям (скорость ползучести задана в %/ч)	
	парная (1*а*)	Холломона (5)
100	–1,162	–1,511
125	–0,448	–0,646
150	0,136	0,060
175	0,630	0,658
200	1,057	1,175
220	1,434	1,631
Параметр S^*	0,375	0,409

S^* – среднеквадратичное отклонение для данной модели для массива, по которому была получена модель (в логарифмическом измерении от скорости ползучести, %/ч)

Таблица 6

Сопоставление пределов ползучести стали ЭП-823 для температур 600, 650 и 700 °С, рассчитанных по разным температурно-силовым моделям

Table 6. **Comparison of the creep limits of steel EP-823 for temperatures of 600, 650 and 700 °C, calculated from different temperature-force models**

T, °С	Скорость ползучести, %/ч	Пределы ползучести, МПа	
		парная (1б)	Ларсена-Миллера (3)
600	1	255,0	251,7
	0,1	218,5	202,2
	0,01	187,4	162,4
650	1	188,2	195,8
	0,1	169,0	155,3
	0,01	151,0	123,2
700	1	144,82	152,4
	0,1	114,31	119,3
	0,01	90,23	93,49
Параметр S^{**}		0,044	0,046

S^{**} – среднеквадратичное отклонение для логарифмов напряжений (в логарифмическом измерении)

$$\log(\sigma) = 4{,}304 - 0{,}109\left(\frac{T}{1000}\right)[20 - \log(\acute{\varepsilon})] \qquad (3)$$

для нахождения пределов ползучести по заданному допуску на скорость деформации при любых значениях параметров из исследуемого диапазона их изменения. На рис. 4, *б* показаны вычисленные по уравнению (3) и экспериментальне значения напряжений. Среднеквадратичное отклонение $S = \sqrt{\sum \frac{\left[\log(\sigma_{расч}) - \log(\sigma_{опыт})\right]^2}{n-2}}$ для модели (3) составляет менее 4 % от величины среднего значения логарифмов напряжений. Рассчитанные по уравнению (3) пределы ползучести стали ЭП-823 при температурах 600, 650 и 700 °С приведены в табл. 5 и на рис. 4, *в*.

Для прогнозирования скорости ползучести для заданного уровня напряжения также может быть опробована модель на основе параметрической зависимости по Ларсену-Миллеру в виде

$$P_E = \frac{T}{1000}[C_E - \log(\sigma)]. \qquad (4)$$

Наилучшее совпадение вычисленных значений $\log(\acute{\varepsilon})$ с экспериментальными наблюдается при $C_E = 0$. Тогда такой вид параметрической зависимости именуется аппроксимацией по Холломону [48]. С учетом этого уравнение для скорости ползучести имеет вид:

$$\log(\acute{\varepsilon}) = -19{,}355 + 9{,}17\left(\frac{T}{1000}\right)\log(\sigma). \qquad (5)$$

Сравнение прогнозных (вычисленных по уравнению (5)) и опытных скоростей ползучести показано на рис. 5, *а*.

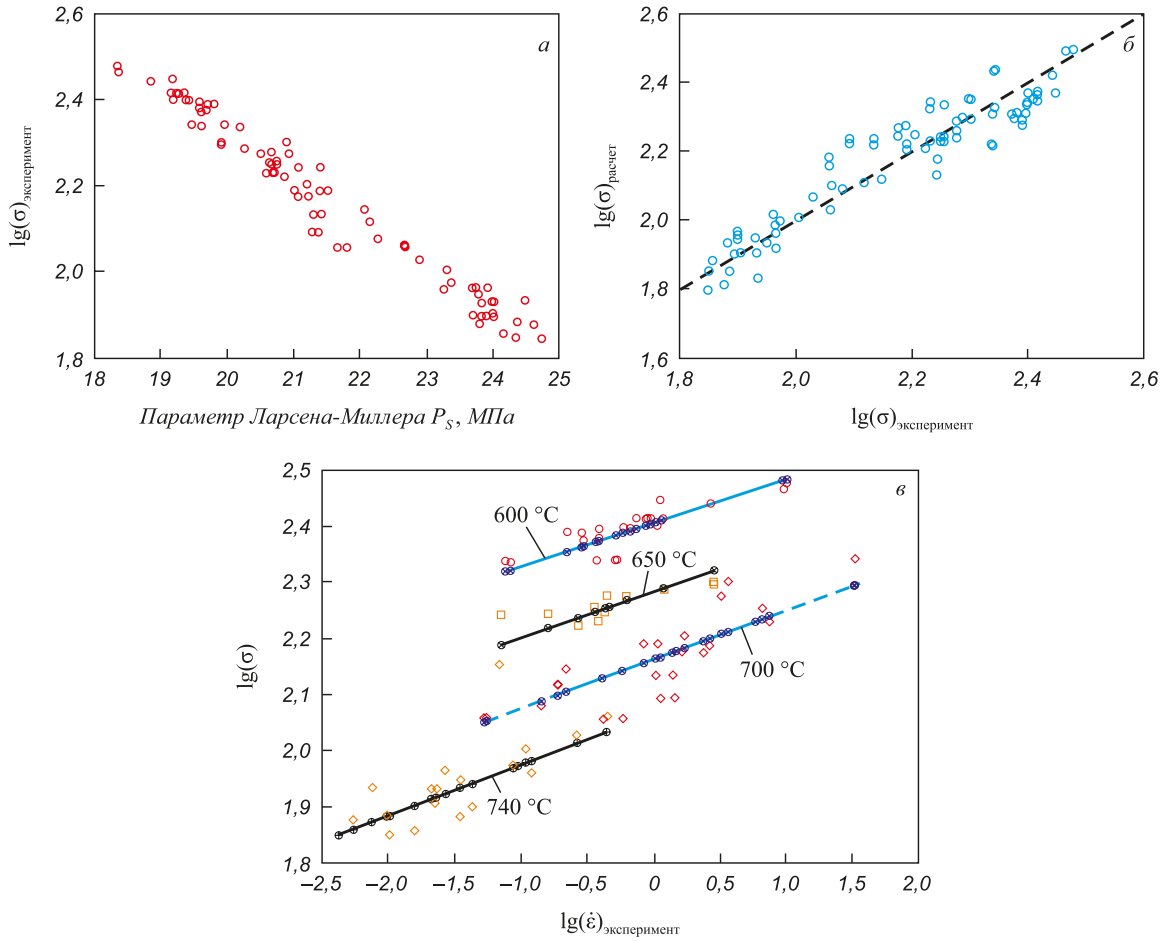

Рис. 4. Графические характеристики математических моделей:
а – взаимозависимость параметра Ларсена-Миллера P_S и значений напряжений σ; *б* – сравнение экспериментальных и рассчитанных по модели Ларсена-Миллера напряжений по всем экспериментальным точкам; штриховая линия – линия равных значений; *в* – сопоставление экспериментальных (открытые символы) и расчетных (по уравнению (3), затемненные символы) зависимостей log(σ) – log(ε̇) для температур 600, 650, 700 и 740 °С (указаны на графике)

