

**ПРИМЕНЕНИЕ БАЗОВЫХ СООТНОШЕНИЙ
ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ
ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ****В.В. Кривенюк, М.И. Егорова****THE USE OF THE METHOD OF BASE DIAGRAMS
FOR PREDICTING THE LONG-TERM STRENGTH UNDER STATIC
AND CYCLIC LOADING****V.V. Krivenyuk, M.I. Yegorova***Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, Украина*

Abstract It is shown that the experience of processing the large amounts of experimental data on the long-term strength of heat-resistant steels and alloys using the method of base diagrams, which were obtained from testing of smooth specimens, can be used effectively for proper processing of test results for notched specimens. Extensive research has been carried out in order to find an appropriate combination of a lifetime prediction rule and a suitable constitutive model to give a reliable prediction of lifetime in idealized creep-rupture-low cycle fatigue interaction conditions.

Разработка метода прогнозирования длительной прочности на основе базовых соотношений, т.е. метода базовых диаграмм МБД [1, 2], и его применение приводят к выводу, что переход к эффективному системному анализу известных экспериментальных данных имеет большое значение для повышения эффективности прогнозирования характеристик прочности при статических и циклических условиях нагружения.

В качестве исходной основы МБД используется уравнение базовых диаграмм

$$\lg \sigma'_t = \lg \sigma_1 - \frac{3,6 - \lg \sigma_1}{12} (\lg t + 0,1 \lg^2 t), \quad (1)$$

где σ'_t – текущее напряжение по базовой диаграмме, МПа; σ_1 – напряжение, которое приводит к разрушению в течение одного часа, t – время до разрушения, ч.

Особенности отдельных участков экспериментальных диаграмм длительной прочности (ДДП) конкретизируются с помощью характеристик

$$\beta_y = \frac{\sigma_{\alpha t} - \sigma_{t_y}}{\sigma_{\alpha t} - \sigma'_t} = \frac{\Delta \sigma_{t_y}}{\Delta \sigma'_t}, \quad (2)$$

где $\sigma_{\alpha t}$ – координата общей исходной точки сравниваемых участков; σ_{t_3} , σ'_t – координаты правых границ сравниваемых участков экспериментальной и базовой диаграмм; $\Delta \sigma_{t_3}$ и $\Delta \sigma'_t$ – понижения длительной прочности по экспериментальной и базовой диаграммам за одно и то же время от αt до $t = t_3$.

Если в формулу (2) вместо σ_{t_3} подставить искомое напряжение, то получим формулу для его прогнозирования в виде

$$\sigma_t = \sigma_{\alpha t} - \beta(\sigma_{\alpha t} - \sigma'_t) = \sigma_{\alpha t} - \beta \Delta \sigma'_t, \quad (3)$$

где β — обобщенный показатель отклонений отдельных участков экспериментальных диаграмм от соответствующих участков базовых диаграмм.

Формулы (1) и (2) дают возможность информацию об отдельном участке экспериментальной ДДП представлять точкой с координатами $(\beta_3, \sigma_{\text{от}})$ в системе координат $\beta_3, \sigma_{\text{от}}$. Это облегчает сравнительный анализ особенностей больших массивов экспериментальных данных и создает благоприятные условия для перехода к качественно новому их системному анализу. Важными элементами такого анализа являются оценки и учет для различных групп материалов характеристик $\beta, \beta_3, \Delta_1, S$, где

$$\Delta_1 = \frac{\sigma_t - \sigma_{\text{т}}}{\sigma_{\text{т}}}, \quad (4)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_1)_i}{n-1}}. \quad (5)$$

