

Прочность и долговечность конструкционной стали 15Х11МФБл в условиях теплосмен

А. П. Гопкало

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния различных режимов термического нагружения на характеристики сопротивления длительному статическому и циклическому неизотермическому нагружению конструкционной стали 15Х11МФБл применительно к условиям эксплуатации горно-обогатительного оборудования. Экспериментально установлено, что при малоцикловом неизотермическом нагружении в материале протекают два процесса накопления повреждений: квазистатический, связанный с направленным пластическим деформированием, и усталостный – со знакопеременным пластическим деформированием. Детально исследовано влияние перегревов материала на вид разрушения и характеристики сопротивления длительному статическому и циклическому неизотермическому нагружению. Показано хорошее соответствие порогового значения параметра, определяющего смену преобладающих процессов накопления повреждений исследуемой стали, аналогичным значениям параметра для других сталей.

Полученные результаты исследований показывают, что напряжения, используемые в качестве критерия долговечности, достаточно удовлетворительно описывают долговечность в условиях малоциклового неизотермического нагружения независимо от вида развивающегося в материале преобладающего процесса накопления повреждений.

Ключевые слова: малоцикловая усталость, длительная прочность, неизотермические условия, формоизменение, истинная пластичность, напряжение, условный предел текучести, долговечность.

Обозначения

σ_b	– предел прочности
$\sigma_{0,2}$	– условный предел текучести
δ	– относительное удлинение
ψ	– относительное сужение
ε_f^{cr}	– истинная пластичность материала при ползучести
Φ	– степень формоизменения образца
σ_f^{cr}	– ограниченный предел длительной прочности
τ_f^{cr}	– долговечность материала при испытаниях на длительную прочность
a, b, c, k	– коэффициенты уравнений
r	– коэффициент корреляции
$m_{1/1}$	– смешанный центральный момент второго порядка
S_x, S_y	– среднеквадратичные отклонения
ε	– истинная пластичность материала при испытаниях на кратковременную статическую прочность и пластичность

σ_{\min} – сжимающие напряжения в цикле при максимальной температуре термического цикла

N_f – долговечность материала при испытаниях на малоцикловую усталость в неизотермических условиях

$2\sigma_a$ – ограниченный предел выносливости (размах напряжений)

$\Delta\varepsilon_{in}$ – знакопеременная пластическая деформация за цикл

Введение. В инженерной практике многие детали и элементы конструкций подвержены циклическим воздействиям температуры и механических нагрузок. Вследствие этого в процессе эксплуатации в материале возникают необратимые явления, которые способствуют образованию и развитию трещин усталости или, наряду с последним, изменению исходной геометрии (формоизменению). В сфере производства технологические режимы работы оборудования, как правило, характеризуются сохранением повторяемости циклов воздействия температур и механических нагрузок (агломерационные и обжиговые машины горно-обогатительного оборудования, горячештамповое оборудование и т.п.). Однако при эксплуатации подобного рода оборудования ввиду разных причин возможны отклонения от заданного технологического режима, что приводит к увеличению тепловых и механических нагрузок на несущие элементы конструкций.

В настоящей работе экспериментально исследовано влияние уровня напряжений, времени выдержки, величины максимальной температуры и формы термического цикла, а также наличия и числа циклов перегревов на характеристики сопротивления длительному статическому и циклическому неизотермическому нагружению конструкционной стали 15X11МФБл применительно к условиям эксплуатации горно-обогатительного оборудования.

Методика исследований. Испытания на кратковременную статическую прочность и пластичность, на длительную статическую прочность и ползучесть, а также на малоцикловую усталость в неизотермических условиях проводили на сплошных цилиндрических образцах с диаметром рабочего участка 6 мм и длиной рабочей части 18 мм. При испытаниях на статическую прочность и пластичность конструкционной стали использовали универсальную гидравлическую машину. Нагрев образцов осуществляли в электрической печи сопротивления. В процессе испытаний записывали диаграммы деформирования в координатах нагрузка – удлинение образца, при обработке которых получали характеристики прочности ($\sigma_{0,2}$; σ_B) и пластичности (δ ; ψ) исследуемой стали.

Характеристики длительной прочности и ползучести стали определяли в условиях одноосного растяжения. Деформацию при испытании на ползучесть измеряли с помощью индикатора часового типа. Значения истинной пластичности ε определяли по излому путем измерения диаметра образца на инструментальном микроскопе. В этом случае при пересчете измеренной поперечной деформации образца в продольную использовали зависимость

$$\varepsilon = \ln \frac{1}{1 - \psi}. \quad (1)$$

Испытания образцов на малоцикловую усталость в неизотермических условиях проводили на установке, представляющей собой жесткую раму, внутри которой помещен образец. Величину усилий, возникающих за счет стеснения тепловой деформации образца, регулировали посредством сменных упругих шайб различной жесткости, установленных последовательно с образцом. В процессе испытаний на двухкоординатном графопостроителе записывали диаграммы циклического деформирования, отображающие изменение размаха и асимметрии цикла напряжений, а также циклических и односторонне накопленных деформаций [1].

