

ЗАКОНОМЕРНОСТИ КРАТКОВРЕМЕННОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ СТАЛИ Ст3

Беломытцев М.Ю.¹, д.т.н., профессор кафедры металловедения
и физики прочности (myubelom@yandex.ru)
Мордашов С.В.², научный сотрудник (Pris3@mail.ru)

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

² Академия Государственной Противопожарной Службы МЧС России
(129366, Россия, Москва, ул. Бориса Галушкина, 4)

Аннотация. Исследовано поведение строительной стали Ст3 в условиях кратковременных нагревов в диапазоне температур 450 – 650 °С и кратковременного ресурса (до двух часов) при уровне начальных напряжений не выше предела текучести. Обнаружено, что в этих условиях исходная ферритно-перлитная структура стали обладает достаточной стабильностью и рекристаллизации не наблюдается. Показано, что при температуре испытания 450 °С для стали Ст3 при уровнях напряжений ~ 0,8 предела ее текучести при 20 °С время до разрушения может составлять от часов до суток. При температуре 650 °С разрушение при уровнях напряжений $\sigma/\sigma_{0,2}^{20}$ более 0,8 будет наступать через минуты. Вычисленная энергия активации 310,8 ÷ 387,8 Кдж/моль процессов ползучести стали Ст3 может быть соотнесена с энергией активации самодиффузии α -железа.

Ключевые слова: конструкционные строительные стали, структура, феррит, перлит, ползучесть, пределы ползучести, энергия активации ползучести.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-11-798-802

Вопросы конструкционной прочности строительных сталей в условиях воздействия повышенных (до 650 °С) температур являются актуальными при проектировании строительных конструкций. Поведение материалов при кратковременных (до нескольких часов) нагревах определяется как снижением их прочностных характеристик, вызванных повышением температуры, так и действием процессов ползучести (чаще по условиям эксплуатации – кратковременной). Исходя из этого, авторами изучено сопротивление ползучести стали Ст3 при температурах 450 – 650 °С и времени испытания до двух часов.

Исследование проводили на образцах из углеродистой строительной стали обыкновенного качества Ст3 (горячекатаный прутки диаметром 20 мм в состоянии поставки) с длиной рабочей части 70 мм и диаметром 7 мм. Химический состав металла в сопоставлении с требованиями ГОСТ 380-94 «Сталь углеродистая обыкновенного качества» приведен в табл. 1. Из числа значимых элементов сталь данной плавки содержит, % (по массе): 0,13 С; 0,6 Мн; 0,15 Si; 0,11 Cu. Микроструктура металла исследовалась на шлифах, плоскость которых была перпендикулярна длинной оси образца (это же и ось исходного прутка). Выявление структуры производилось травлением полированных шлифов раствором азотной кислоты в этиловом спирте. Испытания на ползучесть проводили по схеме растяжения на испытательной машине АИМА-5 на воздухе при температурах 450 – 650 °С от 2 мин до 2 ч под напряже-

нием 65 – 330 МПа, что составляет $(0,7 – 1,8)\sigma_{0,2}$ при заданных температурах испытаний. При выборе уровней напряжений исходили из справочных данных [1 – 6] и собственных испытаний кусков из того же материала на сжатие с пересчетом на растяжение с уменьшающим коэффициентом 1,3, найденном авторами в опытах на хромистых сталях. Колебания температуры в процессе единичного опыта не превышали ± 4 °С. Нагрев образ-

Таблица 1

Химический состав стали

Table 1. Chemical composition of steel

Элемент	Содержание легирующих и примесных элементов, % (по массе)	
	по требованиям ГОСТ	по факту
C	0,14 – 0,22	0,110 – 0,150
Mn	0,40 – 0,65	0,570 – 0,620
Si	0,15 – 0,30	0,140 – 0,170
P	≤ 0,04	0,010 – 0,013
S	≤ 0,05	0,010 – 0,027
Cr	≤ 0,30	0,060 – 0,070
Ni	≤ 0,30	0,050 – 0,090
Cu	≤ 0,30	0,050 – 0,190
N	≤ 0,01	0,006 – 0,008
As	≤ 0,08	0,006 – 0,008