Fig. 4. Graphic characteristics of mathematical models:
a – interdependence of Larsen-Miller's parameter P_S and values of pressure σ; *б* – comparison experimental and calculated on Larsen-Miller's model pressures on all experimental points; shaped line – a line of equal values; *в* – comparison of experimental (the open symbols) and calculated (by the equation (3), the blacked out symbols) dependences log (σ) – log (ε̇) for temperatures of 600, 650, 700 and 740 °C (specified on the schedule)

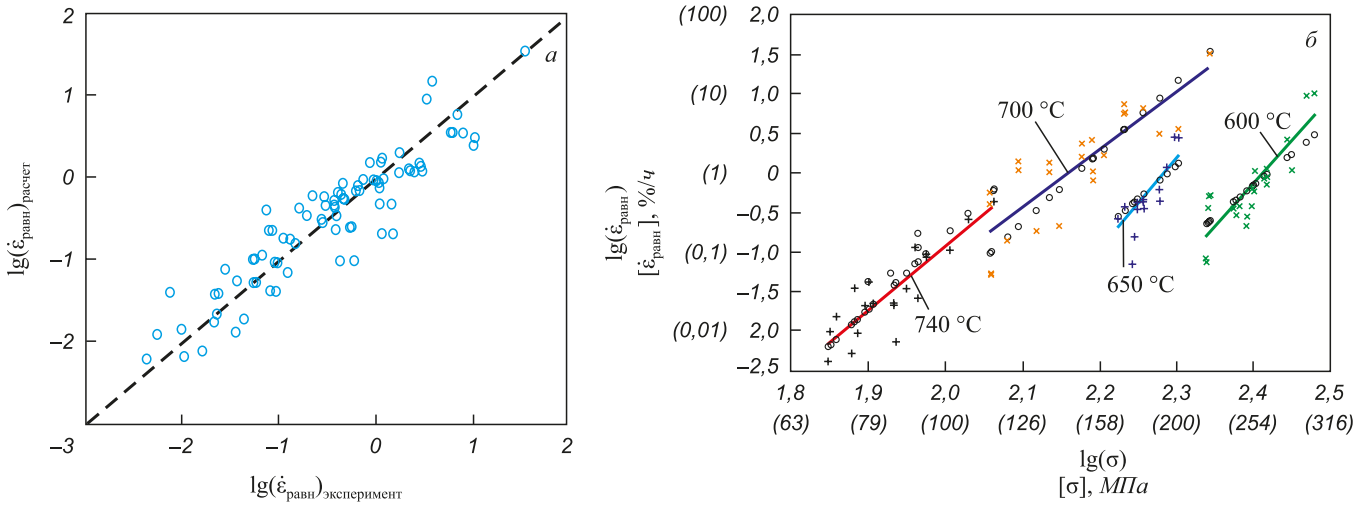

Рис. 5. Графические характеристики математической модели по Холломону (уравнение (5)) для связи скорости ползучести и напряжения: *а* – сопоставление расчета и эксперимента для логарифма скорости ползучести; *б* – зависимость скорости ползучести от напряжения в двойных логарифмических координатах для стали ЭП-823 при температурах 600, 650, 700 и 740 °C (красные кружки – расчет по уравнению (5), крестики и плюсики – эксперимент, линии – аппроксимации опытных данных в парной модели)

Fig. 5. Graphic characteristics of mathematical models by Hollomon (equation (5)) for comparison of creep and stress velocities: *a* – comparison of calculation and experiment for the logarithm of creep velocity; *б* – dependence of creep velocity on pressure in double logarithmic coordinates of EP-823 steel for temperatures of 600, 650, 700 and 740 °C (red mugs – calculation on (5), daggers and signs on addition – experiment, lines – approximations of experimental data in pair model)

Среднеквадратичное отклонение для модели (5) $S_E = \sqrt{\sum \frac{\left[\log(\acute{\varepsilon}_{расч}) - \log(\acute{\varepsilon}_{опыт})\right]^2}{n-2}}$ составляет около 60 % от величины среднего значения модулей логарифмов скоростей ползучести. В табл. 7 приведены рассчитанные по уравнению (5) скорости ползучести стали ЭП-823 при температуре 700 °C.

Анализ значений пределов ползучести и скоростей ползучести, приведенных в табл. 5 и 6, показывает, что точность предсказания этих характеристик сопоставима при использовании любой из анализировавшихся моделей, но предпочтение следует отдать описанию по Холломону (Ларсену-Миллеру), поскольку эти модели учитывают все три варьируемых фактора. Второе наблюдение состоит в том, что точность определения пределов ползучести на порядок лучше, чем точность определения скоростей ползучести, что связано с диапазоном варьирования факторов (варьирование скоростей ползучести – это несколько порядков, тогда как напряжение варьируется в пределах одного порядка).