При испытаниях на длительную прочность и ползучесть, а также на малоцикловую усталость в неизотермических условиях нагрев образцов осуществляли методом прямого пропускания электрического тока, охлаждение – естественное, на воздухе. Заданный термический цикл регулировали и поддерживали с помощью следящей системы автоматического регулирования, которая позволяет с достаточно высокой точностью воспроизводить любой закон изменения температуры (трапецеидальный, треугольный, синусоидальный и т.п., включая блочный с различной вариацией уровней максимальной и минимальной температуры в цикле). Температуру измеряли хромель-алюмелевой термопарой.

Испытания на длительную прочность и ползучесть проводили при циклическом изменении температуры по трапецеидальному закону с выдержкой при максимальной температуре цикла. Для всех термоциклов, отличающихся величиной максимальной температуры, минимальная температура цикла составляла 200°C, в то время как максимальная – 600, 650, 700, 800°C и сохранялась постоянной на протяжении одного испытания до разрушения образца. Длительность цикла составляла 90 с, продолжительность выдержки при максимальной температуре цикла – 40 с, длительность нагрева – приблизительно 15 с, охлаждения – ~ 35 с. Скорость нагрева равна 40 град/с, охлаждения – приблизительно 15 град/с.

При испытаниях на малоцикловую усталость в неизотермических условиях образцы нагревали по треугольному и трапецеидальному термоциклу с теми же параметрами, что и при испытаниях на длительную прочность и ползучесть. При этом предполагалось, что при треугольном температурном цикле преобладающее развитие получает процесс накопления усталостных повреждений, а при трапецеидальном – как усталостных повреждений (в период изменения температуры), так и статических (во время выдержки материала при максимальной температуре термоцикла). Выдержка при максимальной температуре цикла приводила к накоплению в материале статических повреждений, что вызывало изменение исходной геометрии образца (формоизменение), и к снижению циклической долговечности по сравнению с треугольным циклом. Испытания проводили до полного разрушения образца, т.е. до разделения его на две части. Возникновение макротрещины длиной ≈ 1 мм фиксировали по моменту резкого падения усилий (по циклическим диаграммам деформирования) и визуально.

Влияние перегревов (отклонений от заданных эксплуатационных температурных циклов) на характеристики сопротивления длительному статическому и циклическому нагружению в неизотермических условиях исследу-

довали при программном изменении температуры. Последнее предусматривает циклический нагрев по трапецидальному циклу 200...650°С с 10-, 20- и 50%-ным содержанием числа циклов нагрева от общего числа циклов нагрева до разрушения образца по режиму 200...800°С. (Образцы подвергались циклическому нагреву по режиму 200...650°С, но каждый 10-, 5- или 2-й цикл имел максимальную температуру 800°С.)

Испытания на малоцикловую усталость в неизотермических условиях показали, что разрушение происходило либо вследствие накопления усталостных повреждений, либо квазистатических, которые достаточно подробно описаны в работе [2]. Усталостное повреждение характеризуется зарождением и развитием до критических размеров усталостных трещин. Квазистатическое повреждение обусловлено процессами ползучести, и разрушение происходит по исчерпанию исходной пластичности материала. Разрушению образца предшествует значительное его деформирование, степень которого оценивали по формуле

$$\Phi = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{d_{\text{ном}}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где d_{\max} , d_{\min} , $d_{\text{ном}}$ – соответственно максимальный, минимальный и номинальный диаметры образца (рис. 1). Если после разрушения степень деформирования образца $\Phi < 5\%$, то такое разрушение считали усталостным, если $\Phi > 5\%$ – квазистатическим [2].

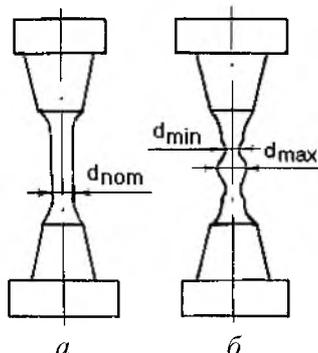


Рис. 1. Форма образцов до (а) и после (б) испытаний на малоцикловую усталость в неизотермических условиях.

Результаты экспериментов и их обсуждение. Данные испытаний стали 15Х11МФБл на кратковременную статическую прочность и пластичность представлены в табл. 1 и на рис. 2.

Анализ результатов испытаний показал, что при температуре 650°С указанная сталь проявляет аномальную закономерность, заключающуюся в резком уменьшении характеристик пластичности. При этом сечение изломов образцов, испытанных при температуре 650°С, имеет вид эллипса, что связано, по-видимому, с анизотропией свойств по сечению вследствие структурных изменений.

