

Э.В. Приходько, Т.В. Сенина, Л.А.Головко

ФИЗИКО–ХИМИЧЕСКИЙ АСПЕКТ АНАЛИЗА СВОЙСТВ ФЕРРИТНО–ПЕРЛИТНЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ

Исследованы закономерности процессов ползучести и длительной прочности ферритно–перлитных сталей. Установлены закономерности изменения этих характеристик в зависимости от модельных параметров межатомного взаимодействия компонентов легирующей подсистемы общего состава.

Анализ последних достижений и публикаций.

На существенном замедлении развития прогнозирования ползучести и длительной прочности металлических материалов при больших длительностях высокотемпературного нагружения сделан акцент в работе [1]. Причину такого положения В.В.Кривенюк видит, прежде всего, в том, что объем экспериментальных исследований для необходимого уточнения применяемых уравнений ползучести и длительной прочности оказался недостаточным и многие уравнения, описывающие ползучесть и длительную прочность ($\sigma_{дл}$), тщательно не проверены.

Принимая вышеизложенное к сведению, следует отметить, что в указанном в работе [1] перечне проблемных вопросов не рассматривается физико–химический аспект. Очевидно, что материаловедческий фундамент проблем длительной и кратковременной прочности один, и основой его является теория легирования и микролегирования.

Постановка задачи.

Целью данного этапа исследования являлся анализ влияния состава многокомпонентных металлических сталей и сплавов на их длительную прочность и кратковременные свойства при повышенных температурах. Следует отметить, что в ряде фундаментальных исследований, в работе [2] в частности, показано, что непосредственной, достаточно тесной связи между показателями, полученными при кратковременных и длительных испытаниях, не существует.

При рассмотрении вопроса о хрупком разрушении целесообразно исходить из того, что каждый металлический материал является агрегатом, состоящим из кристаллитов и границ зерен, которые по–разному влияют на прочностные и пластические свойства композита. Было показано, что отношение прочности кристаллита к прочности границ зависит от температуры. Выше определенной температуры границы слабее, чем кристаллиты, а при низких температурах границы прочнее, чем кристаллит. Температура, при которой прочности границ и кристаллитов равны, называется эквикогезивной. Эти общие положения служат базой для сравнительных исследований соотношения между кратковременными и длительными характеристиками прочности и пластичности сталей. К сожалению, в

большинстве описанных в литературе случаев эти соотношения не анализируются. Учитывая уникальность и масштабность проведенных в работе [3] исследований, анализу их результатов посвятили основное содержание работы .

Изложение основных материалов исследования.

Для выявления закономерностей изменения в зависимости от состава стали длительной прочности при 500⁰С нами использована информация о первых сорока трех (из 52 исследованных в работе [3]) составах, режимы термической обработки которых были близки. Информация о составе части этих сталей (всех хромованадиевых и хромомолибденованадиевых) приведена в табл.1, данные о комплексе физико–химических модельных параметров большинства этих сталей – в табл.2. При последующем анализе механических свойств символом σ_{DVM} был обозначен предел ползучести при 500⁰С, полученный ускоренным (за 45 часов) методом.

Таблица 1. Состав и свойства исследованных сталей [3]