Выполненные к настоящему времени исследования с помощью МБД приводят к следующим выводам. Для сплавов с твердорастворным упрочнением в практически важном интервале температур наиболее вероятными являются значения $\beta = 0,9 \dots 1,3$, а для дисперсно-упрочненных – $\beta = 1,4 \dots 1,7$. Указанный интервал значений β объясняется в основном возрастанием экспериментальных значений β_3 по мере возрастания температуры и длительности нагружения. В целом значения β_3 изменяются в пределах от 0 до 2,3. Минимальными являются значения $\beta_3 \approx 0$ в тех случаях, когда временные процессы разупрочнения практически не проявляются и ДДП являются близкими к горизонтальным. Однако в малом интервале низких температур значения β_3 довольно быстро возрастают, поэтому практически важным является в основном интервал изменения значений β_3 от 0,6...0,8 до 2,3. Выполнение больших объемов прогнозирования на один порядок по логарифмической шкале времени (ЛШВ) привело к выводу, что при выполнении неравенства

$$\beta - 0,3 \div 0,4 < \beta_3 < \beta + 0,3 \div 0,4, \quad (6)$$

в свою очередь, прогнозирование с помощью МБД выполняется при условии

$$S \leq 0,1 \dots 0,12. \quad (7)$$

Существенная особенность применения принципа базовых соотношений заключается в значительном уменьшении числа используемых эмпирических постоянных. Об этом, в частности, можно судить по результатам обработки данных табл. 1. Согласно данным этой таблицы прогнозирование длительной прочности по исходным значениям $\sigma_{\text{от}}$ при использовании одного значения постоянной $\beta = 1,2$ привело к практически приемлемому значению $S = 0,101$. С помощью МБД был выполнен анализ более 2000 ДДП, который позволил установить приведенные выше обобщенные значения постоянных, использование которых способствует существенному облегчению прогнозирования и повышению его эффективности.

Суть МБД такова, что в результате отмеченной значительной по объему обработке данных для гладких образцов полученные результаты могут использоваться для уточнения и повышения эффективности прогнозирования длительной прочности при исследованиях образцов с надрезами. Способ прогнозирования остается неизменным. О полезности такого прогнозирования можно судить на основании результатов обработки результатов высокотемпературных испытаний длительностью до 300 тыс. часов гладких и надрезанных образцов, приведенных на рис. 1 и в табл. 2. Данные рис. 1 показывают, что закономерности длительного разрушения довольно близкие, а данные табл. 2 более четко конкретизируют особенности отдельных участков соответствующих диаграмм длительной прочности. Для определения β (в данном случае $\beta = 1,3$) задается произвольный ряд значений β , при каждом таком

значении выполняется прогнозирование σ_t , $\sigma_{\alpha t}$, рассчитываются погрешности и значения S , затем по минимальному S устанавливается искомое β . Из этой таблицы следует, что по сравнению с преимущественным проявлением упрочняющего эффекта надреза в данном случае по мере увеличения длительности нагружения упрочнение сменяется разупрочнением.

Таблица 1. Данные [3] о длительной прочности стали X18H10T и результаты обработки по МБД

№ уча-стка	$\sigma_{\alpha t}$, МПа	σ_t , МПа	αt , ч	t_3 , ч	Δ_1 , %	β_3
1	137	78	9970	93460	13,0	1,45
2	157	88	5860	68390	11,7	1,41
3	157	88	8760	76760	18,6	1,57
4	196	137	12700	124614	-4,2	1,09
5	196	137	8340	98840	-7,7	1,02
6	196	137	6090	69700	-7,0	1,03
7	196	108	3281	70000	4,2	1,26
8	196	118	4500	95000	-4,5	1,12
9	137	83	8770	105080	0,6	1,21
10	137	83	8151	104059	-0,8	1,18
11	137	83	5435	84000	-5,0	1,11
12	108	53	5357	62617	20,4	1,50
13	108	53	6049	76320	18,2	1,46
14	137	61	2672	60626	18,4	1,41
15	108	69	9379	103324	-6,2	1,08
16	108	61	9607	89470	10,4	1,39
17	108	61	9660	128350	1,4	1,22
18	78	47	10762	110550	-3,6	1,14
19	78	47	10400	121860	-6,9	1,09
20	78	47	6070	82415	-10,4	1,04
21	61	33	6676	70249	2,9	1,24
22	61	33	9150	83540	7,0	1,31
23	78	47	4576	63980	-11,1	1,03
24	78	47	5160	64370	-8,3	1,06
25	78	37	5672	145970	-4,9	1,15
26	61	37	19458	145970	0,7	1,21
27	78	47	5188	90560	-16,4	0,96

