

**Механика материалов:
прочность, ресурс, безопасность****Materials mechanics:
strength, durability, safety**DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2024-90-8-55-63>**МАЛОЦИКЛОВАЯ УСТАЛОСТЬ СТАЛИ 15NiCuMoNb5 (WB36)
И ЕЕ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ**© **Евгений Алексеевич Гринь¹, Александр Георгиевич Казанцев²,
Александр Владимирович Зеленский^{1*}**¹ ОАО «ВТИ», Россия, 115280, Москва, Автозаводская ул., д. 14; *e-mail: AVZelensky@vti.ru² АО «НПО ЦНИИТМАШ», Россия, 115088, Москва, Шарикоподшипниковская ул., д. 4.*Статья поступила 17 января 2024 г. Поступила после доработки 6 марта 2024 г.
Принята к публикации 28 марта 2024 г.*

Отмечены специфические особенности стали WB36, известные из литературных источников. Сведения о результатах исследований стали WB36 и ее сварных соединений российского производства в открытой печати отсутствуют. Цель данной работы — исследование характеристик малоциклового усталости стали 15NiCuMoNb5 (WB36) и ее сварного соединения. Исследования проводили на опытной сварной заготовке металла, изготовленной по штатной технологии и имитирующей натурный фрагмент барабана высокого давления. Испытания на малоцикловую усталость стали WB36 и ее сварного соединения выполняли в режиме жесткого нагружения по симметричному циклу при комнатной (20 – 25 °C) и рабочей (350 °C) температурах. Использовали образцы на растяжение-сжатие корсетного типа; критерием разрушения образца считали появление макротрещины на поверхности его корсетной части. Установлено, что с увеличением температуры испытаний сопротивление малоциклового усталости стали и металла сварного шва снижается. При этом основной металл и металл сварного шва демонстрируют идентичные характеристики малоциклового усталости при каждой из температур испытаний. Выполнен ограниченный объем исследований по влиянию температурного старения на малоцикловую усталость стали. Показано, что малоцикловая прочность исследуемого материала несколько выше, чем стали WB36, результаты испытаний которой представлены в зарубежной технической литературе. Проведен сравнительный анализ экспериментальных кривых малоциклового усталости и соответствующих нормативных расчетных кривых, полученных путем аналитических выражений по фактическим механическим свойствам стали. Показано, что экспериментальные кривые демонстрируют более высокое сопротивление усталости при комнатной температуре по сравнению с кривыми усталости, полученными с помощью механических свойств металла. В то же время при рабочей температуре (350 °C) экспериментальная и расчетная кривые усталости практически совпадают, т.е. демонстрируют примерно одинаковое сопротивление усталости. Приведен пример расчета на малоцикловую усталость барабана высокого давления котла-утилизатора парогазовой установки. Подтверждено, что для заданных исходных параметров и ресурсных показателей условия прочности барабана по критериям малоциклового усталости выполняются.

Ключевые слова: сталь 15NiCuMoNb5 (WB36); сварное соединение; барабан котла; малоцикловая усталость; экспериментальные кривые усталости; термическое старение; расчетные кривые усталости.

LOW-CYCLE FATIGUE OF STEEL 15NiCuMoNb5 (WB36) AND ITS WELDED JOINT© **Evgeniy A. Grin,¹ Alexander G. Kazantsev,² Alexander V. Zelensky^{1*}**¹ JSC “VTI”, 14, Avtozavodskaya ul., Moscow, 115280, Russia; *e-mail: AVZelensky@vti.ru² NPO “TSNIITMASH”, 4, Sharikopodshipnikovskaya ul., Moscow, 115088, Russia.*Received January 17, 2024. Revised March 6, 2024. Accepted March 28, 2024.*

The results of studying the low-cycle fatigue characteristics of steel 15NiCuMoNb5 (WB36) and its welded joints are presented. Brief information is given on the specific features of WB36 steel proceeding from the analysis of literature data. An emphasis is made on the absence of available information on the studies of WB36 steel and its welded joints produced in Russia. The study was carried out on an experimental

welded metal billet produced by standard technology and simulating a full-scale fragment of a high-pressure drum. The methodological aspects of the conducted research are described. Tests for low-cycle fatigue of WB36 steel and its welded joints were performed in the mode of hard loading in a symmetrical cycle at room (20 – 25°C) and operating (350°C) temperatures. Corset-type tensile and compression samples were used; the onset of a macro-fracture on the surface of the corset part was taken as the criterion for the destruction of the sample. It is shown that with an increase in the test temperature, the resistance to low-cycle fatigue of steel and weld metal decreases. At the same time, the base metal and the weld metal demonstrate identical characteristics of low-cycle fatigue at each of the test temperatures. A certain part of the study touched the effect of temperature ageing on the low-cycle fatigue of steel. It is shown that the values of the low-cycle strength of the material under study slightly exceeds the results of similar tests of WB36 steel presented in foreign technical literature. A comparative analysis of experimental low-cycle fatigue curves and corresponding standard calculation curves obtained using analytical expressions for the actual mechanical properties of steel has shown that experimental data on the low-cycle fatigue of steel demonstrate a higher fatigue resistance at room temperature and approximately a similar level at operating temperature compared with calculated fatigue curves obtained using the mechanical properties of the metal. An example of the low-cycle fatigue calculation for a high-pressure drum of a steam-gas recovery boiler is given. It is confirmed that for the given initial parameters and resource indicators, conditions of the drum strength met the criteria of low-cycle fatigue.