№ п/п	Массовая доля элемента,						σ_T	σ_B	σ_{DVM}
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V			
1	0,13	0,83	0,47	1,64	–	0,26	44	61,9	17
2	0,14	1,62	0,54	1,63	–	0,32	39,8	59,2	17–18
3	0,18	0,23	0,53	1,50	–	0,34	42–43	56–57	14–15
4	0,25	0,61	0,48	1,10	0,22	0,22	72	84	17,5
5	0,27	0,44	0,56	1,17	0,46	0,46	79	86,9	–
6	0,27	0,88	0,75	1,45	0,57	0,57	80	90	17,5
7	0,29	0,43	0,53	1,50	0,55	0,55	>50	86	22,7
8	0,28	0,39	0,47	1,26	1,03	1,03	73	82	24,5
9	0,27	0,30	0,40	1,3	1,10	1,10	>60	80–95	–
10	0,15	0,32	0,56	1,09	0,22	0,22	65,5	75,7	15–16
11	0,21	0,40	0,60	1,10	0,07	0,07	58,7	70,1	26
12	0,21	0,82	0,41	1,10	0,11	0,11	71,1	80,1	32
13	0,21	0,45	0,33	0,00	0,07	0,07	74	84	40
14	0,22	1,02	0,57	1,11	0,15	0,15	77	89,6	35
15	0,30	0,27	0,51	1,60	0,10	0,10	74	91	31,2
16	0,19	0,8	0,72	0,95	0,21	0,21	>60	80–95	40
17	0,48	0,20	0,70	2,31	0,26	0,26	>78	114–130	34
18	0,22	0,38	0,53	1,62	0,39	0,39	–	80–84	35
19	0,31	0,37	0,61	2,58	0,48	0,48	110	124	19,2
20	0,32	0,34	0,59	2,82	0,45	0,45	>100	110–130	–
21	0,31	0,36	0,72	2,32	0,43	0,43	>100	110–130	–

Дальнейший анализ можно разделить на два последовательных этапа. На первом рассмотрены все без исключения парные и основные многофакторные соотношения между свойствами, полученными при кратковременных испытаниях, и модельными параметрами (основная часть наиболее значимых из них представлена в табл.3).

Таблица 2. Модельные параметры стальной из таблицы 1.

№ п/п	d 10^{-1} мм	$\text{tg}\alpha$	Z , е	d_0 , 10^{-1} мм	$\text{tg}\alpha_0$	Z_0 , е	d_{pi} , 10^{-1} мм	$\text{tg}\alpha_m$	Z^{ms} е	d_{mi} , 10^{-1} мм	$\text{tg}\alpha_{mi}$	Z^{mb} е
1	2,784	0,087	1,249	2,386	0,083	2,199	1,99	0,095	1,646	2,898	0,067	1,830
2	2,762	0,087	1,283	2,338	0,085	2,014	2,02	0,093	1,530	2,902	0,067	1,880
3	2,792	0,087	1,230	2,397	0,083	2,148	1,89	0,100	1,686	2,905	0,067	1,914
4	2,770	0,088	1,232	2,204	0,089	2,060	1,84	0,100	1,660	2,906	0,067	1,918
5	2,773	0,088	1,237	2,258	0,088	2,101	1,83	0,101	1,660	2,916	0,068	2,044
6	2,763	0,087	1,270	2,299	0,087	2,114	1,92	0,098	1,695	2,918	0,068	2,057
7	2,771	0,087	1,249	2,286	0,087	2,115	1,80	0,12	1,637	2,915	0,068	2,029
8	2,776	0,087	1,251	2,335	0,086	2,139	1,78	0,103	1,621	2,934	0,070	2,137
9	2,780	0,087	1,249	2,358	0,086	2,143	1,74	0,104	1,583	2,935	0,070	2,138
10	2,794	0,087	1,221	2,397	0,084	2,209	1,96	0,098	1,736	2,928	0,066	2,101
11	2,784	0,087	1,234	2,345	0,085	2,229	1,90	0,099	1,706	2,957	0,063	2,277
12	2,772	0,087	1,249	2,303	0,085	2,180	1,87	0,098	1,635	2,962	0,063	2,343
13	2,781	0,088	1,202	2,147	0,091	2,066	1,79	0,101	1,635	3,104	0,057	2,082
14	2,768	0,087	1,273	2,353	0,084	2,228	1,92	0,097	1,650	2,982	0,062	2,494
15	2,776	0,087	1,261	2,371	0,083	2,268	1,76	0,104	1,580	2,966	0,063	2,356
16	2,783	0,087	1,242	2,376	0,084	2,241	1,97	0,097	1,735	2,967	0,064	2,428
17	2,750	0,087	1,282	2,251	0,087	2,080	1,69	0,107	1,495	2,920	0,065	1,991
18	2,784	0,087	1,249	2,386	0,083	2,119	1,99	0,095	1,646	2,898	0,067	1,830
19	2,772	0,087	1,286	2,383	0,083	2,155	1,80	0,102	1,646	2,915	0,066	1,987
20	2,770	0,087	1,295	2,390	0,082	2,156	1,78	0,103	1,609	2,914	0,066	1,964
21	2,768	0,087	1,290	2,376	0,084	2,186	1,83	0,102	1,649	2,921	0,066	2,030