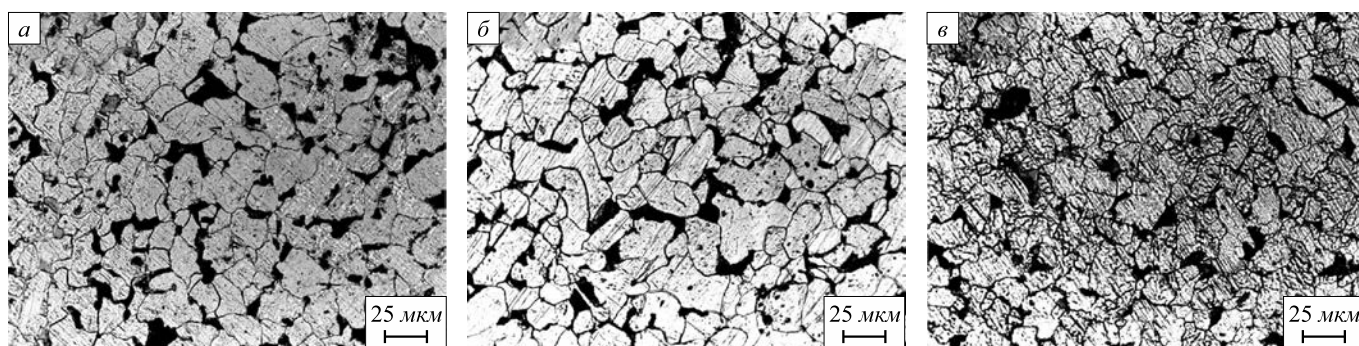


Рис. 1. Структура стали Ст3 в исходном состоянии (а) и после испытания на ползучесть при 650 °С (б, в): б – участок образца с равномерной деформацией, в – область местного утонения (шейки); плоскость шлифов везде перпендикулярна длинной оси прутка (образцов). Размерный штрих – 50 мкм

Fig. 1. Structure of St3 steel in an initial condition (а) and after test for creep at 650 °С (б, в): б – site of a sample with uniform deformation; в – area of neck; the plane of metallographic samples everywhere is perpendicular to a long axis tensile of specimen. A dimensional stroke – 50 microns

ца занимал 1 – 1,5 ч, охлаждение – до 1 ч. Испытания заканчивали либо по временному ресурсу (2 ч), либо по признаку начала стадии разрушения. При каждой температуре проводили две серии опытов для выбранных уровней напряжений.

Результаты структурных исследований показали следующее. Исходная структура материала была характерна для горячекатаного металла и представляла собой равноосные зерна феррита размером 17 ± 6 мкм (определено по измерению 180 – 220 хорд) и несвязные области перлита объемной долей $\sim 17\%$ (определено точечным методом на 500 точках пересечений), как правило меньшего, чем феррит, размера, расположенные преимущественно по границам зерен феррита, либо в их тройных стыках (рис. 1, а). Установлено (рис. 1, б, в), что в принятых условиях испытаний исходная феррито-перлитная структура обладает достаточной стабильностью: при всех соотношениях параметров «напряжение – время – температура» как в области захватов (где уровни нагрузки были на порядок меньше предела текучести и все воздействие сводилось только к температурной выдержке), так и в пределах рабочей части образцов (за исключением зоны конечного утонения в области шейки) как характер, так и количественные показатели структуры остались такими же, как в исходном материале (см. рис. 1, б). Только в области утонения (шейки) в пределах ферритных зерен исходного размера (~ 17 мкм) отчетливо наблюдается образование субзеренной равноосной структуры с размерами фрагментов 5 – 9 мкм (см. рис. 1, в). Ни в одном из опытов признаков рекристаллизации обнаружено не было.