Т а б л и ц а 1

Характеристики статической прочности и пластичности исследуемой стали

$T, ^\circ\text{C}$	$\sigma_B, \text{МПа}$	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	$\delta, \%$	$\psi, \%$
20	720,0	596,0	14,0	34,7
200	608,3	552,0	10,1	30,4
300	595,0	525,6	14,4	38,7
400	540,0	480,0	10,0	27,7
500	432,0	418,3	19,7	59,9
550	383,6	381,6	25,0	66,0
600	278,3	278,0	30,2	74,9
650	217,0	217,0	10,6	42,3
700	152,7	145,7	31,4	83,5
750	107,8	79,1	35,5	80,2
800	78,6	47,3	52,6	94,4

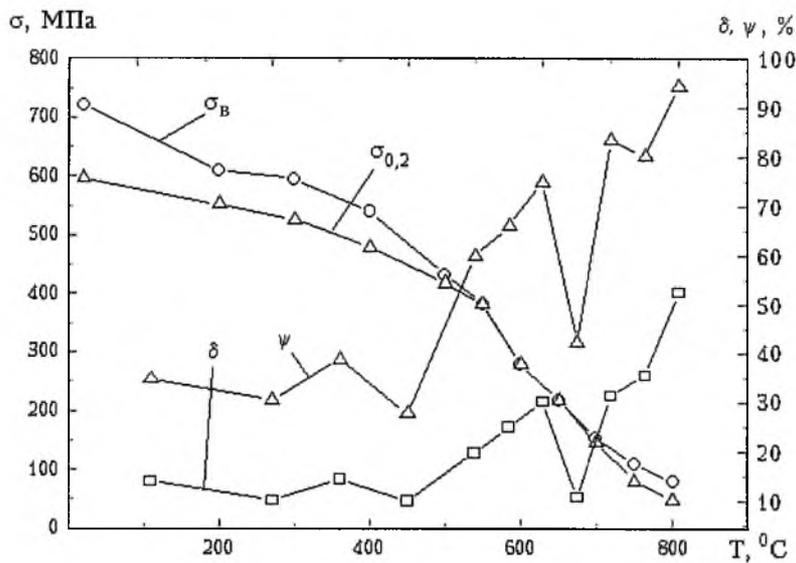


Рис. 2. Зависимость характеристик кратковременной статической прочности и пластичности стали 15X11МФБл от температуры испытаний.

В табл. 2 и на рис. 3 приведены результаты испытаний исследуемой стали на длительную прочность при нагреве по трапецидальному циклу. Следует, однако, отметить некоторый разброс данных, который обусловлен, очевидно, свойствами структуры литого материала.

Полученные зависимости долговечности от напряжений могут быть описаны уравнением

$$\lg \tau_f^{cr} = b \lg \sigma_f^{cr} + a. \quad (3)$$

Кривые длительной прочности исследуемой стали при нагреве по трапецидальному циклу с максимальной температурой 600, 650 и 700 $^\circ\text{C}$ с некоторыми допущениями практически совпадают с аналогичными кривыми для изотермических условий (рис. 3).

Т а б л и ц а 2

Результаты испытаний исследуемой стали на длительную прочность при нагреве по трапецидальному циклу при варьировании максимальной температурой термоцикла

σ_f^{cr} , МПа	τ_f^{cr} (ч) при T , °С			
	200...600	200...650	200...700	200...800
180	2,5	—	—	—
180	85	—	—	—
160	15	—	—	—
160	105	—	—	—
150	160	—	—	—
140	150	—	—	—
133	—	12	—	—
123	260	—	—	—
123	305	—	—	—
105	—	20	—	—
88	—	88	18	—
70	—	72	42	—
70	—	320	—	—
53	—	870	88	—
35	—	—	550	12
35	—	—	—	10,6
26,5	—	—	—	104
26,5	—	—	—	104
26,5	—	—	—	102
17,7	—	—	—	314
17,7	—	—	—	407

