

ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА HP40Nb ПРИ ПЕРЕГРЕВАХ ДО 1150 °С

С.Ю. Кондратьев^{1*}, М.Д. Фукс², Г.П. Анастасиади¹, А.В. Пташник²,
Е.В. Святышева²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Политехническая 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия

²ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», Шпалерная, 49, Санкт-Петербург, 191015, Россия

*e-mail: petroprom2013@yandex.ru

Аннотация. Получены экспериментальные значения длительной прочности литого жаропрочного сплава HP40Nb при температуре 1150 °С. Установлено, что работоспособность сплава при этой температуре соответствует более легированным никелем и вольфрамом сплавам. Показана возможность повышения допустимого температурного интервала эксплуатации экономнолегированного сплава до 1100-1200 °С в установках пиролиза углеводородного сырья.

1. Введение

В настоящее время в качестве штатных конструкционных материалов для змеевиковых систем высокотемпературных установок в нефтехимической промышленности применяются жаропрочные аустенитные сплавы на Fe-Cr-Ni основе HP-серий [1-3]. Сплавы используются в литом состоянии, поскольку считается, что оно обеспечивает наиболее высокую длительную прочность при температурах эксплуатации. Эти материалы являются сложнолегированными системами, упрочнение в которых осуществляется за счет образования в структуре при кристаллизации и охлаждении карбидных фаз различного состава, формирующихся в виде межкристаллитной сетки и отдельных частиц [4-7]. Змеевиковые системы работают в предельно жестких условиях: перепад температур по толщине стенки (8-15 мм) реакционной трубы достигает 250 °С при значениях температур на внутренней и наружной поверхностях соответственно 850 и 1100 °С. Процесс интенсификации производства идет по пути повышения температуры в зоне реакции, следовательно, в ближайшее время верхний предел температурного диапазона будет стремиться к температуре 1150 °С. В связи с этим необходима количественная экспериментальная оценка работоспособности HP сплавов при повышенных температурах.

Целью работы является исследование длительной прочности сплава HP40Nb при температуре эксплуатации 1150 °С.

2. Материал и методика исследования

Исследовали сплав HP40Nb, применяемый для изготовления радиантных змеевиков высокотемпературных установок пиролиза. Сплав выплавляли в индукционных печах емкостью 500 кг на чистых шихтовых материалах и разливали в песчаные формы. Фактический химический состав исследованного сплава приведен в Таблице 1.

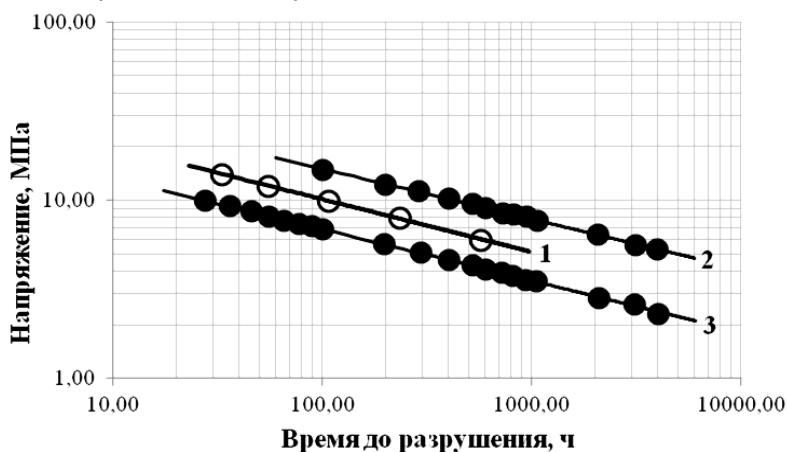
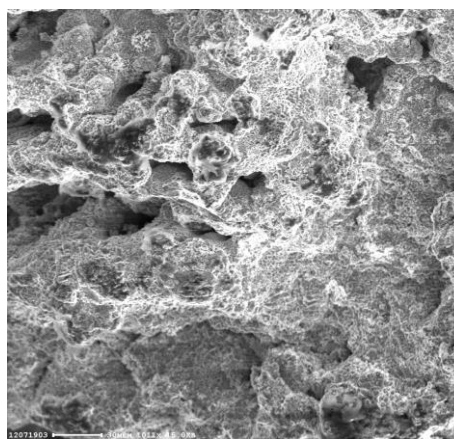


Рис. 3. Длительная прочность сплава HP40Nb при 1150 °С (1) и сплава 28Cr48Ni5W [8] при 1100 (2) и 1200 °С (3).