На первичных кривых ползучести стали Ст3 (рис. 2) в целом наблюдаются все три стадии ползучести. По ним (удлинение образца – время испытания) определяли скорость ползучести на стационарном участке. По этим данным рассчитаны скорости установившейся ползучести $\dot{\epsilon}$ для различных температур и началь-

ных уровней напряжений σ . Полученные наборы точек (рис. 3) (для каждой из температур и для каждой серии испытаний отдельно) описывались линейными зависимостями в координатах $\log(\sigma) - \log(\dot{\epsilon})$ для определения пределов ползучести в соответствии с требованиями ГОСТ и в обратных им координатах $\log(\dot{\epsilon}) - \log(\sigma)$ для определения уровня деформации по заданной базе испытания. На рис. 3 приведены данные двух серий испытаний для каждой температуры, из которых видна хорошая сопоставимость результатов, разнесенных во времени более чем на год.

В табл. 2 представлены коэффициенты соответствующих зависимостей. Полученные результаты, представленные в табл. 2, позволяют прогнозировать временное накопление пластической деформации

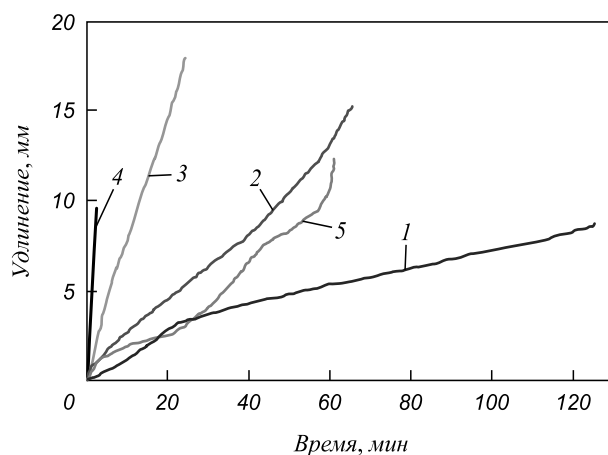


Рис. 2. Первичные кривые ползучести образцов стали Ст3 при растяжении при 650 °С (кривые 1 – 4) и 550 °С (кривая 5) и начальных уровнях напряжений 60 (кривая 1), 80 (кривая 2), 90 (кривая 3), 108,7 (кривая 4) и 200 (кривая 5) МПа

Fig. 2. Initial curves of creep of samples of St3 steel, tested at 650 °С (curves 1 – 4) and 550 °С (curve 5) and initial levels of stress 60 (a curve 1), 80 (a curve 2), 90 (a curve 3), 108,7 (a curve 4) and 200 (a curve 5) MPa

Таблица 2

Параметры линейных зависимостей связи скорости ползучести и напряжения (а также обратных им зависимостей напряжения от скорости установившейся ползучести) для стали Ст3 в зависимости от температуры испытания

Table 2. The parameters of linear dependency rate due to creep and stress (and inverses to them voltage dependence of steady creep rate) for St3 steel, depending on the test temperature

T, °C	Серия испытаний	Показатели зависимости $\log(\sigma) = a + b \log(\dot{\epsilon})$		Показатели зависимости $\log(\dot{\epsilon}) = a_1 + b_1 \log(\sigma)$	
		a	b	a ₁	b ₁
450	1	2,526	0,265	– 9,53	3,772
	2	2,45	0,092	– 22,044	9,001
550	1	2,224	0,075	– 29,598	13,307
	2	2,159	0,076	– 27,193	12,607
650	1	1,779	0,101	– 17,447	9,813
	2	1,775	0,134	– 12,684	7,176

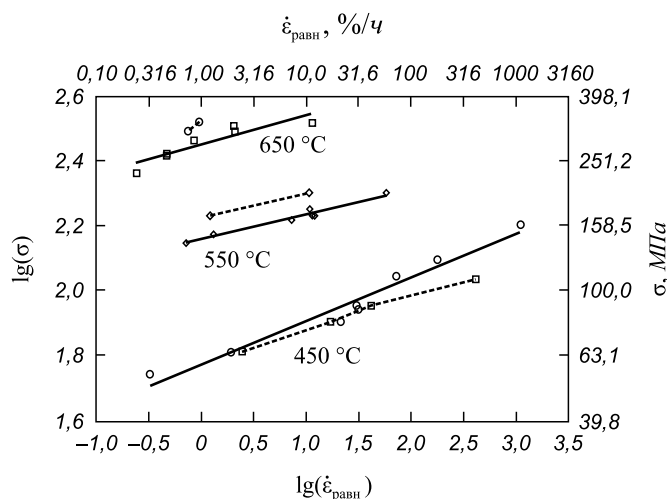


Рис. 3. Зависимость скорости ползучести от напряжения для стали Ст3 при температурах испытания 450, 550 и 650 °C. Сплошные линии – результаты первой серии опытов, штриховые – второй