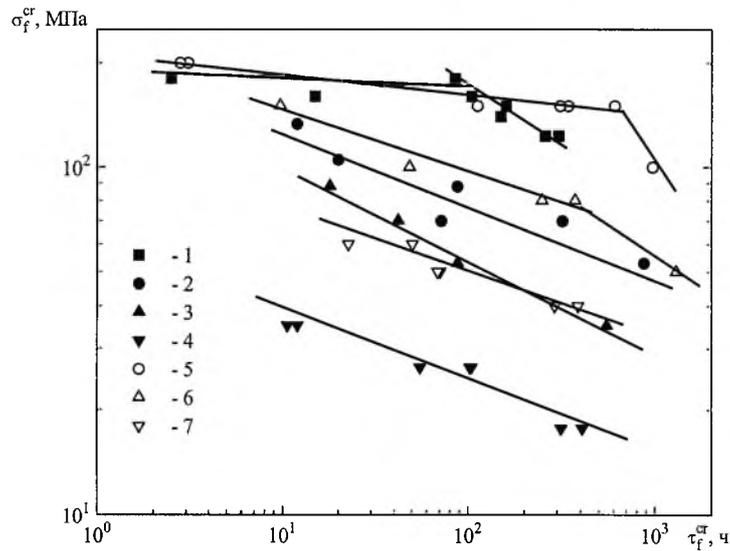


Рис. 3. Кривые длительной прочности стали 15X11МФБл в неизотермических условиях при нагреве по трапецидальному циклу 200...600°С (1 $T = 200...600^\circ\text{C}$; 2 $T = 200...650^\circ\text{C}$; 3 $T = 200...700^\circ\text{C}$; 4 $T = 200...800^\circ\text{C}$) и в изотермических условиях (5 $T = 600^\circ\text{C} = \text{const}$; 6 $T = 650^\circ\text{C} = \text{const}$; 7 $T = 700^\circ\text{C} = \text{const}$).

Т а б л и ц а 3

Результаты испытаний стали 15X11МФБл на длительную прочность при нагреве по трапецидальному циклу с перегревами (200...650°C основной цикл, 200...800°C – циклы перегрева)

Число циклов перегрева, %	σ_f^{cr} , МПа	τ_f^{cr} , ч	a	b	r
10	44,0	42,5	2,008	-0,241	-0,946
	44,0	29,0			
	35,0	72,0			
	26,5	274			
20	44,0	52,0	2,047	-0,2654	-0,909
	35,0	67,0			
	26,5	124,0			
	26,5	297,0			
	17,7	1048,0			
50	35,0	22,0	1,815	-0,209	-0,914
	26,5	107,0			
	26,5	50,0			
	17,7	469,0			
100	35,0	12,0	1,759	-0,185	-0,890
	35,0	10,6			
	26,5	104,0			
	26,5	104,0			
	26,5	102,0			
	17,7	314,0			
	17,7	407,0			

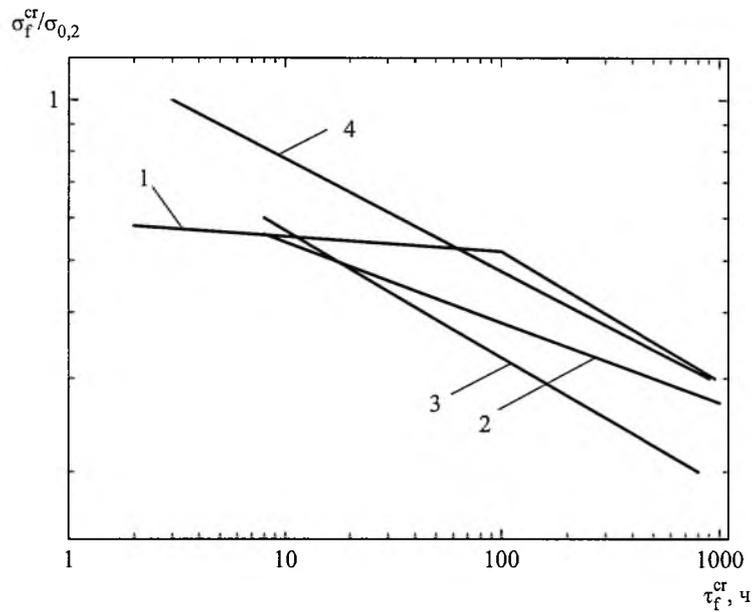


Рис. 4. Кривые длительной прочности стали 15X11МФБл в приведенных координатах при нагреве по трапецидальному циклу: 1 – $T = 200...600^\circ\text{C}$; 2 – $T = 200...650^\circ\text{C}$; 3 – $T = 200...700^\circ\text{C}$; 4 – $T = 200...800^\circ\text{C}$.

Представление этих же кривых в приведенных координатах (предел длительной прочности отнесен к пределу текучести материала при максимальной температуре цикла) более наглядно отображает влияние временных факторов на исчерпание прочностных свойств материала (рис. 4).

Результаты испытаний стали 15X11МФБл на длительную прочность при программном варьировании максимальной температурой цикла (табл. 3, рис. 5) показывают, что наличие 10 или 20% циклов с перегревами практически одинаково снижает пределы длительной прочности на базе $10^1 \dots 10^3$ ч – в среднем в 2,5 раза. Наличие 50% циклов с перегревами снижает предел длительной прочности в среднем в три раза. В табл. 3 представлены также значения коэффициентов уравнения (3) и коэффициента корреляции r , полученные при статистической обработке экспериментальных данных методом наименьших квадратов по формуле

$$r = \frac{m_{1/1}}{S_x \cdot S_y} \quad (4)$$

Заметим, что значения характеристик истинной пластичности ε_f^{cr} в исследованном диапазоне долговечностей не зависят ни от времени до разрушения, ни от количества перегревов в общем числе теплосмен при испытаниях на длительную прочность и ползучесть (рис. 6).