Keywords: steel 15NiCuMoNb5 (WB36); welded joint; boiler drum; low cycle fatigue; experimental fatigue curves; thermal ageing; calculated fatigue curves.

Введение

Со второй половины прошлого века сталь 15NiCuMoNb5 (WB36) широко применяется в европейских странах для изготовления барабанов котлов высокого давления. С начала нынешнего века производство толстолистового проката из этой стали и изготовление из него барабанов высокого давления освоено российскими предприятиями. Значительное количество барабанов из стали WB36 на данное время эксплуатируется в России преимущественно в составе котлов-утилизаторов парогазовых установок (ПГУ). Основным преимуществом стали 15NiCuMoNb5 (WB36) является высокий уровень ее расчетных характеристик прочности [1 – 4]. Это позволяет почти на 40 % снизить толщину стенки барабана из данной стали по сравнению с толщиной стенки барабана традиционно изготовленного из российской стали 16ГНМА при идентичных геометрии и условиях нагружения барабана. Однако сложная легирующая основа стали WB36 в соответствии с EN 10028-2 и VdTÜV (№ 377/1), создающая хорошие предпосылки для достижения оптимальной комбинации основных механических свойств [1 – 3], не гарантирует высоких характеристик сопротивления малоциклового и хрупкому разрушению [2, 5, 6]. Важно отметить также, что характерной особенностью рассматриваемой (исследуемой) стали является присутствие остаточной меди в твердом растворе после термообработки. Находящаяся в пересыщенном состоянии медь приобретает способность к мелкодисперсному выделению при повышенных температурах [7]. В ряде исследований подтверждено наличие признаков термического и термометформационного старения стали WB36 [8 – 11] по причине выделения в структуре металла осадков меди, что свидетельствовало о воз-

можном изменении прочностных и пластических характеристик стали при длительной эксплуатации. В связи с этим требуется комплексный подход к оценке эксплуатационных показателей стали WB36 и ее сварных соединений с рассмотрением актуального набора служебных характеристик и учетом их стабильности в процессе длительной работы. Имеющаяся в зарубежной научно-технической литературе информация [1 – 3, 5, 10] дает представление об эксплуатационных свойствах стали WB36, но эти сведения трудно признать достаточными, а по отдельным вопросам они нуждаются в уточнении. В свою очередь, в отечественной периодической печати только в последнее время появились данные [4, 11 – 13] о результатах исследований стали WB36 и сварных изделий из нее, произведенных на российских предприятиях. В этих статьях приведены сведения о базовых характеристиках стали WB36 и ее сварного соединения. В связи с конструктивными особенностями и спецификой условий эксплуатации барабанов высокого давления особенно актуальны такие свойства металла, из которого они изготовлены, как характеристики сопротивления малоциклового разрушению [14]. Отдельные немногочисленные публикации на эту тему в иностранной печати [5] показали, что в семействе легированных конструкционных сталей исследуемая сталь (WB36) имеет примерно идентичные показатели по малоцикловой долговечности. В данной работе представлены результаты исследований малоцикловой усталости (МЦУ) стали WB36 и металла шва ее сварного соединения.

Материал и методика исследований

Исследования проводили на металле опытной сварной заготовки, изготовленной по штат-

ной технологии завода, включая сварку и режимы термообработки. Заготовка представляла собой пластину (плиту) размером $500 \times 600 \times 80$ мм со сварным соединением посередине, параллельным большей ее стороне [12]. Можно считать, что исследуемая заготовка имитировала натурный фрагмент барабана высокого давления. Микроструктурные исследования металла опытной заготовки показали [12], что структура стали представляет ферритно-бейнитную композицию с большим содержанием мелкодисперсных карбидов. Микроструктура шва типична для литого металла. Металл в зоне термического влияния сварки имеет выраженную структуру мартенсита [12]. Результаты элементного анализа и механических испытаний [4, 12] подтвердили соответствие исследуемого металла по химическому составу и механическим свойствам требованиям европейского стандарта EN10028-2 на прокатный лист из стали 15NiCuMoNb5. Измерения твердости показали [12], что основной металл и металл сварного шва опытной заготовки равнопрочны. Механические свойства исследуемой стали [4] при комнатной (20°C) и рабочей (350°C) температурах приведены в табл. 1, где показаны также соответствующие требования стандарта EN10028-2.