Наличие данных о скорости ползучести при разных температурах дает возможность определить условную энергию активации ползучести Q в диапазоне 600 – 760 °C при экспоненциальном описании результатов в виде $\acute{\varepsilon} = \sigma^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$ [46], которое после логарифмирования приводится к линейному виду $\log(\acute{\varepsilon}) = A' + B'\log(\sigma) + \frac{C'}{T}$ переменными $x = \log(\sigma)$, $y = \frac{1}{T}$,

Таблица 7

Характеристики ползучести при напряжении 120 МПа стали 09Х12В3БР при испытаниях на сжатие и растяжение при 690 °C и стали ЭП-823 при 700 °C

Table 7. **Creep characteristics at a stress of 120 MPa of steel 09Cr12W3NbB in compression and tensile testing at 690 °C and steel EP-823 at 700 °C**

Материал	Метод испытания	Длительность испытания, ч	Деформация установившейся стадии, %	Скорость установившейся ползучести, %/ч
Сталь 09Х12В3БР	Сжатие	10 ,0	0,50	0,057
	Растяжение	30,0	0,90	0,032
Сталь ЭП-823, плавка *1*	Сжатие	10,0	0,35	0,264
Сталь ЭП-823, плавка *2*	Сжатие	9,5	7,90	2,470
Сталь ЭП-823, плавка *3*	Сжатие	7,2	10,20	1,060

$z = \log(\acute{\varepsilon})$. Коэффициенты A', B' и C' были найдены с помощью программы Statistica. Из $C' = \frac{Q\log(e)}{R} = -18\ 471$ искомая величина равна $Q = \frac{C'R}{\log(e)} = 357\ 266$ Дж/моль (здесь e – основание натурального логарифма; R – универсальная газовая постоянная). По порядку величины она близка к энергии активации самодиффузии α-железа (196 – 326 кДж/моль по данным работы [49]). В опытах на ползучесть строительной стали Ст.3 была получена величина энергии активации того же порядка: 310,8 – 387,8 кДж/моль [50].

Использование сжатия микрообразцов как метода испытаний на ползучесть ставит вопрос о возможности сопоставления результатов таких испытаний с результатами, полученными при испытании на растяжение. Этот вопрос проверен авторами в сопоставительных опытах на перспективной опытной стали 09Х12В3БР со структурой из 70 % мартенсита и 30 % (объемн.) δ-феррита. Испытания на ползучесть на воздухе при 690 °С проводили на цилиндрических микрообразцах с характерными размерами ~ 5 мм по схеме сжатия на базе до 11 ч и на плоских образцах с размерами рабочей части ~ 20×3×1 мм по схеме растяжения на базе до 30 ч. Все образцы изначально были подвергнуты закалке и высокому отпуску в одной садке. Результаты испытаний приведены на рис. 2, *б*, *в* и в табл. 7. Там же приведены данные по скорости ползучести в сходных условиях сталиЭП-823 разных плавок. Данные табл. 7 свидетельствуют о том, что скорости ползучести стали одной марки 09Х12В3БР и одной плавки показывают сходные скорости ползучести при разных способах нагружения. В то же время скорости ползучести стали одной марки ЭП-823 при нагружении одинаковым способом (сжатием), но разных плавок, могут различаться на порядок.

Выводы

Приведены значения пределов ползучести и скорости ползучести стали ЭП-823 при температурах 600 – 760 °С, которые могут быть использованы при расчетах и проектировании деталей и конструкций. Получены математические выражения, позволяющие вычислять эти характеристики в исследованном диапазоне варьирования факторов.

Лучшее совпадение вычисленных пределов ползучести для заданных допусков по скорости ползучести дает описание в двойных логарифмических координатах ($\log\sigma - \log\acute{\varepsilon}$) по сравнению с полулогарифмическими координатми ($\sigma - \log\acute{\varepsilon}$).

Точность предсказания пределов ползучести и скоростей ползучести сопоставима при использовании как парной модели ($\log\sigma - \log\acute{\varepsilon}$), так и параметрической модели Холломона (Ларсена-Миллера), но предпочтение следует отдать описанию по Холломону (Ларсену-Миллеру), поскольку эта модель учитывает все три варьируемых фактора: скорость ползучести, напряжение и температуру.

Точность определения пределов ползучести на порядок лучше, чем точность определения скоростей ползучести, и составляет ~ 4 %, что связано с сильно различающимися диапазонами варьирования факторов (варьирование скоростей ползучести – это несколько порядков, тогда как напряжение варьируется в пределах одного порядка).

Между результатами испытаний на сжатие и растяжение при определении характеристик прочности существует линейная зависимость, выражаемая уравнением $\sigma_{0,2\ сж} = 1{,}3\sigma_{0,2\ раст}$.

Скорости ползучести стали одной марки (09Х12В3БР) и одной плавки при разных способах нагружения (растяжении и сжатии) имеют сходные значения, в то время как скорости ползучести стали одной марки (ЭП-823), но разных плавок, даже при одном способе нагружения (сжатии) могут различаться на порядок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Конструкционные материалы ядерных реакторов / Н.М. Бескоровайный, Б.А. Калин, П.А. Платонов, И.И. Чернов. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 704 с.
2. Солонин М.И., Решетников Ф.Г., Иолтуховский А.Г., Никулина А.В. Новые конструкционные материалы активных зон ядерных энергетических установок // Физика и химия обработки материалов. 2001. № 4. С. 17 – 27.
3. Физико-энергетический институт: летопись в судьбах / Под ред. А.В. Зродникова / ГНЦ РФ ФЭИ им. А.И. Лейпунского. – Обнинск: ГНЦ ФР ФЭИ, 2006. – 334 с.
4. Klueh R., Harries D. High chromium ferritic and martensitic steels for nuclear applications. – Bridgeport, USA: ASTM stock number: MONO3, 2001. – 217 p.
5. Yan Wei, Wang Wei, Shan Yiyin etc. 9-12Cr Heat-Resistant Steels. Engineering Materials. – Springer, 2015. –223 p.
6. Герасимов В.В., Монахов А.С. Материалы ядерной техники: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 312 с.
7. Конструкционные материалы ядерных реакторов. В 2-х частях. Ч. II: Структура, свойства, назначения / Н.М. Бескоровайный, Ю.С. Беломытцев, М.Д. Абрамович и др. – М.: Атомиздат, 1977. – 256 с.
8. Ибрагимов Ш.Ш., Кирсанов В.В., Пятилетов Ю.С. Радиационные повреждения металлов и сплавов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 240 с.
9. Klueh R.L. Elevated-temperature ferritic and martensitic steels and their application to future nuclear reactors. – OakRidge, Tennessee, USA, 2004. – 66 p.
10. Физическое материаловедение: Учебник для вузов. Т. 6. Конструкционные материалы ядерной техники / Б.А. Калин, П.А. Платонов, Ю.В. Тузов и др. / Под общ. ред. Б.А. Калина. – М.: НИЯУ МИФИ, 2012. – 736 с.
11. Фрост Б. Твэлы ядерных реакторов / Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 248 с.
12. Ланская К.А. Высокохромистые жаропрочные стали. – М.: Металлургия, 1976. – 216 с.
13. Химушин Ф.Ф. Нержавеющие стали. – М.: Металлургия, 1967. – 800 с.
14. Вотинов С.Н., Головин И.С., Колотушкин В.П. Проблемы разработки перспективных материалов для оболочек твэлов реакторов на быстрых нейтронах. – В сб.: Атомные электро-

станции России. 60 лет атомной промышленности. – М., 2005. С. 313 – 335.