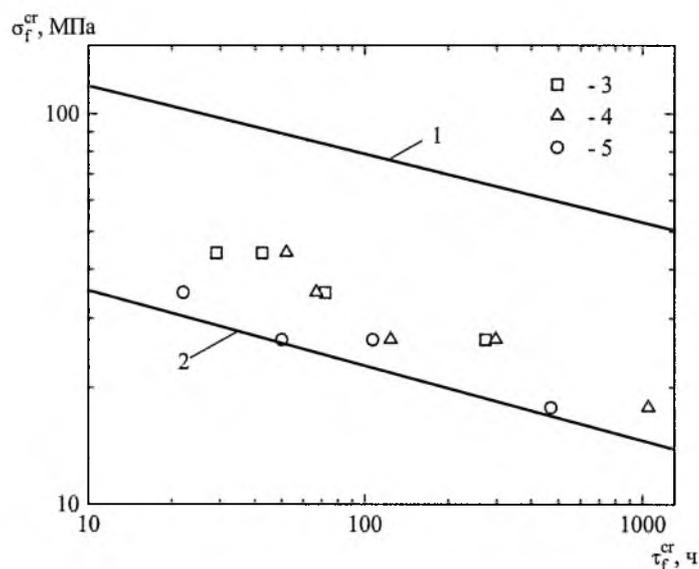


Рис. 5. Кривые длительной прочности стали 15X11МФБл при нагреве по трапецидальному циклу: 1 $T = 200 \dots 650^\circ\text{C}$; 2 $T = 200 \dots 800^\circ\text{C}$; 3 $T = 200 \dots 650^\circ\text{C} + 10\% 200 \dots 800^\circ\text{C}$; 4 $T = 200 \dots 650^\circ\text{C} + 20\% 200 \dots 800^\circ\text{C}$; 5 – $T = 200 \dots 650^\circ\text{C} + 50\% 200 \dots 800^\circ\text{C}$.

Исследования характеристик сопротивления малоцикловому неизотермическому нагружению показали, что циклическая долговечность исследуемой стали и вид разрушения существенно зависят от величины дейст-

вующих напряжений, формы температурного цикла и уровня максимальной температуры испытаний (табл. 4 и рис. 7). Например, сопоставление результатов испытаний на малоцикловую усталость в неизотермических условиях при нагреве по треугольному и трапецидальному циклу 200...800°C свидетельствует о том, что наличие выдержки длительностью 40 с (при равных других параметрах циклов) в среднем в два раза снижает циклическую долговечность исследуемой стали. Отличия в наклоне кривых усталости при нагружении по этим термоциклам указывают на различную чувствительность долговечности к изменению размаха напряжений. Представленные на рис. 7 результаты могут быть описаны зависимостью

$$\lg N_f = b + k(2\sigma_a), \quad (5)$$

где k, b – коэффициенты, их значения приведены в табл. 4.

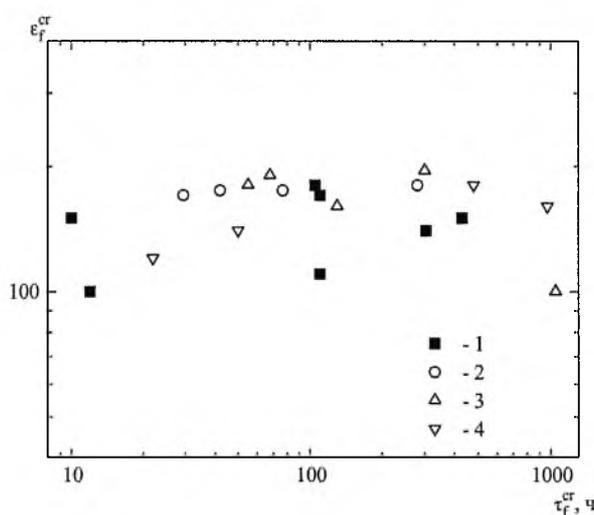


Рис. 6. Изменение истинной пластичности при разрушении образцов из стали 15X11МФБл в зависимости от длительности испытаний при нагреве по трапецидальному циклу: 1 – $T = 200...800^\circ\text{C}$; 2 – $T = 200...650^\circ\text{C} + 10\% 200...800^\circ\text{C}$; 3 – $T = 200...650^\circ\text{C} + 20\% 200...800^\circ\text{C}$; 4 – $T = 200...650^\circ\text{C} + 50\% 200...800^\circ\text{C}$.