Характеристики МЦУ определяли для основного металла и металла шва сварного соединения опытной заготовки. Для проведения испытаний на МЦУ использовали цилиндрические образцы с корсетной рабочей частью, имеющие повышенную устойчивость при действии сжимающей нагрузки (тип 1 согласно ГОСТ 25.502–79). Диаметр образца в минимальном сечении корсетной части составлял 8 мм. Заготовки под образцы вырезали в направлении, перпендикулярном оси сварного шва, причем для образцов из сварного соединения практически вся корсетная (рабочая) часть приходилась на металл шва. Образцы испытывали при комнатной ($\sim 20^\circ\text{C}$) и рабочей (350°C) температурах в условиях симметричного жесткого (с управлением по деформациям) режима нагружения при осевом растяжении – сжатии. Испытания проводили на универсальной испытательной машине POZN (фирма Schenck), обеспечивающей максимальное усилие 100 кН



Рис. 1. Образец в захватах испытательной машины POZN с установленным экстензометром и токосъемниками системы нагрева

Fig. 1. A sample in the grips of a POZN test machine with an installed extensometer and current collectors of the heating system

и оборудованной системой нагрева образца (рис. 1). Образец нагревали прямым пропусканием электрического тока (допускается ГОСТ 25.507–85) с использованием тиристорного регулятора температуры фирмы «Овен». Температуру измеряли хромелевой термопарой, закрепленной в рабочей зоне образца. В процессе испытаний измеряли и поддерживали заданные деформации в минимальном (рабочем) сечении образца с помощью поперечного высокотемпературного экстензометра фирмы Epsilon (США) (см. рис. 1) с последующим пересчетом поперечной деформации в продольную в соответствии с ГОСТ 25.502–79. Количество циклов до разрушения образца (N) определяли по моменту образования макротрещины на его рабочей поверхности. Признаком зарождения трещины в образце считали ускоряющееся снижение прилагаемой к нему максимальной нагрузки цикла, периодически регистрируемой в процессе испытаний. Это служило сигналом для слежения за поверхностью рабочей части образца в целях визуального фиксирования образовавшейся трещины. Частоту нагру-

Таблица 1. Механические свойства стали 15NiCuMoNb5 опытной заготовки

Table 1. Mechanical properties of steel 15NiCuMoNb5 of the experimental billet

Источник данных	Температура испытания, $^\circ\text{C}$	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
Результаты испытаний опытной заготовки [4]	20	711	537	24,8	67,2
	350	672	490	23,5	56,2
Нормы EN10028-2	20	600 – 760	430	16	—
	350	—	342	—	—

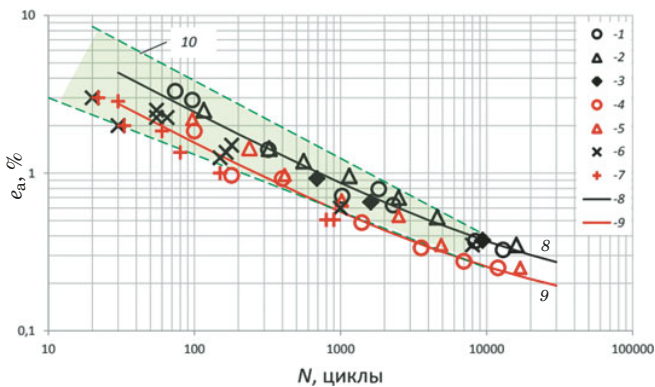


Рис. 2. Характеристики малоциклового усталости стали WB36 при комнатной температуре (1, 2, 3, 8) и при 350 °С (4 – 6); результаты эксперимента: 1, 3, 4 — основной металл (1, 4 — исходное состояние, 3 — после старения); 2, 5 — металл шва; 8, 9 — обобщенные кривые МЦУ (8 — 20 °С; 9 — 350 °С); данные из работы [5]: 6, 7 — сталь WB36 (6 — 20 °С; 7 — 300 °С); 10 — полоса разброса для легированных сталей при комнатной температуре

Fig. 2. Characteristics of the low-cycle fatigue of WB36 steel at room temperature (1 – 3, 8) and at 350°C (4 – 6). Experimental data: 1, 3, 4 — base metal (1, 4 — initial state, 3 — after aging); 2, 5 — weld metal; 8, 9 — generalized low-cycle fatigue curves (8 — 20°C; 9 — 350°C). Data from literature sources [5]: 6, 7 — WB36 steel (6 — 20°C; 7 — 300°C); 10 — scatter band for alloy steels at room temperature

жения (f) задавали в интервале от 0,1 до 1,0 Гц в зависимости от величины деформации с учетом исключения саморазогрева образцов в процессе циклического деформирования.

Таблица 2. Результаты испытаний на малоцикловую усталость

Table 2. Results of low-cycle fatigue tests

Параметры	Номер образца					
	1	2	3	4	5	6
Основной металл, 20 °С						
N , циклы	1030	320	2300	1830	8400	13 000
f , Гц	0,5	0,2	1	1	1	1
Δe , %	1,43	2,81	1,25	1,57	0,74	0,65
Металл шва, 20 °С						
N , циклы	1150	325	560	4600	16000	2500
f , Гц	0,5	0,2	0,2	1	1	1
Δe , %	1,92	2,86	2,38	1,05	0,7	1,4
Основной металл, 350 °С						
N , циклы	180	400	1400	3570	7100	12 050
f , Гц	0,5	0,2	1	1	1	1
Δe , %	1,93	1,84	0,97	0,67	0,55	0,5
Металл шва, 350 °С						
N , циклы	415	240	1020	2500	4900	17 000
f , Гц	0,2	0,1	1	1	1	1
Δe , %	1,94	2,88	1,34	1,07	0,7	0,5

Результаты исследований

Результаты испытаний на малоцикловую усталость представлены в табл. 2, где для каждого вида материала и температуры испытаний приведены размах упругопластических деформаций в цикле (Δe , %), соответствующее количество циклов до образования трещин (N), а также частота нагружения (f , Гц).

