

УДК 539.43

В. С. МУХИН, А. М. ЩИПАЧЕВ

## О СВЯЗИ ЭНЕРГИИ АКТИВАЦИИ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ С ТЕХНОЛОГИЕЙ ОБРАБОТКИ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

Исследованы закономерности изменения энергии активации усталостного разрушения при повышенных температурах на примере жаропрочных сплавов ХН70ТЮР и ХН51ВМТЮКФР. Приводится обоснование температурно-ресурсных зон эксплуатации с точки зрения термодинамического подхода к прочности. Энергия активации; усталостное разрушение; температурно-ресурсные зоны

### ВВЕДЕНИЕ

Исследование закономерностей усталостного разрушения при повышенных температурах с точки зрения термодинамического подхода к прочности и разрушению [1, 2] представляет определенный интерес в связи с тем, что ранее он применялся лишь к области нормальных температур. В настоящей работе была предпринята попытка распространить указанный подход на область высоких температур и выявить при этом закономерности изменения энергии активации, являющейся важнейшей характеристикой прочности и долговечности. Это позволит создать надежные методы прогнозирования характеристик усталостной прочности и долговечности на основе термодинамического подхода.

Энергия активации  $U$  может быть найдена методом итераций из формулы для определения усталостной долговечности [2]

$$t_* = t_0 \exp \frac{U}{RT}, \quad (1)$$

где

$$t_0 = C/U, \quad (2)$$

$$C = hN_0 (u_{e*} - u_{e0})/RT. \quad (3)$$

Зависимость энергии активации от напряжений и температуры испытаний была предложена в виде [2]

$$U = U_0 - \Delta U(T) - \gamma(\sigma_m + M_R \sigma_a)^2, \quad (4)$$

где  $\gamma$  – комплексный коэффициент, учитывающий структуру материала и определяемый по формуле

$$\gamma = \left( \frac{\alpha}{2\nu} - \frac{\beta}{9} \right) K_{ш}, \quad (5)$$

где  $\alpha, \beta, \nu$  – структурные параметры прочности;  $K_{ш}$  – коэффициент, учитывающий шероховатость поверхности;  $\sigma_a$  – амплитуда напряжений;  $\sigma_T$  – среднее напряжение цикла;  $M_R$  – коэффициент эквивалентности нестационарных напряженных состояний;  $\Delta U(T)$  – изменение энергии активации в зависимости от температуры;  $U_0$  – энергия активации при отсутствии внешних напряжений и комнатной температуре.

### 1. ЗАДАЧИ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Задачами настоящей работы являлось подтверждение экспериментальными данными зависимостей (4), (5), установление закономерностей изменения энергии активации усталостной прочности в зависимости от температуры, напряжений, упрочнения для двух марок жаропрочных сплавов и определение входящих в уравнения (4), (5) параметров, в частности определение параметров интерполяционных уравнений зависимости  $\Delta U(T)$ . Исследования проводились на примере двух жаропрочных сплавов ХН70ТЮР и ХН51ВМТЮКФР.

Были определены прочностные и пластические свойства указанных сплавов при растяжении со скоростью  $V_d = 2,5$  мм/мин (скорость деформации  $\dot{\epsilon} = 0,071$  мин<sup>-1</sup>) в диапазоне температур от 20 до 950°C. В табл. 1 приводятся предел прочности  $\sigma_B$ , предел текучести  $\sigma_T$ , относительное сужение  $\psi$ , коэффициент объемной упругости  $K$ . На основе этих данных были рассчитаны истинное сопротивление сдвигу  $S_{0*}$ , начальная плотность скрытой энергии  $u_{e0}$ , коэффициент перенапряжений на межатомных связях  $k_{\sigma}$ , структурные