Отметим, что при испытаниях на малоцикловую усталость в неизотермических условиях независимо от формы температурного цикла в диапазоне изменения температуры на протяжении одного цикла 200...650°C и 200...700°C разрушение образцов носило усталостный характер. При этом отношение сжимающих напряжений в цикле σ_{\min} , действующих при максимальной температуре цикла, к условному пределу текучести $\sigma_{0,2}$, определенному при той же температуре цикла, составляло 0,1...0,34 и не достигало пороговых значений 0,6...0,8, при которых происходит смена преобладающих процессов повреждения материала (усталостный или квазистатический) [2]. При испытаниях по режиму 200...800°C разрушение образцов носило квазистатический характер при $\sigma_{\min} / \sigma_{0,2} = 0,6...1,1$ и усталостный – при $\sigma_{\min} / \sigma_{0,2} \leq 0,6$ (рис. 8).

**Результаты испытаний стали 15Х11МФБл на малоцикловую усталость
в неизотермических условиях при нагреве по треугольному и трапецидальному
циклу**

Форма цикла	$2\sigma_a$, МПа	N_f , цикл	Вид разрушения	k	b	r
Треугольный, 200...650°C	310	55000 →	–	–228,53	1317,07	0,87
Треугольный, 200...700°C	390 355 348 330 300 267	3056 8135 6532 9217 22156 43258	Усталостное	–286,87	1670,72	0,83
Треугольный, 200...800°C	409	2148	Квазистатическое	–122,76	826,86	0,86
	409	1388	Усталостное			
	345	3973				
	280	6354				
	242 200	10471 24981				
Трапецидальный, 200...650°C	380	12148	Усталостное	–366,78	1700,35	0,81
	377	14521				
	362	16134				
	343	18248				
Трапецидальный, 200...700°C	390	3924	Усталостное	–200,00	1060,20	0,85
	372	4536				
	354	4135				
	335	6241				
	325	5247				
	300	6148				
Трапецидальный, 200...800°C	360	1576	Квазистатическое	–205,00	1005,00	–0,78
	322	1800				
	310	2254				
	309	2582				
	265	4243	Усталостное			
	260	3621				
	251	6603				
	229	5344				

Заметим, что оценка долговечности исследуемой стали в диапазоне изменения температуры 200...800°C по величине знакопеременной пластической деформации за цикл затруднена, так как при испытаниях на малоцикловую усталость в неизотермических условиях получены как усталостные, так и квазистатические виды разрушения. А зависимость Коффина–Мэнсона ($\Delta\varepsilon_{in} N_f^k = c$) описывает долговечность только в случае усталостного разрушения. На рис. 9 представлены результаты испытаний на малоцикловую усталость в неизотермических условиях при нагреве по трапецидальному циклу 200...800°C. Видно, что одному и тому же значению

долговечности соответствуют два значения знакопеременной пластической деформации за цикл $\Delta\epsilon_{in}$ при различных видах разрушения, хотя оценка этих результатов по размаху напряжений дает единую кривую усталости (на рис. 7 кривая б).

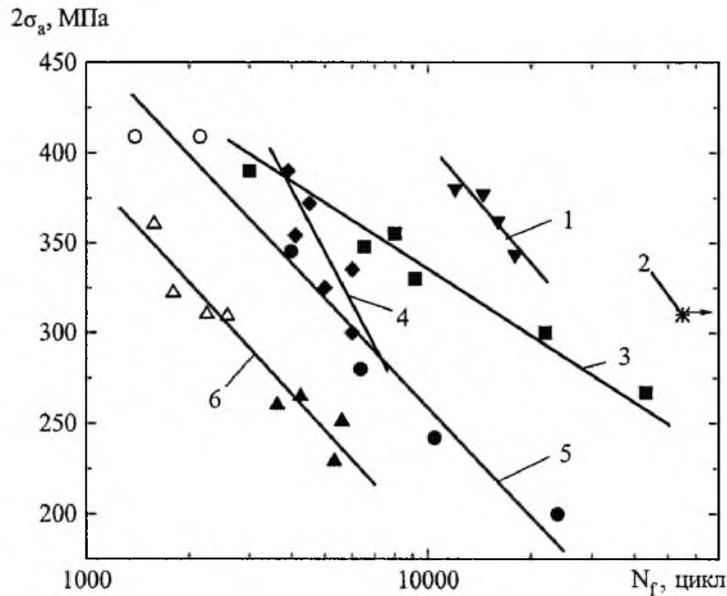


Рис. 7. Кривые малоциклового усталости стали 15X11МФБл в неизотермических условиях при нагреве по треугольному (2, 3, 5) и трапецидальному (1, 4, 6) циклам: 2, 4 – $T = 200...650^{\circ}\text{C}$; 1, 3 – $T = 200...700^{\circ}\text{C}$; 5, 6 – $T = 200...800^{\circ}\text{C}$. (Здесь и на рис. 8, 9: светлые точки – квазистатическое разрушение, темные – усталостное.)