Примечание. Здесь $\beta = 1,2$; $S = 10,1\%$; $n = 27$.

В известных работах обосновывается, что закономерности процесса разупрочнения в зоне надреза с учетом концентратора напряжений близки к процессам в гладком образце. Это дает основание утверждать о целесообразности рассмотрения на общей основе закономерностей деформирования и разрушения при статическом и циклическом нагружении. Соответственно в данном случае будет обосновываться целесообразность уточнения критерия малоциклового усталости Мэнсона [5] на основе базовых соотношений.

В результате обобщения экспериментальных данных для металлов и сплавов Мэнсон разработал метод универсальных наклонов на основании уравнения для размаха полной деформации в виде

$$\Delta \varepsilon = 3,5 \frac{\sigma_a}{E} N^{-0,12} + \left(\lg \frac{1}{1-\psi} \right)^{0,6} N^{-0,6}, \quad (8)$$

где σ_b – предел прочности, МПа, E – модуль упругости, ψ – относительное удлинение после разрушения.



Рис. 1. - Результаты обработки по МБД данных [4].

Для обеспечения реализации основных положений МБД необходимо было изменить уравнение (8). В связи с этим в [5] обрабатывались 112 кривых малоциклового усталости из [6] на основе положений МБД.

Опыт применения МБД показал, что уравнение вида (8) необходимо уточнять, полагая

$$K \frac{\sigma_a}{E} = \Delta \epsilon_{y1}, \quad \left(\lg \frac{1}{1-\psi} \right)^m = \Delta \epsilon_{i1}, \quad (9)$$

где $\Delta \epsilon_{y1}$ и $\Delta \epsilon_{i1}$ — составляющие соответственно упругой и пластической деформации при $N = 1$ цикл, а уравнение (8) должно рассматриваться в виде

$$\Delta \epsilon = \Delta \epsilon_{y1} \cdot f(\Delta \epsilon_{yN}, N) + \Delta \epsilon_{i1} \cdot f(\Delta \epsilon_{iN}, N). \quad (10)$$

По аналогии с МБД уравнение (1) используется в виде

$$\lg \Delta \epsilon'_N = \lg \Delta \epsilon_1 - \frac{3,6 - \lg \Delta \epsilon_1}{12} (\lg N + 0,1 \lg^2 N), \quad (11)$$

где $\Delta \epsilon'_N$ — составляющая пластической или упругой деформации для правой границы соответствующего участка базовой диаграммы; $\Delta \epsilon_1$ — значение соответствующей составляющей деформации при $N = 1$ цикл. Прогнозирование $\Delta \epsilon_N$ по исходному значению $\Delta \epsilon_{\alpha N}$ в пределах отдельного участка выполняется по аналогичной формуле (2):

$$\Delta \epsilon_N = \Delta \epsilon_{\alpha N} - \beta_i (\Delta \epsilon_{\alpha N} - \Delta \epsilon'_N), \quad (12)$$

где β_i — универсальное значение β , устанавливаемое для каждого из 12 указанных интервалов значений N ; $\Delta \epsilon_{\alpha N}$, $\Delta \epsilon_N$ — исходное и прогнозируемое значения упругой

или пластической составляющих деформации для граничных значений числа циклов каждого отдельного интервала αN и N .