Fig. 3. The dependence of creep rate (%/h) on a applied stress (MPa) for St3 steel at test temperatures 450, 550 and 650 °C. Continuous lines – results of the first series of experiences, shaped – the second

конструкций для заданного уровня напряжений. В качестве таковых (с точки зрения работоспособности материала) выбраны значения: 1 % (допустимый уровень); 10 % (критический уровень); 25 % (разрушение). Вычисленные временные показатели приведены в табл. 3. По этим данным временной ресурс стали Ст3 при 450 °C может составлять до нескольких суток в зависимости от уровня напряжений σ при 450 °C [из диапазона (0,8 – 1,2) $\sigma/\sigma_{0,2}^{450}$]. По отношению к пределу текучести при 20 °C (225 – 245 МПа при испытании на

растяжение по данным работы [1]) эти уровни напряжений составляют соответственно (0,7 ÷ 1,1) $\sigma/\sigma_{0,2}^{20}$. При температуре 650 °C время до разрушения исчисляется минутами при уровнях напряжений $\sigma/\sigma_{0,2}^{20} = 0,15 \div 0,5$.

Результаты испытаний при различных температурах позволяют определить температурную зависимость процессов ползучести [7 – 9] стали Ст3. Для этого при фиксированных уровнях напряжений (90, 130, 170 МПа)

Таблица 3

Зависимость времени предельной эксплуатации от температуры, уровня напряжений и показателя общей накопленной деформации при ползучести стали Ст3

Table 3. The dependence of the time of limit operating from temperature, stress level and measure of total accumulated strain at creep of St3 steel

T, °C	Параметры нагрузки			Скорость ползучести, %/ч	Время до накопления общей деформации, равной, %		
	$\sigma_{0,2}^{\text{сжатие}}$, МПа при этой температуре	заданное σ , МПа	уровень напряжения, $\sigma/\sigma_{0,2}$		1	10	25
450	240 – 280	230	0,8 ÷ 0,9	0,237	(4 ÷ 6) ч	(1,5 ÷ 2,5) сут	(4,5 – 9,0) сут
		290	1,0 ÷ 1,2	0,833	(1 ÷ 1,5) ч	(9 ÷ 15) ч	(1 ÷ 2) сут
		330	1,2 ÷ 1,3	0,933	(14 ÷ 60) мин	(2,5 ÷ 10) ч	(10 ÷ 30) ч
550	160 – 190	140	0,7 ÷ 0,8	0,704	(1,5 ÷ 10) ч	(0,5 ÷ 5) сут	(1,5 ÷ 11) сут
		170	0,9 ÷ 1,1	1 – 11	(7 ÷ 50) мин	(1 ÷ 8) ч	(3 ÷ 20) ч
		200	1,1 ÷ 1,3	11 – 60	(1 ÷ 6) мин	(10 ÷ 60) мин	(0,5 ÷ 2,5) ч
650	90 – 115	55,4	0,5 ÷ 0,6	0,32	(1,5 ÷ 2) ч	(15 ÷ 20) ч	(1,5 – 2,5) сут
		90	0,8 ÷ 1,0	30 – 41	(1 ÷ 3) мин	(10 ÷ 30) мин	(30 ÷ 70) мин
		160	1,4 ÷ 1,8	1077	менее 1 мин	менее 1 мин	~ 1 мин

строились зависимости натурального логарифма скорости установившейся ползучести (%/ч) от обратной температуры в °К. Примеры таких зависимостей приведены на рис. 4. По углу наклона прямых на рис. 4 вычислены энергии активации процесса ползучести. Их значения лежат в диапазоне $310,8 \div 387,8$ кДж/моль, при этом для энергии активации самодиффузии α -железа известны экспериментально определенные значения от 196 до 326 кДж/моль [10 – 11].