На рис. 2 результаты испытаний представлены в виде графика в логарифмических координатах амплитуда деформаций ϵ_a — число циклов до разрушения N . Видно, что экспериментальные точки образуют два массива: один соответствует температуре 20 °С, другой — 350 °С. При этом, как и следовало ожидать, результаты испытаний при повышенной температуре располагаются значительно ниже, чем данные испытаний при комнатной температуре. Отличие результатов испытаний металла шва от данных, полученных для основного металла, незначительно. Данная закономерность соблюдается как при комнатной, так и при повышенной температурах. Поэтому было признано целесообразным объединить экспериментальные данные по основному металлу и шву. Следовательно, коэффициент снижения циклической прочности сварного соединения стали WB36 для комнатной и рабочей температур может быть принят близким к единице ($\varphi_\omega = 1$).

Путем обработки результатов испытаний по каждому из двух массивов экспериментальных

данных построены кривые усталости, описываемые соотношениями традиционного вида [15]:

для температуры 20 °С —

$$e_a = 23/N^{0,5} + 0,14; \quad (1)$$

для температуры 350 °С —

$$e_a = 14,5/N^{0,5} + 0,11. \quad (2)$$

Обсуждение результатов

В целях сравнительного анализа на рис. 2 нанесены также экспериментальные данные испытаний на МЦУ стали WB36, приведенные в работе [5]. Видно, что эти данные заметно уступают полученным нами соответствующим результатам. В большей степени это проявляется для комнатной температуры. При повышенной температуре это различие несколько сглаживается, однако при этом надо иметь в виду, что мы проводили исследования при температуре 350 °С, что на 50 °С выше, чем в работе [5]. Отметим также, что полученные нами кривые МЦУ для комнатной и повышенной температур (см. рис. 2, кривые 8 и 9) заметно дальше расположены друг от друга, чем аналогичные данные из работы [5], что вряд ли можно отнести только к отмеченному выше различию в температурах испытаний. Возможно, более высокая сопротивляемость МЦУ исследуемой стали объясняется повышенными прочностными свойствами — ее пределы прочности и текучести выше, чем аналогичные характеристики представленной в работе [5] стали, на 74 и 68 МПа соответственно при одинаковых примерно пластических свойствах. К этому можно добавить, что полученная в настоящей работе кривая МЦУ для комнатной температуры (см. рис. 2, кривая 8) находится в верхней части полосы разброса соответствующих данных для легированных сталей, представленной в [5].

Для оценки влияния длительных термических выдержек на характеристики МЦУ стали WB36 был испытан металл, состаренный при температуре 400 °С в течение 2000 ч (на трех образцах). Результаты этих испытаний, проведенных при комнатной температуре, представлены на рис. 2. Видно, что старение снижает в целом сопротивление стали малоциклового разрушению. Характерно при этом, что уменьшение усталостной прочности стали в результате старения наиболее отчетливо выражено при малых цикловых базах, а ближе к границе перехода в многоцикловую область ($N \approx 10^4$ циклов) этот эффект затухает.

Известно [16, 17], что циклическая прочность материала контролируется двумя показателями: пластическими свойствами (относительным сужением ψ) и прочностными характеристиками

(пределом выносливости σ_{-1} или связанным с ним пределом прочности σ_b). При этом заведомо в малоцикловой области, т.е. при высоких упругопластических деформациях, ведущая роль отводится относительному сужению, а в многоцикловой области, т.е. при невысоких напряжениях, — прочностному критерию [16]. С учетом этого полученный характер влияния старения на малоцикловую прочность стали WB36 хорошо согласуется с результатами исследований авторов работы [13], показавших, что старение указанной стали (при 400 °С на базе 2000 ч) приводит к уменьшению пластических свойств (относительного сужения) и увеличению предела прочности. Сочетание этих факторов на фоне изменяющейся циклической деформации может обуславливать полученную картину влияния старения на МЦУ стали WB36. Для определения количественных показателей данного явления требуется проведение масштабных исследований в этом направлении, в том числе при более продолжительных выдержках в ходе старения.

Кривые МЦУ на рис. 2, перестроенные в координатах амплитуда напряжений (условно-упругих) σ_a — число циклов до разрушения N , представлены на рис. 3. Соответствующие аппроксимационные зависимости имеют следующий вид:

для температуры 20 °С —

$$\sigma_a = 4,83 \cdot 10^4 / N^{0,5} + 294; \quad (3)$$

для температуры 350 °С —

$$\sigma_a = 2,76 \cdot 10^4 / N^{0,5} + 209. \quad (4)$$

В нормах ПНАЭ-Г-7-002–86 приведены расчетные кривые усталости легированных сталей, полученные на базе классического уравнения Мэнсона [16] посредством обработки большого массива экспериментальных данных. Аналитические выражения этих кривых через пластические и прочностные характеристики металла связывают допускаемые амплитуды напряжений с допускаемыми циклами нагружения с учетом нормативных запасов прочности. Если пренебречь запасами прочности для удобства последующего сравнения с экспериментально полученными кривыми усталости, то соответствующее уравнение расчетной кривой усталости в малоцикловой области ($N < 10^6$ циклов) при симметричном цикле будет иметь вид

$$\sigma_a = \frac{E_T e_c^T}{(4N)^m} + \sigma_{-1}^T, \quad (5)$$

где E_T , e_c^T и σ_{-1}^T — модуль упругости, характеристика пластичности и предел выносливости соот-