Таблица 2 — Результаты обработки данных [4] по МБД

№	$\sigma_{\alpha t}$, МПа	σ_{t_3} , МПа	αt , ч	t_3 , ч	$\lg\left(\frac{t_3}{\alpha t}\right)$	Δ_1 , %	β_3
Гладкие образцы							
1	105,5	72,0	1000	10000	1,000	-14,74	0,987
2	72,0	46,5	10000	100000	1,000	-15,92	1,008
3	46,5	40,0	100000	200000	0,301	-3,41	1,074
4	335,0	246,0	1000	10000	1,000	-4,97	1,143
5	246,0	185,0	10000	100000	1,000	-11,89	0,956
6	185,0	165,0	100000	200000	0,301	-1,23	1,18
7	165,0	156,0	200000	300000	0,176	-1,95	0,971
8	330,0	204,0	1000	10000	1,000	12,62	1,634
9	204,0	120,0	10000	100000	1,000	9,37	1,501
10	120,0	100,0	100000	200000	0,301	3,80	1,605
11	420,0	334,0	1000	10000	1,000	-9,18	0,958
12	334,0	228,0	10000	100000	1,000	1,80	1,352
13	228,0	197,0	100000	200000	0,301	2,85	1,588
14	377,0	298,0	1000	10000	1,000	-10,11	0,941
15	298,0	232,0	10000	100000	1,000	-12,30	0,908
16	232,0	218,0	100000	200000	0,301	-5,36	0,709
17	218,0	195,0	200000	300000	0,176	4,33	2,054
18	388,0	315,0	1000	10000	1,000	-12,10	0,854
19	315,0	238,0	10000	100000	1,000	-8,85	1,021
20	238,0	214,0	100000	200000	0,301	-0,99	1,195
21	214,0	192,0	200000	300000	0,176	3,97	1,989
Надрезанные образцы							
22	115,0	80,0	1000	10000	1,000	-15,18	0,965
23	80,0	56,0	10000	100000	1,000	-21,04	0,872
24	400,0	235,0	1000	10000	1,000	22,03	1,894
25	235,0	145,0	10000	100000	1,000	6,62	1,455
26	145,0	127,0	100000	200000	0,301	-0,45	1,26
27	127,0	117,0	200000	300000	0,176	-0,01	1,298
28	350,0	200,0	1000	10000	1,000	22,94	1,873
29	200,0	102,0	10000	100000	1,000	25,76	1,776
30	102,0	82,0	100000	200000	0,301	6,86	1,809
31	384,0	250,0	1000	10000	1,000	9,44	1,578
32	250,0	163,0	10000	100000	1,000	1,89	1,348
33	440,0	360,0	1000	10000	1,000	-11,10	0,867
34	360,0	268,0	10000	100000	1,000	-5,56	1,119
35	268,0	240,0	100000	200000	0,301	-0,09	1,29
36	445,0	363,0	1000	10000	1,000	-10,68	0,883
37	363,0	250,0	10000	100000	1,000	2,21	1,367
38	250,0	228,0	100000	200000	0,301	-2,18	1,06

Примечание. Когда $\beta = 1,5$, $S = 12,86\%$; когда $\beta = 1,4$, $S = 11,43\%$; когда $\beta = 1,3$, $S = 10,72\%$; когда $\beta = 1,2$, $S = 10,86\%$; когда $\beta = 1,1$, $S = 11,84$.

Расчетные оценки (4) и (5) приведены в процентах.