Таблица 3. Коэффициенты корреляции между свойствами и модельными параметрами

№ п/п	Модель	σ_b	σ_r	σ_{DVM}
1	$f(d, \text{tga}, Z^Y)$	0,854	0,809	0,548
2	$f(d)$	-0,632	-0,516	-0,176
3	$f(\text{tga})$	-0,544	-0,557	-0,342
4	$f(Z^Y)$	0,844	0,803	0,487
5	$f(d_b, \text{tga}_b, Z^Y_b)$	0,626	0,660	0,643
6	$f(d_b)$	0,362	0,490	0,484
7	$f(\text{tga}_b)$	-0,550	-0,597	-0,444
8	$f(Z^Y_b)$	0,557	0,656	0,581
9	$f(Z^Y, Z^Y_b, N_m)$	0,860	0,825	0,600
10	$f(N_m)$	0,460	0,350	0,101

Анализ показал, что при графической интерпретации этих результатов для составов и свойств двух сталей (№2 и №13 в табл.1 и 2) во всех случаях имеют место значительные отклонения от общей закономерности (рис.1). В связи с невозможностью найти объяснение этим отклонениям на втором этапе анализа эти два состава были исключены из общей выборки. В результате точность обобщения данных о всех свойствах заметно выросла (табл.4 и рис.2). Более сложная ситуация возникает при анализе закономерностей изменения длительной прочности при 500⁰С по критерию σ_{DVM} .

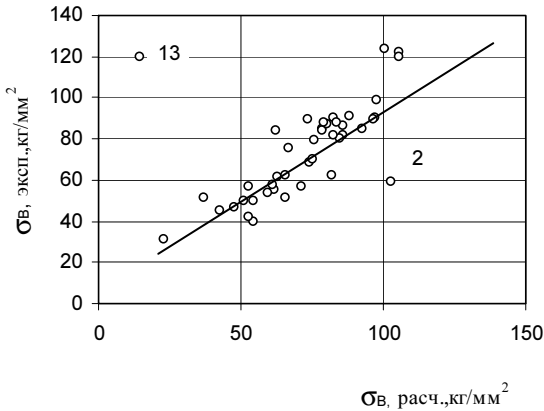


Рис.1. Соотношение между рассчитанными по модели №1 в табл.3 и экспериментальными значениями σ_b .

Опыт проведенных исследований позволяет предположить, что причиной такой ситуации является упрощенное однотипное толкование (по аддитивной схеме) роли разных модельных параметров и относительно низкая параметричность используемых моделей.

Типичная схема соотношений между расчетными и экспериментальными значениями этого параметра на рис.3 объясняет причину относи-

тельно низких коэффициентов корреляции в табл.5 при переборе вариантов моделирования этой ситуации.

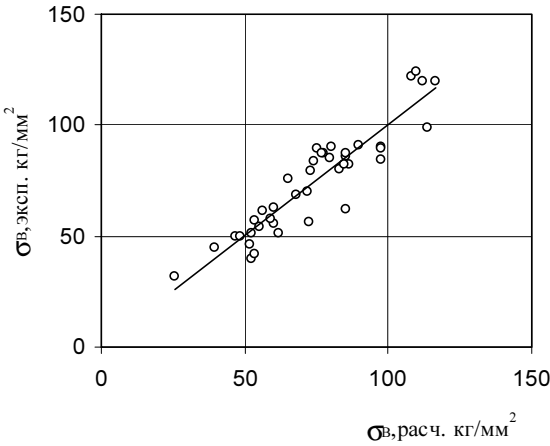


Рис.2. Соотношение между рассчитанными по уравнению (5) в табл.4 и экспериментальными значениями $\sigma_{в}$.