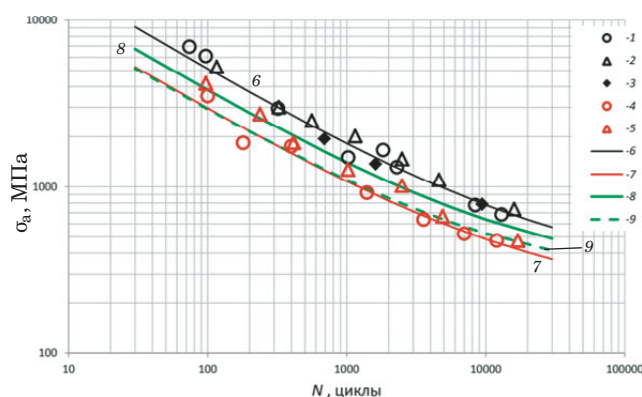


Рис. 3. Экспериментальные кривые МЦУ при комнатной температуре (6) и при 350 °C (7), а также расчетные зависимости, полученные по механическим свойствам: 8 — 20 °C; 9 — 350 °C; точки 1–5 — то же, что на рис. 2

Fig. 3. Experimental low-cycle fatigue curves at room temperature (6) and at 350 °C (7) and calculated dependences obtained from the mechanical properties: 8 — 20 °C; 9 — 350 °C. Designations of experimental points (1–5) — similar to Fig. 2

ветственно при расчетной температуре; m — характеристика материала. Принимая согласно нормам ПНАЭ-Г-7-002-86 $e_c^T = 0,005\psi^T$, $m = 0,5$ и $\sigma_{-1}^T = 0,4\sigma_B^T$, запишем уравнение расчетной кривой усталости, полученной по заданным механическим свойствам:

$$\sigma_a = \frac{0,005 E_T \psi^T}{\sqrt{4N}} + 0,4 \sigma_B^T. \quad (6)$$

Построенные согласно соотношению (6) с использованием фактических значений механических характеристик стали (см. табл. 1) кривые усталости для комнатной и повышенной температур приведены на рис. 3. Видно, что экспериментально полученная кривая усталости при температуре 20 °C проходит выше расчетной кривой, соответствующей уравнению (6). Это свидетельствует о том, что при комнатной температуре фактические характеристики малоцикловой прочности исследуемой стали выше таковых, полученных расчетом по механическим свойствам. В то же время расчетная и экспериментальная кривые усталости для рабочей температуры (350 °C) практически совпадают, т.е. демонстрируют примерно одинаковое сопротивление усталостному разрушению (см. рис. 3).

Нормативный расчет на МЦУ предусматривает определение допускаемых амплитуд напряжений $[\sigma_a]$ или допускаемого количества циклов $[N]$ путем использования коэффициентов запаса прочности. Поэтому в нормах ПНАЭ-Г-7-002-86 для нахождения долговечности с помощью аналитических выражений, включающих механические свойства материала, для каждого расчетного случая приведены две формулы, в одну из кото-

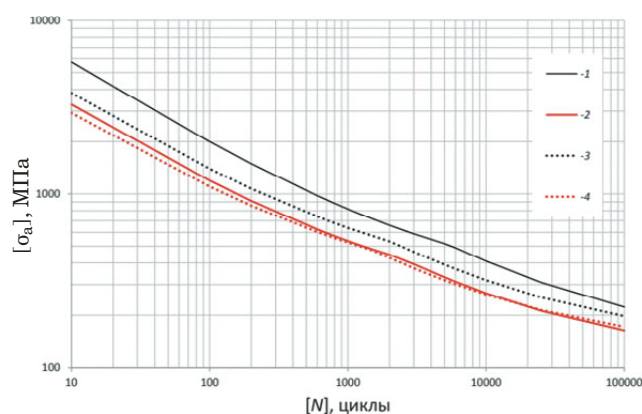


Рис. 4. Расчетные кривые МЦУ, построенные с нормативными запасами прочности по экспериментальным зависимостям (1 — 20 °C; 2 — 350 °C) и по механическим свойствам стали (3 — 20 °C; 4 — 350 °C)

Fig. 4. Calculated low-cycle fatigue curves constructed with standard safety factor according to experimental dependences (1 — 20 °C; 2 — 350 °C) and according to the mechanical properties of steel (3 — 20 °C; 4 — 350 °C)

рых заложен коэффициент запаса по напряжениям n_σ , а в другую — коэффициент запаса по числу циклов n_N . При этом из значений $[N]$ и $[\sigma_a]$, определенных по каждой из этих формул, выбирают наименьшее. Согласно такому принципу уравнения (3) и (4), представляющие собой экспериментальные зависимости, также трансформируются в две формулы: одна с коэффициентом запаса n_σ , а другая — n_N . Результирующую величину рассчитываемого параметра согласно принятой схеме выбирают как наименьшее из двух вычисленных значений ($[\sigma_a]$ или $[N]$). По существу, если ориентироваться на графическую схему решения задачи, то расчетная кривая МЦУ представляет собой нижнюю огибающую двух зависимостей $[\sigma_a]$ — $[N]$, одна из которых построена для коэффициента запаса n_σ , а другая — для n_N . Полученные по этому принципу расчетные кривые усталости, построенные на базе уравнения (6) как один вариант и экспериментальных аппроксимаций (3) и (4) как другой вариант, показаны на рис. 4. В каждом из вариантов заложены коэффициенты запаса $n_\sigma = 2$ и $n_N = 10$ согласно ПНАЭ-Г-7-002-86.