Использование (10) после уточнений подтвердило практическую приемлемость концепции универсальных наклонов. Вместе с тем выполненные исследования привели к выводу, что универсальные значения наклонов должны устанавливаться для возможно более узких интервалов продолжительности или числа циклов нагружения. Соответственно было обосновано, что общий интервал $10^0 \dots 10^6$ циклов целесообразно рассматривать в виде отдельных интервалов $10^0 \dots 3 \cdot 10^0$; $3 \cdot 10^0 \dots 10^1$; $10^1 \dots 3 \cdot 10^1$; $3 \cdot 10^1 \dots 10^2$; $10^2 \dots 3 \cdot 10^2$; $3 \cdot 10^2 \dots 10^3$; $10^3 \dots 3 \cdot 10^3$; $3 \cdot 10^3 \dots 10^4$; $10^4 \dots 3 \cdot 10^4$; $3 \cdot 10^4 \dots 10^5$; $10^5 \dots 3 \cdot 10^5$; $3 \cdot 10^5 \dots 10^6$ циклов с определением для каждого из них универсального значения β , т.е. в целом характеристик β_i . Установленные такие характеристики представлены в табл. 3. Базовые циклические диаграммы в качестве примера приведены в табл. 4, 5. Дальнейшие исследования привели к выводу о необходимости уточнения установленных базовых циклических диаграмм, которые необходимы для оценки значений β_3 , т.е. характеристик отклонений отдельных участков экспериментальных диаграмм от соответствующих участков базовых диаграмм.

Расчеты подтвердили высокую эффективность оценки сопротивления малоциклового усталости сталей и сплавов по данным о σ_b , E , ψ с помощью критерия Менсона. Была также установлена целесообразность уточнения базовых циклических диаграмм и перехода, в частности, к оценке и анализу отклонений от базовых диаграмм. Такая целесообразность объясняется возможностями обеспечения дальнейшего устойчивого повышения точности рассматриваемой критериальной оценки Мэнсона, и, особенно, повышения точности учета роли выдержек в условиях ползучести.

Таблица 3 — Значения β_i для упругой ($\Delta \epsilon_y$) и пластической ($\Delta \epsilon_{пл}$) составляющих циклического нагружения в диапазонах $\alpha N \dots N$

$\alpha N \dots N$	β_i	$\Delta \epsilon_y$	$\Delta \epsilon_{пл}$
$10^0 \dots 3 \times 10^0$	β_1	0,8	4,4
$3 \times 10^0 \dots 10^1$	β_2	0,7	3,5
$10^1 \dots 3 \times 10^1$	β_3	0,6	2,6
$3 \times 10^1 \dots 10^2$	β_4	0,5	2,1
$10^2 \dots 3 \times 10^2$	β_5	0,45	1,8
$3 \times 10^2 \dots 10^3$	β_6	0,4	1,7
$10^3 \dots 3 \times 10^3$	β_7	0,3	1,6
$3 \times 10^3 \dots 10^4$	β_8	0,3	1,5
$10^4 \dots 3 \times 10^4$	β_9	0,3	1,4
$3 \times 10^4 \dots 10^5$	β_{10}	0,3	1,3
$10^5 \dots 3 \times 10^5$	β_{11}	0,3	1,2
$3 \times 10^5 \dots 10^6$	β_{12}	0,3	1,1

Таким образом, необходимость комбинированного учета рассматриваемых закономерностей, в частности, обосновывается на основе представлений о том, что важным условием эффективного развития прогнозирования ползучести и длительной прочности является согласованная при различных условиях нагружения более четкая конкретизация индивидуальных особенностей конкретных материалов. Такая конкретизация может быть достигнута на основе более полного, комплексного учета информативности характеристик кратковременной прочности, температур плавления, модулей упругости, пределов упругости и т.п.

В рамках такого исследования использовалось уравнение

$$\epsilon^{1-\gamma} \dot{\epsilon} = \left[\frac{\frac{\sigma}{\sigma'}}{\left(1 - \frac{r\epsilon}{1+r\epsilon} - \alpha \sigma t^{1/3}\right) \left(1 + \frac{h}{\sigma^2} \epsilon\right)^{n/2}} \right]^m, \quad (13)$$

где $\epsilon, \dot{\epsilon}$ – деформация и скорость пластической деформации, h – характеристика деформационного упрочнения, r, α – характеристики деформационного и временного разупрочнения, σ_0 условное напряжение, σ' – напряжение, при котором скорость пластической деформации равна 1, $\gamma = 0,1$, m, n – постоянные.