Следует отметить, что излом исследованного сплава после разрушения под действием приложенной нагрузки разной величины имеет вид поверхности вязкого преимущественно межзеренного разрушения дендритной морфологии, а относительное остаточное удлинение составляет 10-13 % (Рис. 4). Это свидетельствует, что сплав HP40Nb, обладая высокой длительной прочностью при 1150 °С, имеет и достаточный запас пластичности.



а)



б)

Рис. 4. Внешний вид (а) и излом при увеличении $\times 1000$ (б) образца литого сплава HP40Nb после испытаний на длительную прочность при температуре 1150 °С и напряжении 12 МПа.

Обработка результатов испытаний методом наименьших квадратов показала, что зависимость длительной прочности исследованного сплава в логарифмических координатах имеет вид прямой (Рис. 3), описываемой уравнением (1):

$$\sigma_{dl} = \frac{\sigma_0}{(\tau/\tau_0)^{0,3}}, \quad (1)$$

где σ_{dl} — длительная прочность при температуре $T = 1150$ °С; $\sigma_0 = 14$ МПа и $\tau_0 = 33$ ч — соответственно длительная прочность и время для первой серии испытаний при температуре $T = 1150$ °С, принятой за базу.

Экспериментальные и рассчитанные по формуле (1) значения длительной прочности сплава HP40Nb при температуре 1150 °С приведены в Таблице 2.

Таблица 2. Экспериментальные и расчетные значения длительной прочности сплава HP40Nb при температуре 1150°C ($\sigma_0 = 14$ МПа и $\tau_0 = 33$ ч).

№	Напряжение, МПа		Время до разрушения, ч.
	Фактическое	Расчетное	
1	14	13,940	33
2	12	12,010	55
3	10	9,865	106
4	8	7,799	232
5	6	5,970	565

Общепринято, что для оценки жаропрочности сплавов наиболее достоверными являются значения длительной прочности, полученные с помощью расчета по методам, основанным на принципе эквивалентных состояний [9]. К таким методам относится расчет температурно-временных параметров, являющихся наиболее используемыми при обработке экспериментальных данных [10]. Параметрический метод основан на таком видоизменении шкалы времени для деформации ползучести, при котором все изотермические кривые ползучести совпадают или разрушение при данном значении напряжения происходит при одинаковом значении времени, скорректированном с учетом температуры испытания. Иными словами, можно построить единую зависимость между логарифмом напряжения и принятым параметром, используя данные при различных температурах испытаний. Величину параметра для каждого испытания определяют по формуле:

$$P_{д.н.} = T(\lg \tau_k + c) \cdot 10^{-3}, \tag{2}$$

где T – температура испытания, К; τ_k – время до разрушения, ч; c - постоянная. Величину постоянной c принимают равной 20. По средним величинам параметра длительной прочности проводят прямую линию условной параметрической диаграммы. Далее, подставляя вместо τ_k заданный ресурс, по формуле (2) вычисляют значение параметра. По вычисленному параметру и линии условной параметрической диаграммы определяют приближенную величину предела длительной прочности $\sigma_{д.н.}$

На Рис. 5 представлена условная параметрическая диаграмма для сплава 28Cr48Ni5W, построенная по данным [8] с использованием значений его длительной прочности при температурах 1100 и 1200 °С. На этом же рисунке показаны значения длительной прочности исследованного сплава HP40Nb при температуре 1150 °С.