Таблица 4. Коэффициенты корреляции после исключения плавок №2 и №13

№ п/п	Модель	$\Sigma_{в}$	σ_{r}	σ_{DVM}
1	$f(d, \text{tg}\alpha, Z^Y)$	0,917	0,895	0,680
2	$f(Z^Y)$	0,905	0,880	0,590
3	$f(d_0, \text{tg}\alpha_0, Z^Y_0)$	0,630	0,634	0,683
4	$f(Z^Y_0)$	0,560	0,660	0,604
5	$f(Z^Y, Z^Y_0, N_m)$	0,925	0,890	0,652
6	$f(N_m)$	0,560	0,470	0,168
7	$f(d_0, Z^Y_0, N_0)$	0,926	0,886	0,690
8	$f(N_0)$	0,910	0,886	0,570
9	$f(d_m, Z^Y_m, \text{tg}\alpha_m, N_m)$	0,720	0,730	0,416
10	$f(N_m)$	0,560	0,562	0,168

Обработка по той же схеме информации о прочности при 500°C гладких образцов в течение 0,1 часа, 1000, 10000 часов показала (табл. 5), что наибольшая точность в описании опытных данных обеспечивается при использовании тех же сочетаний модельных параметров, что и при анализе результатов кратковременных испытаний.

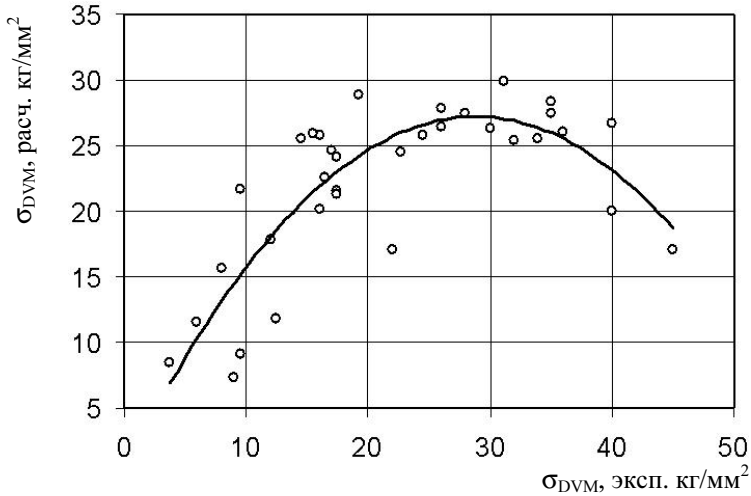


Рис.3. Соотношение между рассчитанными по уравнению (5) в табл.4 и экспериментальными значениями.

Таблица 5. Коэффициенты корреляции между свойствами и модельными параметрами

№ п/п	Модель	Прочность, кг/мм ² , за время, ч		
		0,1	1000	10000
1	$f(d, \text{tg}\alpha, Z^Y)$	0,805	0,722	0,684
2	$f(d)$	-0,407	-0,291	-0,308
3	$f(\text{tg}\alpha)$	-0,478	-0,604	-0,608
4	$f(Z^Y)$	0,796	0,691	0,656
5	$f(d_0, \text{tg}\alpha_0, Z_0^Y)$	0,716	0,722	0,730
6	$f(d_0)$	0,577	0,569	0,546
7	$f(\text{tg}\alpha_0)$	-0,639	-0,678	-0,686
8	$f(Z_0^Y)$	0,706	0,715	0,710
9	$f(Z^Y, Z_0^Y, N_m)$	0,807	0,807	0,769
10	$f(N_m)$	0,400	0,190	0,208

Соответствующие модели для $\sigma_{дл}$ при $\tau=0,1$ ч имеют вид:

$$\sigma_{дл0,1} = 377,1Z^Y + 88,56d + 14291\text{tg}\alpha \quad 1917,4 \quad (1)$$

$$\sigma_{дл0,1} = 46,55Z_0^Y \quad 12,2d_0 + 102,72\text{tg}\alpha_0 \quad 27,37 \quad (2)$$

$$\sigma_{дл0,1} = 265,27Z^Y + 9,12Z_0^Y \quad 79,1N_m \quad 291,1 \quad (3)$$

Для прочности при $\tau=1000$ ч получено для разных комбинаций параметров:

$$\sigma_{\text{дп}1000} = 210,8Z^Y + 161,1d + 279,2\text{tga} \quad 443,04 \quad (4)$$

$$\sigma_{\text{дп}1000} = 26,83Z_o^Y + 8,528d_o + 302,3\text{tga}_o + 18,64 \quad (5)$$

$$\sigma_{\text{дп}1000} = 174,6Z^Y + 14,1Z_o^Y + 292,9N_m + 204,83 \quad (6)$$

Результаты определения длительной прочности при 10000 ч описываются уравнениями:

$$\sigma_{\text{дп}10000} = 115,96Z^Y + 53,92d + 8455\text{tga} + 469,1 \quad (7)$$

$$\sigma_{\text{дп}10000} = 19,28Z_o^Y + 10,398d_o + 412\text{tga}_o + 39,85 \quad (8)$$

$$\sigma_{\text{дп}10000} = 108,34Z^Y + 13,1Z_o^Y + 181,3N_m + 344,0 \quad (9)$$

Как следует из графических результатов представления этих расчетов (рис.4,5), диапазон колеблемости численных значений существенен и не одинаков для разных моделей. Это хорошо иллюстрирует рис.6, на котором сопоставлены результаты расчетов $\sigma_{\text{дп}1000}$ по уравнениям (4)–(6). Усреднение экспериментальных и расчетных значений $\sigma_{\text{дп}}$ по интервалам одинаковой протяженности свидетельствует (рис.7) о закономерном монотонном изменении соотношения между сопоставляемыми величинами.

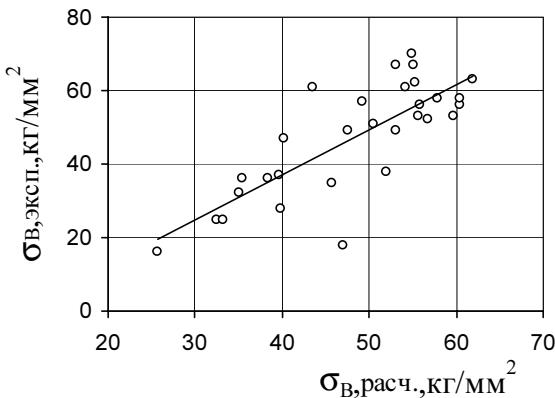


Рис.4. Соотношение экспериментальных и расчетных значений σ_B при $\tau=0,1$ ч.

Сопоставление коэффициентов уравнений (1)–(12) показывает что все они изменяются закономерно с увеличением τ . Так, например, свободные члены

аналогичных по структуре уравнений изменяются в последовательности :

- 1) $-1917,4; -443; +469;$
- 2) $-27,37; 18,64; +39,85$ и
- 3) $-291; -204; -334.$

Такая же картина наблюдается практически для остальных численных значений коэффициентов уравнений.

В приведенной ниже таблице 6 сопоставлены погрешности прогнозов по основным моделям (№1, №5, №9) из таблицы 5.

Отсюда следует, что предпочтение при расчетах следует отдавать модели №9, в которой комплексно используются характеристики разных подсистем состава.

Рис.5. Соотношение экспериментальных и рассчитанных по уравнению

$$\sigma_B = f(Z^Y, Z_o^Y, N_m)$$

значений σ_B при $\tau=1000$ ч.

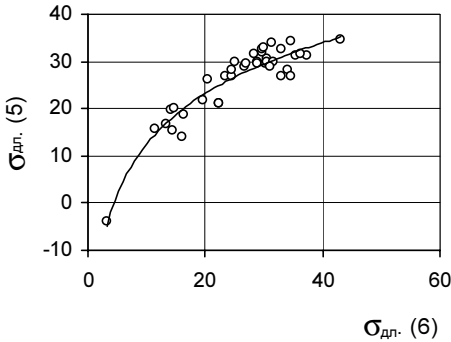
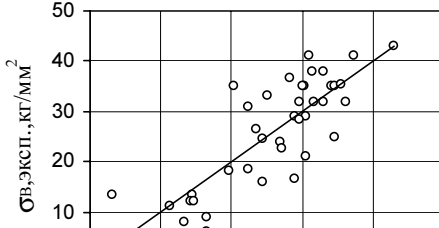


Рис.6. Сопоставление расчета $\sigma_{\text{дл.}}$ по уравнению (5) и (6) для $\tau=1000$ ч.