Предположения о том, что $\varepsilon = 1$, временной поврежденностью можно пренебречь, приводят к формуле для описания кривых статического растяжения в виде

$$\sigma = \frac{(\sigma_T^2 + h\varepsilon)^{1/2}}{1 + r\varepsilon}, \quad (14)$$

где σ_T – предел текучести.

Таблица 4 — Универсальные диаграммы циклического упругого нагружения, рассчитанные по МБД для данных базовых значений $\Delta\varepsilon_v$

№	N, циклов												
	$1,0 \times 10^0$	$3,0 \times 10^0$	$1,0 \times 10^1$	$3,0 \times 10^1$	$1,0 \times 10^2$	$3,0 \times 10^2$	$1,0 \times 10^3$	$3,0 \times 10^3$	$1,0 \times 10^4$	$3,0 \times 10^4$	$1,0 \times 10^5$	$3,0 \times 10^5$	$1,0 \times 10^6$
1	2,0	1,566	1,222	0,996	0,823	0,699	0,595	0,532	0,470	0,419	0,369	0,328	0,288
2	1,9	1,485	1,157	0,943	0,778	0,660	0,561	0,502	0,443	0,311	0,273	0,241	0,212
3	1,8	1,405	1,093	0,889	0,732	0,621	0,528	0,471	0,416	0,292	0,256	0,226	0,198
4	1,7	1,324	1,029	0,835	0,687	0,582	0,494	0,441	0,389	0,273	0,239	0,211	0,185
5	1,6	1,244	0,965	0,782	0,643	0,544	0,461	0,411	0,362	0,254	0,222	0,197	0,172
6	1,5	1,164	0,900	0,729	0,598	0,506	0,428	0,381	0,336	0,235	0,206	0,182	0,159
7	1,4	1,084	0,837	0,677	0,554	0,468	0,396	0,352	0,310	0,217	0,190	0,167	0,146
8	1,3	1,004	0,774	0,625	0,511	0,430	0,364	0,323	0,284	0,199	0,174	0,153	0,134
9	1,2	0,925	0,711	0,572	0,467	0,393	0,332	0,295	0,259	0,181	0,158	0,139	0,121
10	1,1	0,845	0,648	0,521	0,424	0,356	0,300	0,266	0,234	0,164	0,143	0,125	0,109
11	1,0	0,766	0,586	0,470	0,382	0,320	0,269	0,239	0,209	0,146	0,127	0,112	0,097
12	0,9	0,687	0,524	0,420	0,340	0,284	0,239	0,211	0,185	0,129	0,112	0,099	0,086
13	0,8	0,609	0,462	0,369	0,298	0,249	0,209	0,184	0,161	0,113	0,098	0,086	0,074
14	0,7	0,531	0,401	0,319	0,257	0,214	0,179	0,158	0,138	0,096	0,083	0,073	0,063
15	0,6	0,453	0,341	0,270	0,217	0,180	0,150	0,132	0,115	0,080	0,070	0,061	0,052

Таблица 5 — Универсальные диаграммы циклического пластического нагружения, рассчитанные по МБД для данных базовых значений $\Delta\varepsilon_{пл}$.