Видно, что расчетные кривые усталости, соответствующие уравнениям на базе фактических механических свойств и полученные по экспериментальным зависимостям при рабочей (350 °C) температуре, практически совпадают. При комнатной же температуре эти кривые заметно расходятся, при этом зависимость, относящаяся к аппроксимации экспериментальных данных, располагается выше альтернативной расчетной кривой, демонстрируя тем самым более высокие по сравнению с ней характеристики малоцикловой прочности. Следовательно, оценки малоцик-

ловой долговечности, выполненные по указанным двум вариантам расчетных кривых, будут давать примерно одинаковые результаты для рабочей температуры, а для комнатной температуры расчеты с помощью аналитических выражений на базе механических свойств материала будут более консервативными, т.е. ориентированы на повышенные фактические запасы прочности.

Применение результатов

В качестве примера использования полученных результатов выполнены оценочные расчеты по подтверждению ресурсных характеристик барабана высокого давления из стали WB36 котла-утилизатора парогазовой установки ПГУ-420. Исходные данные для расчета приведены в табл. 3.

В качестве основных расчетных режимов приняты: пуск установки из «холодного» состояния и гидравлические испытания барабана пробным давлением. Исходя из среднестатистических данных по использованию мощности (т.е. по среднегодовым наработкам) основного оборудования ПГУ, можно считать, что назначенному сроку службы котла-утилизатора соответствует ресурс не менее 250 тыс. ч, а количество пусков из «холодного» состояния в пределах данного ресурса должно быть на уровне $N_{хп} = 600$. Количество гидроиспытаний за этот период составит не более $N_r = 60$.

Расчет местных напряжений выполняли для наиболее нагруженных зон барабана, которыми являются внутренние кромки отверстий под штуцеры перепускных труб (диаметрально противоположные точки пересечения кромок с образующей корпуса). Рассчитывали результирующее напряжение от действия внутреннего давления и изменения температуры. Анализ напряженного состояния в зонах штуцеров барабанов с учетом упругопластического поведения материала показал, что в отмеченных наиболее напряженных точках коэффициенты концентрации для механических и температурных напряжений составляют $K_\sigma = 3,5$ и $K_T = 2$ соответственно [18]. Эти значения коэффициентов концентрации указаны в руководящих документах

СТО 172302082.27.100.005–2008 и РД 10-249–98, регламентирующих расчеты на прочность и долговечность барабанов высокого давления. Вычисленные с использованием этих коэффициентов концентрации расчетные амплитуды местных условно-упругих напряжений в точках их максимальной локализации составили 449 и 532 МПа для базового цикла пуска барабана из «холодного» состояния и для гидроиспытаний соответственно. В свою очередь, допускаемые числа циклов нагружения для режимов пуска из «холодного» состояния и гидроиспытаний согласно экспериментально полученным расчетным кривым МЦУ (см. рис. 4) составят примерно $[N_{хп}] = 1240$ и $[N_r] = 3810$ соответственно. Оценка накопленного усталостного повреждения на основе принципа линейного суммирования показала, что с учетом исходных положений и результатов расчетного анализа суммарное усталостное повреждение барабана $a = N_{хп}/[N_{хп}] + N_r/[N_r] \approx 0,5$, что меньше предельно допускаемого значения, равного 1. Учитывая, что доля циклической поврежденности барабана, обусловленная гидроиспытаниями, составила существенно менее 0,1, выбор расчетной кривой для комнатной температуры из двух альтернативных вариантов не имел принципиального значения. Следовательно, для заданных ресурсных показателей условия прочности барабана по критериям МЦУ выполняются.

Заключение

Результаты усталостных испытаний показали, что характеристики МЦУ основного металла и металла сварного шва стали 15NiCuMoNb5 идентичны как при комнатной ($\sim 20^\circ\text{C}$), так и при рабочей (350°C) температурах.

Установлено, что экспериментально полученные зависимости МЦУ стали WB36 демонстрируют по сравнению с аналогичными зарубежными данными более высокий уровень циклической прочности при комнатной температуре, а при рабочей температуре 350°C это различие частично сглаживается.

Температурное старение стали при 400°C в течение 2000 ч приводит к незначительному

Таблица 3. Исходные данные расчета

Table 3. Input calculation data

Параметр	Единица измерения	Значение
Внутренний диаметр	мм	2288
Толщина стенки	мм	54
Расчетное (рабочее) давление	МПа	9,4
Давление гидроиспытаний	МПа	11,75
Назначенный срок службы	Количество лет (годы)	40

снижению малоциклового прочностного (при комнатной температуре) основного металла преимущественно в области малых цикловых баз, т.е. при достаточно высоких упругопластических деформациях.

Сравнение экспериментальных кривых МЦУ с соответствующими нормативными расчетными кривыми, полученными с помощью аналитических выражений через механические свойства стали, показало, что при рабочей температуре эти кривые практически совпадают, а при 20 °С экспериментальные зависимости демонстрируют более высокие характеристики сопротивления МЦУ.