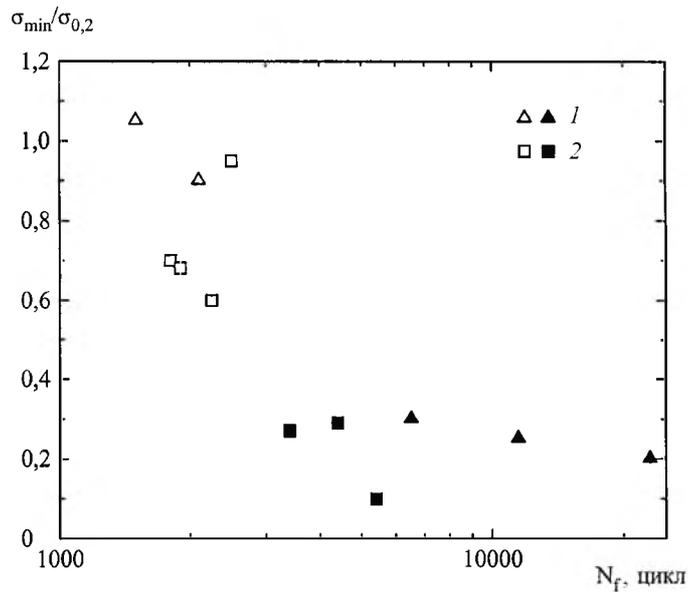


Рис. 8. Изменение циклической долговечности стали 15X11МФБл в зависимости от отношения величины минимальных напряжений цикла к пределу текучести материала при нагреве по треугольному (1) и трапецидальному (2) циклам 200...800°C.

Т а б л и ц а 5

Результаты испытаний стали 15X11МФБл на малоцикловую усталость в изотермических условиях при нагреве по трапецидальному циклу с перегревами

Число циклов перегрева, %	$2\sigma_a$, МПа	N_f , цикл	k	b	r
10	289	5571	-308,93	1525,76	-0,865
	328	7532			
	317	7930			
	305	7027			
	266	13295			
20	414	2070	-157,37	919,49	-0,720
	396	1716			
	325	5347			
	311	8178			
	307	6806			
50	350	2312	-217,07	1056,22	-0,765
	345	1981			
	315	2212			
	258	5121			
	240	5435			

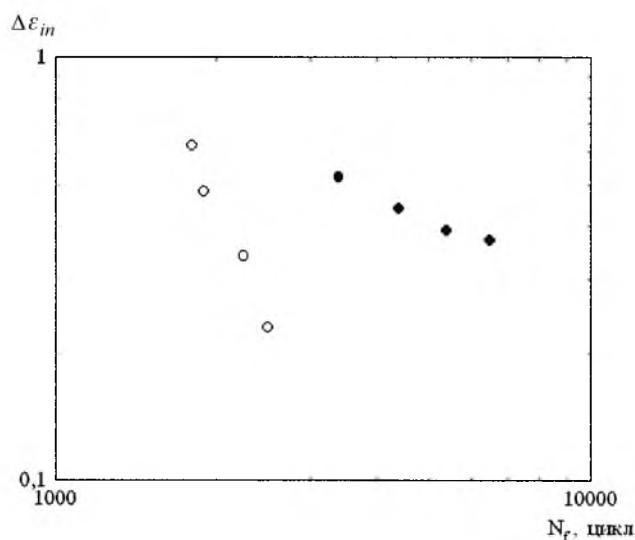


Рис. 9. Изменение циклической долговечности стали 15X11МФБл при нагреве по трапецидальному циклу 200...800°C в зависимости от величины знакопеременной пластической деформации за цикл.

Данные по влиянию перегревов на циклическую долговечность стали 15X11МФБл при нагреве по трапецидальному циклу приведены на рис. 10 и в табл. 5. Можно отметить, что повышение максимальной температуры цикла с 650°C (кривая 1) до 800°C (кривая 5) снижает циклическую долговечность стали в среднем на порядок. С ростом числа циклов перегревов (200...800°C) в общем числе нормальных циклов (200...650°C) с 10 до 50%

циклическая долговечность также снижается. Причем это снижение не пропорционально росту числа циклов перегревов. Так, при наличии 10% содержания числа циклов перегревов циклическая долговечность уменьшается в среднем в три раза по сравнению с долговечностью стали, определенной при нагреве по трапецеидальному циклу 200...650°C (кривые 1 и 2). Наличие 50% содержания числа циклов перегрева от общего числа регламентированных циклов приводит к снижению циклической долговечности на порядок. В этом случае кривые усталости для 50 и 100% (термоцикл 200...800°C) содержания числа циклов перегревов практически совпадают (на рис. 10 кривые 4 и 5). Рассмотренные кривые усталости могут быть описаны зависимостью (5), коэффициенты которой представлены в табл. 5.