№	N, циклов												
	$1,0 \times 10^0$	$3,0 \times 10^0$	$1,0 \times 10^1$	$3,0 \times 10^1$	$1,0 \times 10^2$	$3,0 \times 10^2$	$1,0 \times 10^3$	$3,0 \times 10^3$	$1,0 \times 10^4$	$3,0 \times 10^4$	$1,0 \times 10^5$	$3,0 \times 10^5$	$1,0 \times 10^6$
1	140,0	59,81	21,601	9,748	4,3011	2,1381	0,9306	0,4264	0,1745	0,077	0,032	0,015	0,006
2	130,0	54,01	18,749	8,214	3,5132	1,7025	0,7175	0,3191	0,1260	0,054	0,021	0,009	0,004
3	120,0	48,33	16,046	6,799	2,8075	1,3219	0,5371	0,2309	0,0875	0,036	0,014	0,006	0,002
4	110,0	42,79	13,500	5,506	2,1839	0,9950	0,3877	0,1602	0,0579	0,023	0,008	0,003	0,001
5	100,0	37,39	11,120	4,340	1,6422	0,7202	0,2671	0,1054	0,0361	0,013	0,004	0,002	0,000
6	90,0	32,17	8,918	3,303	1,1818	0,4954	0,1732	0,0647	0,0207	0,007	0,002	0,001	0,000
7	80,0	27,12	6,904	2,400	0,8017	0,3180	0,1033	0,0361	0,0106	0,003	0,001	0,000	0,000
8	70,0	22,28	5,095	1,635	0,5003	0,1850	0,0547	0,0175	0,0046	0,001	0,000	0,000	0,000
9	60,0	17,67	3,507	1,012	0,2749	0,0926	0,0240	0,0068	0,0015	0,000	0,000	0,000	0,000
10	50,0	13,32	2,161	0,535	0,1216	0,0356	0,0075	0,0017	0,0003	0,000	0,000	0,000	0,000
11	40,0	9,306	1,085	0,206	0,0339	0,0077	0,0010	0,0001	0,0000	0,000	0,000	0,000	0,000
12	30,0	5,681	0,314	0,029	0,0012	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,000	0,000	0,000	0,000

Предполагается также, что формула (14) может быть использована для описания мгновенного деформирования в виде

$$\sigma = \frac{(\sigma_y^2 + h_0 \epsilon_{0i})^{1/2}}{1 + r \epsilon_{0i}}, \quad (15)$$

где σ_y – предел упругости, $\epsilon_{0п}$ – пластическая составляющая деформации при нагружении, $h_{01} = h_0$ при $\sigma < \sigma_T$, $h_{02} = h_0$ при $\sigma > \sigma_T$.

Использование этих расчетных зависимостей позволило улучшить описание процесса малоциклового усталости с выдержками, в процессе которых интенсивно развивались высокотемпературные релаксационные процессы.

В целом выполненные исследования свидетельствуют о целесообразности развития предлагаемого системного анализа закономерностей деформирования и разрушения жаропрочных сталей и сплавов при различных условиях нагружения на основе использования, в том числе, принципа базовых соотношений.

Литература

1. Кривенюк В.В. Прогнозирование ползучести и длительной прочности металлических материалов на сроки службы до 300000 ч и более // Пробл. прочности. -2003. -№ 4. -С. 104-120.
2. Писаренко Г.С., Кривенюк В.В. Новый подход к прогнозированию длительной прочности металлов // Доклады АН СССР. Механика.1990. Т.312 —№ 3. — С. 558—562.
3. Data sheets on the elevated-temperature properties of 18Cr-10Ni-Ti stainless steel // NRIM creep data sheet. Tokyo. – 1987. – No. 5B. – 32 p.
4. Diehl Herman, Granacher Jülich und Joachim. Ergebnisse aus Zeitstandversuchen bei 500 °C mit einer Beanspruchungsdauer bis über 300000 h // Archiv fur das Eisenhüttenwesen, 1978. -N 7. -P. 299-303.
5. Кривенюк В.В., Заслоцкая Л.А. О применении принципа базовых соотношений для анализа закономерностей циклического деформирования металлов и сплавов // Пробл. прочности. —2001. —№ 6. — С. 72—83.
6. Каталог данных по механическим свойствам и расчетным характеристикам конструкционных материалов в области малоциклового усталости / МЦНТИ АН СССР Ин-т машиноведения им. А.А. Благонравова. — М., 1990. — 400 с. (Междунар. научн.-техн. комплекс «Надежность машин»).