Выводы. Временной ресурс при температуре 450 °С для стали Ст3 при уровнях напряжений $\sim 0,8$ предела ее текучести при 20 °С может составлять от часов до суток. При температуре 650 °С разрушение при уровнях напряжений $\sigma/\sigma_{0,2}^{20}$ более 0,8 будет наступать через минуты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Марочник сталей и сплавов. / Под ред. В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
2. Энциклопедический справочник термиста-технолога. В 3-х томах. Т. 1 / С.Б. Масленков, А.И. Ляпунов, В.М. Зинченко, Б.К. Ушаков. – М.: Наука и технологии, 2003. – 392 с.
3. Марочник стали для машиностроения. Общемашиностроительные типовые и руководящие материалы. – М.: ЦНИИ информации по машиностроению, 1965. – 595 с.
4. Марочник сталей и сплавов. – 2-е изд., доп. и испр. / Ф.С. Зубченко, М.М. Колосков, Ю.С.Каширский и др. / Под общ. ред. А.С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.
5. Конструкционные стали: Справочник. / М.В. Приданцев, Л.Н. Давыдова, А.И. Тамарина и др. – М.: Металлургия, 1980. – 288 с.
6. Журавлев В.Н., Николаева О.И. Машиностроительные стали: Справочник. – 3-е изд., перераб. и дополн. – М.: Машиностроение, 1981. – 391 с.
7. Штремель М.А. Разрушение. В 2-х книгах. Кн. 2 Разрушение структур. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2015. – 976 с.

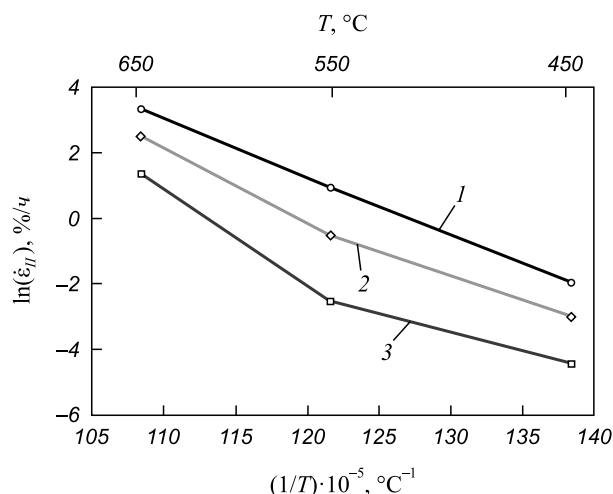


Рис. 4. Зависимость логарифма скорости ползучести от обратной температуры для стали Ст3 при уровнях напряжений, МПа: 1 – 170; 2 – 130; 3 – 90

Fig. 4. Dependence of the logarithm of creep rate on return temperature for St3 steel at levels of stress, MPa: 1 – 170, 2 – 130, 3 – 90

8. Розенберг В.М. Основы жаропрочности металлических материалов. – М.: Металлургия, 1973. – 328 с.
9. Гарофало Ф. Законы ползучести и длительной прочности металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1968. – 304 с.
10. Образцов С.М., Шимкевич А.Л. Бутстреп - идентификация экспоненциальной зависимости // Заводская лаборатория. 2000. Т. 66. № 1. С. 62 – 64.
11. Рачков В.И., Образцов С.М., Биржевой Г.А. и др. Нейросетевой анализ влияния легирующих элементов на радиационное охрупчивание материалов корпусов ВВЭР-440 // Атомная энергия. 2006. Т. 10. Вып. 5, ноябрь. С. 353 – 358.

Поступила 4 сентября 2014 г.

IZVESTIYA VUZov. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 11, pp. 798–802.