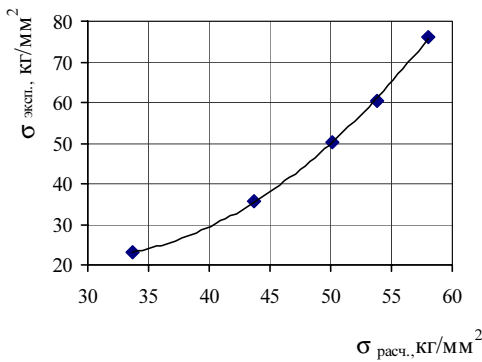


Рис.7. соотношение усредненных экспериментальных и рассчитанных как

$\sigma = f(d, \text{tg}\alpha, Z^Y)$ значений длительной прочности для $\tau=0,1$.

Таблица 6. Коэффициенты корреляции между погрешностями моделей для длительной прочности

№ п/п	Модели в таблице 5	Длительная прочность за		
		0,1 ч	1000 ч	10000 ч
1	2 5	0,740	0,780	0,820
2	1 9	0,936	0,890	0,870
3	5 9	0,800	0,853	0,884

Результаты исследования.

Анализ экспериментальных данных работы [3] о длительной прочности сталей из таблицы 6 при разной длительности испытаний (0,1ч; 1000 ч; 10000 ч) выявил ряд несколько необычных закономерностей. Эта необычность связана с тем, что статистическая обработка экспериментальной информации о $\sigma_{дл}$ с помощью модельных параметров изначально направлена на линейную интерпретацию исследуемых зависимостей. Этим в значительной мере объясняется относительно невысокий уровень коэффициентов корреляции в табл.1 при использовании наиболее эффективных сочетаний модельных параметров. Типичную картину точности подобных сопоставлений иллюстрирует рис.1. Те же результаты смотрятся совсем по-другому после усреднения расчетных и экспериментальных результатов по отдельным интервалам. Данные рис.2–5 наглядно подтверждают целесообразность разбиения диапазона изменения экспериментальных значений $\sigma_{дл}$ на равномерные интервалы. В результате четко проявляется (особенно при длительности испытаний 1000 и 10000 ч) нелинейный характер изменения длительной прочности. Следовательно, появились основания полагать, что стали, у которых сочетания критериев в моделях №5 и №9 обеспечивают расчетные значения $\sigma_{дл}$ более 30 (для модели №5– рис.3) или более 22 – (для модели №9 – рис.5), будут и на практике наиболее долговечными.

Дальнейший выбор оптимального состава стали предполагает разработку метода решения обратной задачи: по сочетанию модельных параметров определить наиболее эффективный легирующий комплекс. Для решения этой задачи целесообразно предварительно выявить диапазон концентраций, при котором то или иное значение $\sigma_{дл}$ максимально.

В отличие от классических статистических подходов к разработке описательных моделей такого типа, ориентированных на использование информации о изначальных свойствах атомов и концентрации каждого компонента, в разработанной методике анализа используются данные о характеристиках межатомного взаимодействия. При расчете этих характеристик комплексно учитываются и концентрации компонентов и их изначальные свойства.

1. *В.В. Кривенюк.* Прогнозирование ползучести и длительной прочности металлических материалов на сроки службы до 300000 ч и более. // Проблемы прочности. – 2003. – №4. – С.104–120.
2. *З. Шинн, В. Руттман.* Некоторые предварительные выводы из длительных испытаний стали. // Исследование жаропрочных сталей и сплавов. – Металлургиздат. – 1960. – С.177–193.
3. *А. Тум, К. Рихард.* Испытание весьма большой длительности (100000 ч) при 500⁰С серии сталей разного состава. // Исследование жаропрочных сталей и сплавов. – Металлургиздат. – 1960. – С.194–227.

Статья рекомендована к печати д.т.н., проф. Тогобицкой Д.Н.