15. Мальцев В.В., Огородов А.М., Росляков В.Ф. и др. Опыт эксплуатации твэлов и ТВС реактора БН-600. – В кн.: Труды Международной конференции по радиационному материаловедению. Алушта. 22 – 25 мая 1990 г. – Харьков: ХФТИ, 1990. Т. 4. С. 105 – 112.

16. Целищев А.В., Агеев В.С., Буданов Ю.П., Митрофанова Н.М. Разработка конструкционной стали для твэлов и ТВС быстрых реакторов // Атомная энергия. 2010. Т. 108. Вып. 4. С. 217 – 222.

17. Солонин М.И., Иолтуховский А.Г., Бибилашвили Ю.К. и др. Проблемы создания и модификации нержавеющих сталей для деталей активных зон ядерных реакторов на быстрых нейтронах и термоядерного реактора синтеза // Физика и химия обработки материалов. 2001. № 5. С. 5 – 13.

18. Dvoriashin A.M., Porollo S.I., KonobeevYu.V., Garner F.A. Influence of high dose neutron irradiation on microstructure of EP-450 ferritic–martensitic steel irradiated in three Russian fast reactors // Journal of Nuclear Materials. 2004. Vol. 329-333. P. 319 – 323.

19. Odette G.R., Alinger M.J., Wirth B.D. Recent developments in irradiation-resistant steels // Annual Review of Materials Research. 2008. Vol. 38. P. 471 – 503.

20. Kupriiyanova Y.E., Bryk V.V., Borodin O.V. etc. Use of double and triple-ion irradiation to study the influence of high levels of helium and hydrogen on void swelling of 8–12% Cr ferritic-martensitic steels // Journal of Nuclear Materials. 2016. Vol. 468. P. 264 – 273.

21. Русанов А.Е., Троянов В.М., Беломытцев Ю.С., Шулепин С.В. Разработка и исследование оболочечных сталей для твэлов ЯЭУ с тяжелым теплоносителем. – В кн.: Сб. докл. конф. «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях». – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 1999. Т. 2. С. 673 – 685.

22. Roy A.K., Hossain M.K. Cracking of martensitic alloy EP-823 under controlled potential // Journal of Materials Engineering and Performance. 2006. Vol. 15. No. 3. P. 336 – 344.

23. Maloy S.A., Romero T., James M.R. Tensile testing of EP-823 and HT-9 after irradiation in STIP II // Journal of Nuclear Materials. 2006. Vol. 356. Issue 1-3. P. 56 – 61.

24. Voyevodin V.N., Karpov S.A., Kopanets I.E. etc. Influence of displacement damage on deuterium and helium retention in austenitic and ferritic-martensitic alloys considered for ADS service // Journal of Nuclear Materials. 2016. Vol. 468. P. 274 – 280.

25. Иолтуховский А.Г., Леонтьева-Смирнова М.В., Чернов В.М. и др. Разработка жаропрочной 12 %-ной хромистой стали 16Х12В2ТаР нового поколения с быстрым спадом наведенной активности для атомной энергетики России // Металловедение и термическая обработка металлов. 2002. № 11. С. 60 – 64.

26. Ioltukhovskiy A.G., Blokhin A.I., Budylkin N.I. etc. Material science and manufacturing of heat-resistant reduced-activation ferritic-martensitic steels for fusion // Journal of Nuclear Materials. 2000. Vol. 283-287. P. 652 – 656.

27. Ioltukhovskiy A.G., Leonteva-Smirnova M.V., Solonin M.I. etc. Heat resistant reduced activation 12% Cr steel of 16Cr12W2VTaB type-advanced structural material for fusion and fast breeder power reactors // Journal of Nuclear Materials. 2002. Vol. 307-311. P. 532 – 535.

28. Иолтуховский А.Г., Леонтьева-Смирнова М.В., Чернов В.М. и др. Разработка жаропрочной 12% хромистой стали 16Х12В2ФТаР нового поколения с быстрым спадом наведенной активности для нужд атомной энергетики России // Вопросы атомной науки и техники (Харьков). 2003. № 6. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (84). С. 60 – 64.

29. Nikitina A.A., Ageev V.S., Chukanov A.P. etc. R&D of ferritic–martensitic steel EP450 ODS for fuel pin claddings of prospective fast reactors // Journal of Nuclear Materials. 2012. Vol. 428. P. 117 – 124.

30. Klueh R. L., Ehrlich K., Abe F. Ferritic/martensitic steels: Promises and problems // Journal of Nuclear Materials. 1992. Vol. 191. P. 116 – 124.

31. Roy A. K., Kukatla S. R., Yarlagadda B. etc. Tensile properties of martensitic stainless steels at elevated temperatures // Journal of Materials Engineering and Performance. 2005. Vol. 14 (2). P. 212 – 218.

32. Porollo S.I., Dvoriashin A.M., KonobeevYu.V., Garner F.A. Microstructure and mechanical properties of ferritic/martensitic steel EP-823 after neutron irradiation to high doses in BOR-60 // Journal of Nuclear Materials. 2004. Vol. 329-333. P. 314 – 318.

33. Maloy Stuart A., Romero T., James M.R., Dai Y. Tensile testing of EP-823 and HT-9 after irradiation in STIP II // Journal of Nuclear Materials. 2006. Vol. 356. P. 56 – 61.

34. Марочник сталей и сплавов. – 4-е изд, перераб и доп. / Под общей ред. Ю.Г. Драгунова и А.С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2015. – 1216 с.

35. Леонтьева-Смирнова М.В., Агафонов А.Н., Ермолаев Г.Н. и др. Микроструктура и механические свойства малоактивируемой ферритно-мартенситной стали ЭК-181 (RUSFER-EK-181) // Перспективные материалы. 2006. № 6. С. 40 – 52.