REGULARITIES OF SHORT-TERM CREEP OF St3 STEEL

M.Yu. Belomytsev¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair Metallurgy and Physics of Strength
(myrbelom@yandex.ru)

S.V. Mordashov², Researcher

¹ National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS) (4, Leninskii ave., Moscow, 119049, Russia)

² State Fire Academy of Emercom of Russia (4, Borisa Galushkina str., Moscow, 4129366, Russia)

Abstract. The behavior of building steel of the grade St3 was investigated in conditions of short-term heatings in a range of temperatures 450 – 650 °C and a short-term resource (up to 2 hours) in the area of initial stress not above a yield strength. It was revealed, that in these conditions initial ferrite + pearlite structure of steel has sufficient stability and recrystallization is not observed. It is shown, that at test temperature of 450 °C and levels of stress $\sim 0,8$ from a yield strength at 20 °C time before fracture can make from hours up to days for the steel St3. The fracture more than 0,8 at levels of stress $\sigma/\sigma_{0,2}^{20}$ at temperature of 650 °C starts in several minutes. The calculated energy of

activation of 310,8 – 387,8 kJ/mole of the creep processes of St3 steel can be correlated to the activation energy of α -iron self-diffusion.

Keywords: building steel, structure, ferrite, pearlite, creep, limits of creep, energy of creep activation.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-11-798-802

REFERENCES

1. *Marochnik stalei i splavov* [Grade list of steels and alloys]. Sorokin V.G. ed. Moscow: Mashinostroyeniye. 1989. 640 p. (In Russ.).
2. Maslenkov S.B., Lyapunov A.I., Zinchenko V.M., Ushakov B.K. *Entsiklopedicheskii spravochnik termista-tehnologa. Vols 1-3* [Encyclopedic reference of heat-treater]. Vol. 1. Moscow: Nauka i tekhnologii. 2003. 392 p. (In Russ.).
3. *Marochnik stali dlya mashinostroyeniya. Obshchemashinostroyitel'nye tipovye i rukovodyashchie materialy* [Grade list of steels for mechanical engineering. Engineering industry standard and guidance materials]. Moscow: TsNII informatsii po mashinostroyeniyu. 1965. 595 p. (In Russ.).

4. Zubchenko F.S., Koloskov M.M., Kashirskii Yu.S. etc. *Marochnik stalei i splavov* [Grade list of steels and alloys]. Zubchenko A.S. ed. Moscow: Mashinostroenie. 2003. 784 p. (In Russ.).
5. Pridantsev M.V., Davydova L.N., Tamarina A.I. etc. *Konstruktivnyye stali (spravochnik)* [Structural steels (reference book)]. Moscow: Metallurgiya, 1980, 288 p. (In Russ.).
6. Zhuravlev V.N., Nikolaeva O.I. *Mashinostroitel'nye stali (spravochnik)* [Machinery steels (reference book)]. Moscow: Mashinostroenie. 1981. 391 p. (In Russ.).
7. Shtremel' M.A. *Razrushenie. Books 1-2* [Destruction]. Book 2. *Razrushenie struktur: monogr.* [Destroyed structures: monograph]. Moscow: Izd. Dom MISiS, 2015. 976 p. (In Russ.).
8. Rozenberg V.M. *Osnovy zharoprochnosti metallicheskih materialov* [Fundamentals of heat resistance of metallic materials]. Moscow: Metallurgiya, 1973. 328 p. (In Russ.).
9. Garofalo F. *Fundamentals of Creep and Creep-rupture in metals*. New York and London, 1965. (Russ.ed.: Garofalo F. *Zakony polzuchesti i dlitel'noi prochnosti metallov i splavov*. Moscow: Metallurgiya. 1968. 304 p.).
10. Obratsov S.M., Shimkevich A.L. Bootstrap – identification of the exponential dependence. *Zavodskaya laboratoriya*. 2000, vol. 66, no. 1, pp. 62–64. (In Russ.).
11. Rachkov V.I., Obratsov S.M., Birzhevoi G.A., Konobeev Yu.V., Pechenkin V.A. Neuronet analysis of the effect of alloying elements on the radiation embrittlement of VVER-440 vessel materials. *Atomic energy*. 2006, vol. 101, no. 5, pp. 809–815.

Received September 4, 2014