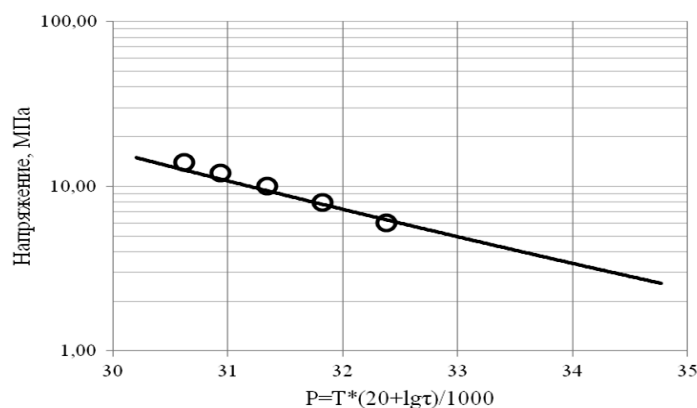


Рис. 5. Расчетная условная параметрическая кривая для сплава 28Cr48Ni5W (—) и экспериментальные результаты испытаний сплава HP40Nb (○)

Из полученных результатов следует, что по уровню жаропрочности сплав HP40Nb полностью соответствует сплаву 28Cr48Ni5W. Таким образом, несмотря на выявленные в [11-13] особенности структуры литого сплава HP40Nb, свидетельствующие о ее высокотемпературной нестабильности, этот материал имеет высокую длительную прочность при температурах эксплуатации до 1150 °С, сопоставимую с более легированными жаропрочными сплавами.

Таким образом, экономнолегированный сплав HP40Nb является конкурентоспособным по сравнению с более дорогими высоколегированными жаропрочными сплавами при использовании в качестве конструкционного материала для изготовления высокотемпературного оборудования различного назначения с рабочей температурой выше 1100 °С.

4. Выводы

Экспериментально определена длительная прочность литого сплава HP40Nb (0,5С-25Cr-35Ni-2Nb-Fe) при температуре 1150 °С. Установлено, что по уровню жаропрочности экономнолегированный сплав HP40Nb не уступает таким жаропрочным высоколегированным никелем и вольфрамом сплавам, как 28Cr48Ni5W, и может быть использован для изготовления высокотемпературных установок с температурой эксплуатации 1100-1150 °С. На основании математической обработки экспериментальных данных получена эмпирическая формула, позволяющая рассчитывать значение длительной прочности сплава HP40Nb при температуре 1150 °С и различной величине внешнего напряжения.

Литература

- [1] M. Garbiak, W. Jasinski, B. Piekarski // *Archives of Foundry Engineering* **11** (2011) 47.
- [2] J.C.M. Farrar, In: *The alloy tree: A guide to low-alloy steels, stainless steels and nickel-base alloys*, ed. by Boca Raton (Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, 2004), p. 117.
- [3] С.Ю. Кондратьев, Г.П. Анастасиади, А.С. Орыщенко, М.Д. Фукс // *Заготовительные производства в машиностроении* **10** (2012) 31.
- [4] A.I. Rudskoy, A.S. Oryshchenko, S.Yu. Kondrat'ev, G.P. Anastasiadi, M.D. Fuks // *Metal Science and Heat Treatment* **56(1-2)** (2014) 3.
- [5] A.I. Rudskoy, S.Yu. Kondrat'ev, G.P. Anastasiadi, A.S. Oryshchenko, M.D. Fuks // *Metal Science and Heat Treatment* **56(3-4)** (2014) 124.
- [6] A.I. Rudskoi, G.P. Anastasiadi, S.Yu. Kondrat'ev, A.S. Oryshchenko, M.D. Fuks // *The Physics of Metals and Metallography* **115(1)** (2014) 1.
- [7] A.I. Rudskoy, S.Yu. Kondrat'ev, G.P. Anastasiadi, A.S. Oryshchenko, M.D. Fuks, S.N. Petrov // *Metal Science and Heat Treatment* **55(9-10)** (2014) 517.
- [8] *Марочник стали для машиностроения* (НИИ информации по машиностроению, М., 1965).
- [9] А.Э. Угорский // *Проблемы прочности* **1** (1986) 40.
- [10] Iain Le May // *Journal of Engineering Materials and Technology* **101 (4)** (1979) 326.
- [11] А.С. Орыщенко, С.Ю. Кондратьев, Г.П. Анастасиади, М.Д. Фукс, С.Н. Петров // *Научно-технические ведомости СПбГПУ* **142** (2012) 155.
- [12] А.С. Орыщенко, С.Ю. Кондратьев, Г.П. Анастасиади, М.Д. Фукс, С.Н. Петров // *Научно-технические ведомости СПбГПУ* **147-1** (2012) 217.
- [13] А.И. Рудской, Г.П. Анастасиади, А.С. Орыщенко, С.Ю. Кондратьев, М.Д. Фукс // *Научно-технические ведомости СПбГПУ* **154-2** (2012) 143.