36. Пат. 2211878 РФ. Малоактивируемая жаропрочная радиационностойкая сталь / М.И. Солонин, А.Г. Иолтуховский, М.В. Леонтьева-Смирнова и др.; опубл. 10.09.2003.

37. Zhongfei Ye, Wang Pei, Li Dianzhong etc. Effect of carbon and niobium on the microstructure and impact toughness of a high silicon 12 % Cr ferritic/martensitic heat resistant steel // Materials Science and Engineering A. 2014. Vol. 616. P. 12 – 19.

38. Зеленский Г.К., Иолтуховский А.Г., Леонтьева-Смирнова М.В. и др. Исследование коррозионной стойкости стальной оболочки твэла в свинцовом теплоносителе // Металловедение и термическая обработка металлов. 2007. № 11. С. 34 – 39.

39. Ye Zhongfei, Wang Pei, Li Dianzhong, Li Yiyi. M23C6 precipitates induced inhomogeneous distribution of silicon in the oxide formed on a high-silicon ferritic/martensitic steel // Scripta Materialia. 2015. Vol. 97. P. 45 – 48.

40. Справочник по свойствам материалов для перспективных реакторных технологий. Т. 5. Свойства реакторных сталей и сплавов / В.П. Бобков, А.И. Блохин, В.Н. Румянцев и др.; под ред. В.М. Поплавского. – М.: ИздАТ, 2014. – 584 с.

41. Ватулин А.В. Конструкционные и топливные материалы активных зон ядерных реакторов (состояние и направление развития). – В кн.: Топливный цикл ядерной энергетики России. Научные проблемы и перспективы. – М.: ФГУП ВНИИНМ, 2006. С. 113 – 130.

42. Иолтуховский А.Г., Ланская К.А,. Беломытцев Ю.С., Саратовский Л.Н. Выбор режимов термообработки 12%-ной хромистой стали ЭП-823 применительно к условиям работы чехлов ТВС реактора БН-600 // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Атомное материаловедение. 1985. Вып. 2 (19). С. 65 – 70.

43. Бибилашвили Ю.К., Иолтуховский А.Г., Казеннов Ю.И. и др. Служебные характеристики 12 %-ных хромистых сталей применительно к условиям работы элементов активных зон реакторов со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями. – В кн.: Сб. докл. конф. «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях». – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 1999. Т. 2. С. 782 – 791.

44. Иолтуховский А.Г., Леонтьева-Смирнова М.В., Агеев В.С. и др. Влияние исходного структурного состояния на склонность 12 % хромистой стали к охрупчиванию под облучением. – В кн.: Третья межотраслевая конф. по реакторному материаловедению. Дмитровград, 27 – 30 октября 1992 г. Т. 2. – Дмитровград: ГНЦ РФ-НИИАР, 1994. С. 56 – 68.

45. Хабаров В.С., Поролло С.И. Влияние исходной термообработки на механические свойства облученных ферритно-мартенситных сталей ЭИ-842, ЭП-450 и ЗП-823. – В кн.: Сб. докл. Пятой межотраслевой конф. по реакторному материаловедению. Дмитровград, 8 – 12 сентября 1997 г. Т. 2. Ч. 2. – Дмитровград: ГНЦ РФ-НИИАР, 1998. С. 123 – 135.

46. Розенберг В.М. Основы жаропрочности металлических материалов. – М.: Металлургия, 1973. – 328 с.

47. Штремель М.А. Прочность сплавов. Ч. 2: Деформация. – М.: ИД МИСиС, 1999. – 518 с.

48. Шлякман Б.М., Ямпольский О.Н., Ратушев Д.В. Один способ определения константы С в параметре Холломона // Металловедение и термическая обработка металлов. 2010. № 9 (663). С. 48 – 51.
49. Образцов С.М., Шимкевич А.Л. Бутстреп-идентификация экспоненциальной зависимости // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2000. Т. 66. № 1. С. 62 – 64.
50. Беломытцев М.Ю., Мордашов С.В. Закономерности кратковременной ползучести стали Ст3 // Изв. вуз. Черная металлургия. 2015. № 11. С. 798 – 801.

Поступила в редакцию 7 сентября 2017 г.
После доработки 11 марта 2019 г.
Принята к публикации 29 марта 2019 г.

Izvestiya VUZov. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2019. Vol. 62. No. 4, pp. 290–302.

CREEP RESISTANCE OF FERRITIC-MARTENSITIC STEEL 16Cr12MoWSiVNbB (EP-823)

***M.Yu. Belomyttsev*[1], *V.G. Molyarov*[2]**

[1] National University of Science and Technology "MISIS" (MISIS), Moscow, Russia
[2] JSC "VNIINEFTEMASH", Moscow, Russia

Abstract. Base characteristics of ferritic-martensitic heat resisting steels with 12 % of chrome are parameters of their strength and creep resistance at temperatures of 600 – 750 °C. Steel 16Cr12MoWSiVNbB (EP-823) is considered as the basic material for manufacturing environments fuel rods (TVEL) of a developed reactor with natural safety of BREST type. In the literature, there are data about its mechanical characteristics for tensile tests in a range of temperatures of 20 – 750 °C and the limited characteristics of rupture strength. Data on its creep velocity is absent. Laws of creep of steel EP-823 were investigated on metal of three heats with weight of 3 kg. The compression tests at air were applied for cylindrical samples of 5 ÷ 6 mm at temperatures of 600 – 760 °C and stresses of 70 – 310 MPa. The base of compression tests did not exceed 11 hours. The structure after quenching and tempering consisted of tempered martensite and 6 – 12 vol. % of delta-ferrite, the grain size was less 20 μm. It is shown, that the description of creep tests results in double logarithmic ($\log(\sigma) - \log(\acute{\varepsilon})$) coordinates provides the best concurrence of results of approximation and experiment, than in half-logarithmic ($\sigma - \log(\acute{\varepsilon})$). The analysis of parametrical dependences on Hollomon's $P_S = (T/1000)[C_S - \log(\acute{\varepsilon})$ and to Larsen-Miller's $P_E = (T/1000)[C_E - \log(\sigma)]$ has allowed to find the equations for creep velocity for the set pressure level of 100 – 220 MPa in the form of $\log(\acute{\varepsilon}) = -19{,}355 + 9{,}17(T/1000)\log(\sigma)$ and ultimate strength of creep under the set admissions for creep velocity of 0,01 – 1 %/hour in the form of $\log(\sigma) = 4{,}304 - 0{,}109(T/1000)[20 - \log(\acute{\varepsilon})]$. Calculations of ultimate strength of creep and creep velocity on pair models and models of Hollomon (Larsen-Miller) give close results, but the preference should be given the second ones as these models consider all three varied factors. Data of control tests under the scheme of a tensile in the same conditions are cited. It is shown, that between results of tests on compression and on tensile at definition of durability characteristics, there is the linear dependence expressed by the equation $\sigma_{0.2}$ at compression = $1.3\sigma_{0.2}$ at tensile. At the analysis of creep it has been established, that creep velocity for steel of one grade (09Cr12W3NbB) and for one heat at different type of loading (tensile or compression) have similar values while creep velocities for steel of one grade (EP-823), but of different heats even at one type of loading – compression, can differ substantially.