Благодарности

Статья подготовлена по результатам испытаний, выполненных на оборудовании ЦКП ОАО «ВТИ» «Центр исследования материалов тепловой энергетики нового поколения».

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

ЛИТЕРАТУРА

1. Yannan D., Bin R., Longxian L., et al. Analysis of Mechanical Properties of 15NiCuMoNb at Different Temperatures / IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 330(2019). 042046. P. 1 – 5. DOI: 10.1088/1755-1315/330/4/042046
2. Fohl J., Willer D., Katerbau K.-H. Effect of Copper Precipitates on the Toughness of Low Alloy Steels for Pressure Boundary Components / 30th MPA-Seminar in conjunction with the 9th German-Japanese Seminar. Stuttgart. 2004. October 6 and 7. P. 11.1 – 11.15.
3. Ney H., Cawelius R., Hanus F., Richter K. DIWA — the favorized steel for boilers and pressure vessels. Dillinger Hutte GTS, describe the production, materials and working properties of boiler making steel 15NiCuMoNb5 otherwise known as DIWA 373/H / Hydrocarbon engineering. 2002. December. P. 7.
4. Grin E. A., Pchelintsev A. V., Zelenskii A. V., Sarkisyan V. A. Set of drum steel 15NiCuMoNb5 (WB36) metal and welded joint service properties / Power Technol. Eng. 2023. Vol. 57. N 3. P. 431 – 437. DOI: 10.1007/s10749-023-01681-y
5. Mail K., Blind D., Vasoukis G., et al. Determination of cycle dependent material properties for a design concept on the basis of limited plastic strains with regard to environmental effects / International conference on low cycle fatigue and elasto-plastic behavior of materials, 1987, Munich, Germany. P. 512 – 517. DOI: 10.1007/978-94-009-3459-7
6. Altpeter I., Dobmann G., Katerbau K., et al. Copper precipitates in the steel 15 NiCuMoNb 5 (WB 36): Material properties and microstructure, atomistic simulation, NDE by micromagnetic techniques / Proceedings of the 25 MPA Seminar. Stuttgart. 1999. 7 – 8 October.
7. Изотов В. И., Илюхин Д. С., Гетманова М. Е., Филиппов Г. А. Влияние меди на структуру и механические свойства перлитной стали / Физика металлов и металловедение. 2016. Т. 117. № 6. С. 609 – 614. DOI: 10.7868/S0015323016040070
8. Kumar S., Ramesh T., Asokkumar K. Welding Studies on WB36 for Feed Water Piping / International Journal of Computational Engineering Research (IJCER). 2016. Vol. 6. Issue 5. P. 36 – 52.

9. Dobmann G., Boller C., Herrman H.-G., Altpeter I. R&D to lifetime management — ND-characterization of ageing phenomena / E-Journal of Advanced Maintenance. 2013. Vol. 5-1. P. 15 – 24.
10. Schmauder S., Uhlmann D., Zies G. Experimental and numerical investigations of two material states of the material 15 NiCuMoNb5 (WB 36) / Computational Materials Science. 2002. Vol. 25(1). P. 174 – 192.
11. Гринь Е. А., Пчелинцев А. В., Зеленский А. В. и др. Исследование влияния температурного старения на комплекс служебных характеристик стали 15NiCuMoNb5 (WB36). Часть I. Влияние температурных выдержек на структурные параметры и микрораспределение элементного состава стали WB36 / Электрические станции. 2023. № 12. С. 10 – 21. DOI: 10.34831/EP2023.1109.12.002
12. Grin E. A., Pchelintsev A. V., Zelenskii A. V., Sarkisyan V. A. Basic properties of steel 15NiCuMoNb5 (WB36) workpiece / Power Technol. Eng. 2023. Sept. Vol. 57. N 3. P. 424 – 430. DOI: 10.1007/s10749-023-01680-z
13. Гринь Е. А., Саркисян В. А., Зеленский А. В., Пчелинцев А. В. Исследование влияния температурного старения на комплекс служебных характеристик стали 15NiCuMoNb5 (WB36). Часть III. Влияние термического старения на механические свойства и критическую температуру хрупкости / Электрические станции. 2024. № 2. С. 2 – 10. DOI: 10.34831/EP2024.1111.2.001
14. Махутов Н. А., Гаденин М. М., Чернявский О. Ф., Чернявский А. О. Механические свойства материалов в расчетах малоциклового деформирования конструкций / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. Т. 88. № 6. С. 52 – 59. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-6-52-59
15. Гаденин М. М. Исследование закономерностей сопротивления деформированию и накопления повреждений при нерегулярном малоциклового нагружении / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021. Т. 87. № 11. С. 55 – 63. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-11-55-63
16. Серенсен С. В. Сопротивление материалов усталостному и хрупкому разрушению. — М.: Атомиздат, 1975. — 192 с.
17. Махутов Н. А. Обобщенные закономерности повреждаемости и сплошности при оценках долговечности в условиях переменности режимов нагружения / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 9. С. 61 – 65. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-9-61-65
18. Комисарчик И. Н. Температурные поля и напряжения в стенках котельных барабанов при растопках и остановках / Труды ЦКТИ. Вып. 118. — Л, 1972. С. 38 – 54.