ASSESSMENT OF OPERABILITY OF THE HEAT RESISTING HP40Nb AT OVERHEATS TO 1150 °C

S.Yu. Kondrat'ev¹, M.D. Fuks², G.P. Anastasiadi¹, A.V. Ptashnik², E.V. Sviatysheva²

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Polytechnicheskaya 29, St. Petersburg, 195251, Russia

²Central Research Institute of Structural Materials "Prometey", Shpalernaya 49, St. Petersburg, 191015, Russia

*e-mail: petroprom2013@yandex.ru

Abstract. Experimentally was determined long-term strength of cast heat-resistant alloy HP40Nb at the temperature of 1150 °C. It was shown that on this feature this alloy is not inferior to alloys with more nickel and tungsten, which allows rising its operational temperature range up to 1100-1150 °C. The equation, which allows calculating the value of long-term strength of the alloy HP40Nb at different values of the external stress, was found.

References

- [1] M. Garbiak, W. Jasinski, B. Piekarski // *Archives of Foundry Engineering* **11** (2011) 47.
- [2] J.C.M. Farrar, In: *The alloy tree: A guide to low-alloy steels, stainless steels and nickel-base alloys*, ed. by Boca Raton (Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, 2004), p. 117.
- [3] S.Yu. Kondrat'ev, G.P. Anastasiadi, A.S. Oryshchenko, M.D. Fuks // *Blanking Productions in Mechanical Engineering* **10** (2012) 31. (In Russian).
- [4] A.I. Rudskoy, A.S. Oryshchenko, S.Yu. Kondrat'ev, G.P. Anastasiadi, M.D. Fuks // *Metal Science and Heat Treatment* **56(1-2)** (2014) 3.
- [5] A.I. Rudskoy, S.Yu. Kondrat'ev, G.P. Anastasiadi, A.S. Oryshchenko, M.D. Fuks // *Metal Science and Heat Treatment* **56(3-4)** (2014) 124.
- [6] A.I. Rudskoi, G.P. Anastasiadi, S.Yu. Kondrat'ev, A.S. Oryshchenko, M.D. Fuks // *The Physics of Metals and Metallography* **115(1)** (2014) 1.
- [7] A.I. Rudskoy, S.Yu. Kondrat'ev, G.P. Anastasiadi, A.S. Oryshchenko, M.D. Fuks, S.N. Petrov // *Metal Science and Heat Treatment* **55(9-10)** (2014) 517.
- [8] *The list of steels for mechanical engineering* (Science-Research Institution of information on mechanical engineering, Moscow, 1965).
- [9] A.E. Ugorski' // *Strength of Materials* **18(1)** (1986) 37.
- [10] Iain Le May // *Journal of Engineering Materials and Technology* **101 (4)** (1979) 326.
- [11] A.S. Oryshchenko, S.Yu. Kondrat'ev, G.P. Anastasiadi, M.D. Fuks, S.N. Petrov // *St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Sciences and Technology* **142** (2012) 155. (In Russian).
- [12] A.S. Oryshchenko, S.Yu. Kondrat'ev, G.P. Anastasiadi, M.D. Fuks, S.N. Petrov // *St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Sciences and Technology* **147-1** (2012) 217. (In Russian).
- [13] A.I. Rudskoy, G.P. Anastasiadi, A.S. Oryshchenko, S.Yu. Kondrat'ev, M.D. Fuks // *St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Sciences and Technology* **154-2** (2012) 143. (In Russian).