Keywords: heat resisting steels, high-Cr steels, martensite, delta-ferrite, isothermal diagram of austenite decomposition, high-temperature strength, yield stress, compression, tensile test, creep, ultimate strength of creep, Larsen-Miller's parameter, creep constitutive equation.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-4-290-302

REFERENCES

1. Beskorovainyi N.M., Kalin B.A., Platonov P.A., Chernov I.I. *Konstruktsionnye materialy yadernykh reaktorov* [Constructional materials of nuclear reactors]. Moscow: Energoatomizdat, 1995, 704 p. (In Russ.).
2. Solonin M.I., Reshetnikov F.G., Ioltukhovskii A.G., Nikulina A.V. New constructional materials for active zones of nuclear power installations. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 2001, no. 4, pp. 17–27. (In Russ.).
3. *Fiziko-energeticheskii institut: letopis' v sud'bakh* [Institute of physics and power engineering: Annals in people destiny]. Zrodnikov A.V. ed. Obninsk: GNTs FR FEI, 2006, 334 p. (In Russ.).
4. Klueh R., Harries D. *High chromium ferritic and martensitic steels for nuclear applications*. Bridgeport, USA: ASTM stock number: MONO3, 2001, 217 p.
5. Yan Wei, Wang Wei, Shan Yiyin, Yang Ke, Sha Wei. *9-12Cr Heat-Resistant Steels. Engineering Materials*. Springer, 2015, 223 p.
6. Gerasimov V.V., Monakhov A.S. *Materialy yadernoi tekhniki. Uchebnik dlya vuzov* [Materials of nuclear technics. Textbook for universities]. Moscow: Energoatomizdat, 1982, 312 p. (In Russ.).
7. Beskorovainyi N.M., Belomyttsev Yu.S., Abramovich M.D., Ivanov V.K., Shulepov V.I. *Konstruktsionnye materialy yadernykh reaktorov. V 2-kh chastyakh. Ch. II: Struktura, svoistva, naznacheniya* [Constructional materials for nuclear reactors. In 2 Parts. Part 2: Structure, properties, application]. Moscow: Atomizdat, 1977, 256 p. (In Russ.).
8. Ibragimov Sh.Sh., Kirsanov V.V., Pyatiletov Yu.S. *Radiatsionnye povrezhdeniya metallov i splavov* [Irradiation damage of metals and alloys]. Moscow: Energoatomizdat, 1985, 240 p. (In Russ.).
9. Klueh R.L. *Elevated-temperature ferritic and martensitic steels and their application to future nuclear reactors*. Oak Ridge, Tennessee, USA, 2004, 66 p.
10. *Fizicheskoe materialovedenie. Uchebnik dlya vuzov. Tom 6:* Kalin B.A., Platonov P.A., Tuzov Yu.V., Chernov I.I., Shtrombakh Ya.I. *Konstruktsionnye materialy yadernoi tekhniki* [Physical material science. Textbook for universities. Vol. 6. Constructional materials of nuclear techniques]. Kalin B.A. ed. Moscow: NIYaU MIFI, 2012, 736 p. (In Russ.).
11. Frost Brian R.T. *Nuclear fuel elements: Design, Fabrication and Performance*. Oxford, 1982. (Russ. ed.: Frost B. *Tvely yadernykh reaktorov*. Moscow: Energoatomizdat, 1986, 248 p.).
12. Lanskaya K.A. *Vysokokhromistye zharoprochnye stali* [High-chromium heat resisting steels]. Moscow: Metallurgiya, 1976, 216 p. (In Russ.).
13. Khimushin F.F. *Nerzhaveyushchie stali* [Stainless steels]. Moscow: Metallurgiya, 1967, 800 p. (In Russ.).
14. Votinov S.N., Golovin I.S., Kolotushkin V.P. Development of perspective materials for fuel rods cover of nuclear reactors on fast neutrons. In: *Atomnye elektrostantsii Rossii. 60 let atomnoi promyshlennosti* [Atomic power stations of Russia. 60 years of the nuclear industry]. Moscow, 2005, pp. 313–335. (In Russ.).
15. Mal'tsev V.V., Ogorodov A.M., Roslyakov V.F., Sergeev G.A., Sheinkman A.G. Operating experience of fuel rods and fuel assembly wrappers (FAW) of reactor BN-600. In: *Trudy Mezhdunarodnoi konferentsii po radiatsionnomu materialovedeniyu, Alushta, 22 – 25 maya 1990 g.* [Papers of Int. Conf. on Radiating Material Science. Alushta. 22 – 25 on May, 1990]. Vol. 4. Kharkov: KhFTI, 1990, pp. 105–112. (In Russ.).

16. Tselishchev A.V., Ageev V.S., Budanov Yu.P., Mitrofanova N.M. Development of structural steel for fuel elements and fuel assemblies of sodium-cooled fast reactors. *Atomic Energy*. 2010, vol. 108, no. 4, pp. 274–280.

17. Solonin M.I., Ioltukhovskii A.G., Bibilashvili Yu.K., Leont'eva-Smirnova M.V., Medvedeva E.A., Mitrofanova N.M., Budanov Yu.P., Chernov V.M., Tselishchev A.V. Problems of creation and development of stainless steels for details of active zones of nuclear reactors on fast neutrons and of thermonuclear reactor of synthesis. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 2001, no. 5, pp. 5–13. (In Russ.).