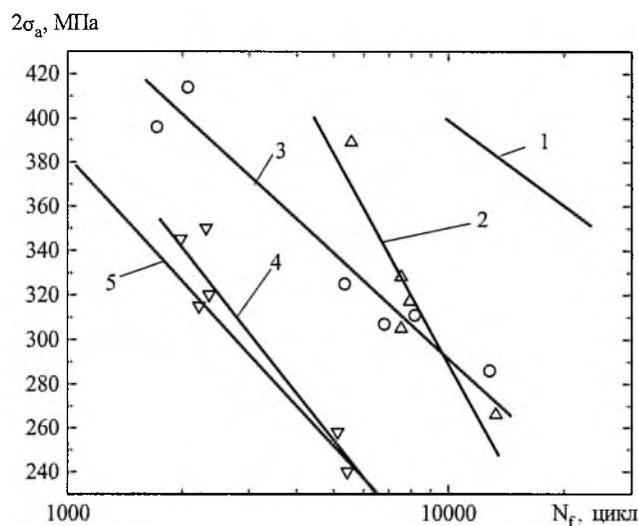


Рис. 10. Кривые малоциклового усталости стали 15X11МФБл при испытаниях в неизотермических условиях при нагреве по трапецеидальному циклу (1 – $T = 200...650^{\circ}\text{C}$; 5 – $T = 200...800^{\circ}\text{C}$) и при варьировании числом циклов перегрева (2 – $T = 200...650^{\circ}\text{C} + 10\%$ 200...800°C; 3 – $T = 200...650^{\circ}\text{C} + 20\%$ 200...800°C; 4 – $T = 200...650^{\circ}\text{C} + 50\%$ 200...800°C).

Заключение. Экспериментальные исследования показали, что в условиях малоциклового неизотермического нагружения циклическая долговечность и вид разрушения образцов из стали 15X11МФБл зависят от величины действующих напряжений, максимальной температуры цикла, его формы и продолжительности, а также наличия и числа циклов перегрева материала.

При таком нагружении в материале протекают два процесса накопления повреждений: квазистатический, связанный с направленным пластическим деформированием, и усталостный – со знакопеременным пластическим деформированием. Установлено, что вид разрушения исследованной стали можно определить с помощью отношения сжимающих напряжений в цикле, действующих при максимальной температуре цикла, к условному пределу текучести, определенному при той же температуре. Полученные пороговые значения параметра, определяющие смену пресвалирующих процессов повреждения материала, совпадают с аналогичными значениями для ранее исследованных сталей [2]. Традиционная оценка долговечности материалов

по критерию Коффина–Мэнсона не корректна, так как при этом не учитывается влияние квазистатического повреждения.

Исследования влияния перегревов на статическую и циклическую долговечность в неизотермических условиях стали 15Х11МФБл свидетельствуют о том, что с повышением числа высокотемпературных циклов 200...800°C в общем числе регламентированных циклов 200...650°C долговечность снижается не пропорционально числу циклов перегрева.

Использование напряжений в качестве критерия долговечности позволяет достаточно удовлетворительно описывать долговечность в условиях малоциклового неизотермического нагружения независимо от развивающихся в материале видов повреждения.

Резюме

Представлено результати експериментальних досліджень впливу різних режимів термічного навантаження на характеристики опору тривалого статичного і циклічного неизотермічного навантаження конструкційної сталі 15Х11МФБл стосовно умов експлуатації гірничо-збагачувального обладнання. Установлено, що при малоцикловому неизотермічному навантаженні в матеріалі протікають два процеси накопичення пошкоджень: квазістатичний, зумовлений направленим пластичним деформуванням, і утомний, зумовлений знакозмінним пластичним деформуванням. Детально досліджено вплив перегріву матеріалу на вид руйнування та характеристики опору тривалому статичному і циклічному неизотермічному навантаженню. Показано добру відповідність порогового значення параметра, що визначає зміну механізмів пошкодження досліджуваної сталі, аналогічним значенням для інших сталей.

Використання напруження як критерію довговічності достатньо задовільно описує довговічність в умовах малоциклового неизотермічного навантаження незалежно від розвитку в матеріалі виду пошкодження.

1. *Синявский Д. П., Гопкало А. П.* Исследование термической усталости хромомолибденовых сталей, применяемых в конструкциях агломерационных и обжиговых машин // Пробл. прочности. – 1979. – № 11. – С. 9 – 11.
2. *Троценко В. Т., Синявский Д. П., Гопкало А. П.* К вопросу о критериях разрушения металлов в условиях неизотермического нагружения. Сообщ. 2 // Там же. – 1981. – № 12. – С. 9 – 14.

Поступила 15. 10. 99