REFERENCES

1. Yannan D., Bin R., Longxian L., et al. Analysis of Mechanical Properties of 15NiCuMoNb at Different Temperatures / IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 330(2019). 042046. P. 1 – 5. DOI: 10.1088/1755-1315/330/4/042046
2. Fohl J., Willer D., Katerbau K.-H. Effect of Copper Precipitates on the Toughness of Low Alloy Steels for Pressure Boundary Components / 30th MPA-Seminar in conjunction with the 9th German-Japanese Seminar. Stuttgart. 2004. October 6 and 7. P. 11.1 – 11.15.
3. Ney H., Cawelius R., Hanus F., Richter K. DIWA — the favorized steel for boilers and pressure vessels. Dillinger Hutte GTS, describe the production, materials and working properties of boiler making steel 15NiCuMoNb5 otherwise known as DIWA 373/H / Hydrocarbon engineering. 2002. December. P. 7.
4. Grin E. A., Pchelintsev A. V., Zelenskii A. V., Sarkisyan V. A. Set of drum steel 15NiCuMoNb5 (WB36) metal and welded joint service properties / Power Technol. Eng. 2023. Vol. 57. N 3. P. 431 – 437. DOI: 10.1007/s10749-023-01681-y
5. Mail K., Blind D., Vasoukis G., et al. Determination of cycle dependent material properties for a design concept on the basis of limited plastic strains with regard to environmental effects / International conference on low cycle fatigue and elasto-plastic

- behavior of materials, 1987, Munich, Germany. P. 512 – 517. DOI: 10.1007/978-94-009-3459-7
6. **Altpeter I., Dobmann G., Katerbau K., et al.** Copper precipitates in the steel 15 NiCuMoNb 5 (WB 36): Material properties and microstructure, atomistic simulation, NDE by micro-magnetic techniques / *Proceedings of the 25 MPA Seminar*. Stuttgart. 1999. 7 – 8 October.
 7. **Izotov V. I., Iliuhin D. S., Getmanova M. E., Filippov G. A.** The influence of copper on the structure and mechanical properties of pearlitic steel / *Fiz. Met. Metalloved.* 2016. Vol. 117. N 6. P. 609 – 614 [in Russian]. DOI: 10.7868/S0015323016040070
 8. **Kumar S., Ramesh T., Asokkumar K.** Welding Studies on WB36 for Feed Water Piping / *International Journal of Computational Engineering Research (IJCER)*. 2016. Vol. 6. Issue 5. P. 36 – 52.
 9. **Dobmann G., Boller C., Herrman H.-G., Altpeter I.** R&D to lifetime management — ND-characterization of ageing phenomena / *E-Journal of Advanced Maintenance*. 2013. Vol. 5-1. P. 15 – 24.
 10. **Schmauder S., Uhlmann D., Zies G.** Experimental and numerical investigations of two material states of the material 15 NiCuMoNb5 (WB 36) / *Computational Materials Science*. 2002. Vol. 25(1). P. 174 – 192.
 11. **Grin E. A., Pchelintsev A. V., Zelenskii A. V., et al.** Investigation of the effect of temperature aging on the complex of service characteristics of steel 15NiCuMoNb5 (WB36). Part I. The effect of temperature exposure on the structural parameters and microdistribution of the elemental composition of WB36 steel / *Élektr. Stantsii*. 2023. N 12. P. 10 – 21 [in Russian]. DOI: 10.34831/EP2023.1109.12.002
 12. **Grin E. A., Pchelintsev A. V., Zelenskii A. V., Sarkisyan V. A.** Basic properties of steel 15NiCuMoNb5 (WB36) workpiece / *Power Technol. Eng.* 2023. Sept. Vol. 57. N 3. P. 424 – 430. DOI: 10.1007/s10749-023-01680-z
 13. **Grin E. A., Sarkisyan V. A., Zelenskii A. V., Pchelintsev A. V.** Investigation of the effect of temperature aging on the complex of service characteristics of steel 15NiCuMoNb5 (WB36). Part III. The effect of thermal aging on mechanical properties and critical temperature of brittleness / *Élektr. Stantsii*. 2024. N 2. P. 2 – 10 [in Russian]. DOI: 10.34831/EP2024.1111.2.001
 14. **Makhutov N. A., Gadenin M. M., Cherniavsky O. F., Cherniavsky A. O.** Mechanical properties of materials in calculations of low cycle deformation of structures / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2022. Vol. 88. N 6. P. 52 – 59 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-6-52-59
 15. **Gadenin M. M.** Study of the regularities of resistance to deformation and damage accumulation under irregular low cycle loading / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2021. Vol. 87. N 11. P. 55 – 63 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-11-55-63
 16. **Serensen S. V.** Resistance of materials to fatigue and brittle fracture. — Moscow: Atomizdat, 1975. — 192 p. [in Russian].
 17. **Makhutov N. A.** The generalized regularities of damageability and integrity in estimations of the endurance in conditions of variability of loading regimes / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2019. Vol. 85. N 9. P. 61 – 65 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-9-61-65
 18. **Komisarchik I. N.** Temperature fields and stresses in the walls of boiler drums during kindling and stoppages / *JSC “NPO TsKTI” collection*. Issue 118. — Leningrad, 1972. P. 38 – 54 [in Russian].