18. Dvoriashin A.M., Porollo S.I., Konobeev Yu.V., Garner F.A. Influence of high dose neutron irradiation on microstructure of EP-450 ferritic–martensitic steel irradiated in three Russian fast reactors. *Journal of Nuclear Materials*. 2004, vol. 329-333, pp. 319–323.

19. Odette G.R., Alinger M.J., Wirth B.D. Recent developments in irradiation-resistant steels. *Annual Review of Materials Research*. 2008, vol. 38, pp. 471–503.

20. Kupriiyanova Y.E., Bryk V.V., Borodin O.V., Kalchenko A.S., Voyevodin V.N., Tolstolutskaya G.D., Garner F.A. Use of double and triple-ion irradiation to study the influence of high levels of helium and hydrogen on void swelling of 8–12 % Cr ferritic-martensitic steels. *Journal of Nuclear Materials*. 2016, vol. 468, pp. 264–273.

21. Rusanov A.E., Troyanov V.M., Belomyttsev Yu.S., Shulepin S.V. Development and research of covering steels for fuel rods of nuclear power stations with heavy heat carrier. In: *Sbornik dokladov konf. "Tyazhelye zhidkometallicheskie teplonositeli v yadernykh tekhnologiyakh"* [Proc. of the Conf. "Heavy Liquid Metal Heat Carriers in Nuclear Technologies"]. Vol. 2. Obninsk. GNTs RF-FEI, 1999, pp. 673–685. (In Russ.).

22. Roy A.K., Hossain M.K. Cracking of martensitic alloy EP-823 under controlled potential. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2006, vol. 15, no. 3, pp. 336–344.

23. Maloy S.A., Romero T., James M.R. Tensile testing of EP-823 and HT-9 after irradiation in STIP II. *Journal of Nuclear Materials*. 2006, vol. 356, no. 1-3, pp. 56–61.

24. Voyevodin V.N., Karpov S.A., Kopanets I.E., Ruzhytskyi V.V., Tolstolutskaya G.D., Garner. F.A. Influence of displacement damage on deuterium and helium retention in austenitic and ferritic-martensitic alloys considered for ADS service. *Journal of Nuclear Materials*. 2016, vol. 468, pp. 274–280.

25. Ioltukhovskii A.G., Leont'eva-Smirnova M.V., Chernov V.M., Tsvelev V.V., Solonin M.I., Golovanov V.N., Shamardin V.K. Development of new-generation high-temperature 12 % chromium steel 16Kh12v2FTaR with rapid decline of the induced activity for the atomic power engineering of Russia. *Metal Science and Heat Treatment*. 2002, vol. 44, no. 11-12, pp. 482–486.

26. Ioltukhovskiy A.G., Blokhin A.I., Budylkin N.I., Chernov V.M., Leont'eva-Smirnova M.V., Mironova E.G., Medvedeva E.A., Solonin M.I., Porollo S.I., Zavyalsky L.P. Material science and manufacturing of heat-resistant reduced-activation ferritic-martensitic steels for fusion. *Journal of Nuclear Materials*. 2000, vol. 283-287, pp. 652–656.

27. Ioltukhovskiy A.G., Leonteva-Smirnova M.V., Solonin M.I., Chernov V.M., Golovanov V.N., Shamardin V.K., Bulanova T.M., Povstyanko A.V., Fedoseev A.E. Heat resistant reduced activation 12 % Cr steel of 16Cr12W2VTaB type-advanced structural material for fusion and fast breeder power reactors. *Journal of Nuclear Materials*. 2002, vol. 307-311, pp. 532–535.

28. Ioltukhovskii A.G., Leont'eva-Smirnova M.V., Chernov V.M., Tsvelev V.V., Solonin M.I., Golovanov V.N., Shamardin V.K. Development of heat resisting 12 % chromic steel 16Cr12W2VTaB of new generation with fast recession of the induced activity for needs of atomic engineering of Russia. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki (Khar'kov). Seriya: Fizika radiatsionnykh povrezhdenii i radiatsionnoe materialovedenie*. 2003, no. 6. pp. 60–64. (In Russ.).

29. Nikitina A.A., Ageev V.S., Chukanov A.P., Tsvelev V.V., Porezanov N.P., Kruglov O.A. R&D of ferritic-martensitic steel EP450 ODS for fuel pin claddings of prospective fast reactors *Journal of Nuclear Materials*. 2012, vol. 428, pp. 117–124.

30. Klueh R. L., Ehrlich K., Abe F. Ferritic/martensitic steels: Promises and problems. *Journal of Nuclear Materials*. 1992, vol. 191, pp. 116–124.

31. Roy A. K., Kukatla S. R., Yarlagadda B., Potluri V. N., Lewis M., O'Toole B. Tensile properties of martensitic stainless steels at elevated temperatures. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2005, vol. 14 (2), pp. 212–218.

32. Porollo S.I., Dvoriashin A.M., Konobeev Yu.V., Garner F.A. Microstructure and mechanical properties of ferritic/martensitic steel EP-823 after neutron irradiation to high doses in BOR-60. *Journal of Nuclear Materials*. 2004, vol. 329-333, pp. 314–318.

33. Maloy Stuart A., Romero T., James M.R., Dai Y. Tensile testing of EP-823 and HT-9 after irradiation in STIP II. *Journal of Nuclear Materials*. 2006, vol. 356, pp. 56–61.

34. Dragunov Yu.G., Zubchenko A.S., Kashirskii Yu.V., Degtyarev A.F., Zharov V.V., Koloskov M.M,, Orlov A.S., Skorobogatykh V.N. *Marochnik stalei i splavov* [Handbook of steels and alloys]. Dragunov Yu.G., Zubchenko A.S. eds. Moscow: Mashinostroenie, 2015, 1216 p. (In Russ.).

35. Leont'eva-Smirnova M.V., Agafonov A.N., Ermolaev G.N., Ioltukhovskii A.G., Mozhalov E.M., Reviznikov L.I., Tsvelev V.V., Chernov V.M., Bulanova T.M., Golovanov V.N., Ostrovskii Z.O., Shamardin V.K., Blokhin A.I., Ivanov M.B., Kozlov E.V., Kolobov Yu.R., Kardashev B.K. Microstructure and mechanical properties of reduced-activated ferritic-martensitic steel EK-181 (RUSFER-EK-181). *Perspektivnye materialy*. 2006, no. 6, pp. 40–52. (In Russ.).

36. Solonin M.I., Ioltukhovskii A.G., Leont'eva-Smirnova M.V., Bibilashvili Yu.K., Golovanov V.N., Kondrat'ev V.P., Chernov V.M., Shamardin V.K. *Maloaktiviruemaya zharoprochnaya radiatsionnostoikaya stal'* [Heat-resistant reduced-activated irradiation-resistance steel]. Patent RF no. 2211878. Publ. 10.09.2003. (In Russ.).

37. Zhongfei Ye, Wang Pei, Li Dianzhong, Zhang Yutuo, Li Yiyi. Effect of carbon and niobium on the microstructure and impact toughness of a high silicon 12 % Cr ferritic/martensitic heat resistant steel. *Materials Science and Engineering A*. 2014, vol. 616, pp. 12–19.

38. Zelenskii G.K., Ioltukhovskii A.G., Leont'eva-Smirnova M.V., Naumenko I.A., Tolkachenko S.A. Corrosion resistance of fuel element steel cladding in a lead coolant. *Metal Science and Heat Treatment*. 2007, vol. 49, no. 11-12, pp. 533–538.

39. Ye Zhongfei, Wang Pei, Li Dianzhong, Li Yiyi. M23C6 precipitates induced inhomogeneous distribution of silicon in the oxide formed on a high-silicon ferritic/martensitic steel. *Scripta Materialia*. 2015, vol. 97, pp. 45–48.

40. Bobkov V.P., Blokhin A.I., Rumyantsev V.N., Solov'ev V.A., Tarasikov V.P. *Spravochnik po svoistvam materialov dlya perspektivnykh reaktornykh tekhnologii. T. 5: Svoistva reaktornykh stalei i splavov* [Handbook on properties of materials for perspective nuclear reactor technologies. Vol. 5. Properties of nuclear reactor steels and alloys.]. Poplavskii V.M. ed. Moscow: IzdAT, 2014, 584 p. (In Russ.).

41. Vatulin A.V. Constructional and fuel materials of active zones of nuclear reactors (condition and direction of development). In: *Toplivnyi tsikl yadernoi energetiki Rossii. Nauchnye problemy i perspektivy* [The fuel cycle of nuclear power of Russia. Scientific problems and prospects]. Moscow: FGUP VNIINM, 2006, pp. 113–130. (In Russ.).

42. Ioltukhovskii A.G., Lanskaya K.A,. Belomyttsev Yu.S., Saratovskii L.N. Investigation of heat treatment conditions of 12 %- chromic steel EP-823 with reference to operating conditions of fuel assembly wrappers (FAW) of reactor BN-600. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Ser. Atomnoe materialovedenie*. 1985. Issue 2 (19), pp. 65–70. (In Russ.).

43. Bibilashvili Yu.K., Ioltukhovskii A.G., Kazennov Yu.I., Budanov Yu.P., Chernov V.M. Service characteristics of 12 % chromic steels with reference to operating conditions of elements of active zones of nuclear reactors with lead and lead – bismuth heat carrier.

In: *Sbornik dokladov konferentsii "Tyazhelye zhidkometallicheskie teplonositeli v yadernykh tekhnologiyakh"* [Proc. of the Conf. "Heavy Metal Liquid Heat Carriers in Nuclear Technology"]. Vol. 2. Obninsk: GNTs RF-FEI, 1999, pp. 782–791. (In Russ.).

44. Ioltukhovskii A.G., Leont'eva-Smirnova M.V., Ageev V.S., Golovanov V.N., Kondrat'ev V.P., Shamardin V.K., Chernov V.M. Influence of initial structural condition on propensity of 12 % of chromic steel to embrittlement under irradiation. In: *Tret'ya mezhotraslevaya konferentsiya po reaktornomu materialovedeniyu. Dmitrovgrad. 27 – 30 oktyabrya 1992 g.* [The 3th Interbranch Russian Conf. on Reactor Material Science. October, 27–30, 1994, Dimitrovgrad]. Vol. 2. Dmitrovgrad: GNTs RF-NIIAR, 1994, pp. 56–68. (In Russ.).

45. Khabarov V.S., Porollo S.I. Influence of initial heat treatment on mechanical properties of irradiated ferritic-martensitic steels EI-842, EP-450 and EP-823. In: *Sbornik dokladov Pyatoi mezhotraslevoi konferentsii po reaktornomu materialovedeniyu. Dmitrovgrad. 8 – 12 sentyabrya 1997 g.* [Proc. of the 5th Interbranch Russian Conf. on Reactor Material Science. September 8–12, 1997, Dimitrovgrad]. Vol. 2. Part 2. Dmitrovgrad: GNTs RF-NIIAR, 1998, pp. 123–135. (In Russ.).

46. Rozenberg V.M. *Osnovy zharoprochnosti metallicheskikh materialov* [Basics of thermal stability of metal materials]. Moscow: Metallurgiya, 1973, 328 p. (In Russ.).

47. Shtremel' M.A. *Prochnost' splavov. Chast' 2: Deformatsiya* [Alloy strength. Part 2. Deformation]. Moscow: ID MISiS, 1999, 518 p. (In Russ.).

48. Shlyakman B.M., Yampol'skii O.N., Ratushev D.V. A method for determining constant C in the Hollomon parameter. *Metal Science and Heat Treatment*. 2011, vol. 52, no. 9-10, pp. 451–453.

49. Obraztsov S.M., Shimkevich A.L., Obraztsov S.M, Shimkevich A.L. Bootstrep-identification of exponential dependence. *Zavodskaya laboratoriya*. 2000, vol. 66, no. 1, pp. 62–64. (In Russ.).

50. Belomyttsev M.Yu., Mordashov S.V. Regularities of short-term creep of St3 steel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, no. 11, pp. 798–801. (In Russ.).

Information about the authors:

M.Yu. Belomyttsev, *Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Metallography and Physics of Strength"* (myubelom@yandex.ru)

V.G. Molyarov, *Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Deputy Head of Department of Materials Science and Welding of Oil Equipment* (molyaron@mail.ru)

Received September 7, 2017
Revised March 11, 2019
Accepted March 29, 2019