Результаты испытаний сплавов ХН70ТЮР и ХН51ВМТЮКФР на статический разрыв

Таблица 1

Параметры	ХН70ТЮР				ХН51ВМТЮКФР						
	электрополирование, исходное состояние				электрополирование, исходное состояние				наклеп растяжением		
Температура, °С	20	400	650	800	20	750	850	950	750	850	950
$\sigma_B$ , МПа	1073	1010	850	500	1105	945	895	440	955	899	450
$\sigma_T$ , МПа	724	670	615	420	820	775	750	330	915	865	412
$\psi$ , %	11,7	21	17	31	13	10,2	10,5	14	10,2	10,5	14
$K \cdot 10^5$	1,733	1,583	1,425	1,097	1,817	1,558	1,583	1,317	1,558	1,583	1,317
$S_{0*}$ , МПа	1261	1278	1043	678	1314	1097	1042	528	1108	1046	539
$u_{e0} \cdot 10^4$	2,364	1,971	2,492	2,759	2,797	3,585	3,724	2,810	4,894	4,909	4,188
$k_\sigma$	144	142	174	269	139	166	174	345	164	174	337
$\alpha \cdot 10^{-2}$	4,511	4,391	6,589	1,564	4,160	5,969	6,620	2,581	5,845	6,561	2,467
$\beta \cdot 10^{-2}$	6,012	6,406	1,068	3,295	5,290	8,849	9,658	4,528	8,664	9,572	4,329
$\nu$	0,573	0,524	0,589	0,620	0,624	0,707	0,720	0,626	0,826	0,827	0,764
$\gamma \cdot 10^{-2}$	3,263	3,479	4,406	8,957	2,745	3,241	3,523	1,560	2,578	2,904	11,34

параметры  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\nu$  и структурный параметр  $\gamma$  по формулам [2] (см. табл. 1).

Проводились усталостные испытания на машине П-391 при чистом изгибе с вращением с частотой циклов 50 Гц в диапазоне температур 400... 800°С для сплава ХН70ТЮР и от 750 до 950°С для сплава ХН51ВМТЮКФР. Условия испытаний соответствовали требованиям ГОСТ 2860-65. Были получены кривые усталости для образцов, прошедших различные виды обработки, в частности электрополирование (ЭП). Параметры линейных регрессионных уравнений в координатах  $\lg N - \sigma_a$  для сплава ХН51ВМТЮКФР приведены в табл. 2.

При расчете энергии активации  $U$  значения усталостных долговечностей  $t_*$  при различных  $\sigma_a$  определялись по эмпирическим уравнениям табл. 2. Наличие таких экспе-

риментальных данных позволило рассчитать энергию активации при различных значениях напряжения и температуры испытаний.

## 2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 1 и 2 изображены зависимости энергии активации от амплитуды напряжений при трех уровнях температуры соответственно для сплавов ХН70ТЮР и ХН51ВМТЮКФР.

Возможны линейная и квадратичная интерполяции полученных зависимостей  $U$  от  $\sigma_a$ . В обоих случаях экспериментальные точки хорошо укладываются на интерполяционные линии и коэффициенты корреляции близки к единице. В соответствии с теоретическими представлениями [1, 2] и зависимостью (4) была произведена квадратичная ин-

Параметры регрессионных уравнений по результатам высокотемпературных усталостных испытаний

Таблица 2

Сплав	Вид обработки	T, °С	$\lg N = -A\sigma_a + B$		$U = -C\sigma_a^2 + D$	
			A	B	C	D
ХН70ТЮР	Электрополирование	400	0,01182	11,70	0,17029	273546,4
		650	0,01133	11,53	0,22373	379797,1
		800	0,01277	12,14	0,33026	424541
	Электрополирование	750	0,03711	20,334	1,11295	528947
850		0,03335	18,105	1,10427	549021,1	
950		0,0482	19,495	2,12651	606743,5	
ХН51ВМТЮКФР	Сквозной наклеп	750	0,03335	19,274	0,9898	522993,3
		850	0,02256	14,798	0,78775	525532,9
	950	0,02427	13,126	1,06243	534101,2	

терполяция. Соответствующие уравнения регрессии приведены в табл. 2.

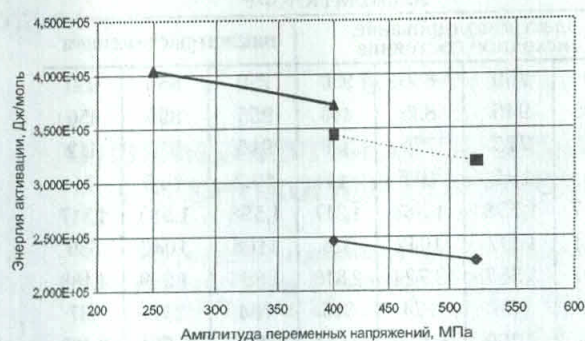


Рис. 1. Зависимость энергии активации от амплитуды переменных напряжений (жаропрочный сплав ХН70ТЮР) при температуре: — — 800; ..... — 650; — — 400 °C

Как видно из рис. 1 и 2, с увеличением  $\sigma_a$  энергия активации уменьшается, что согласуется с теоретическими представлениями [1]: энергетический барьер в направлении  $\sigma_a$  понижается, а в противоположном направлении — повышается. На рис. 2 также видно, что при температуре 750 °C большей энергией активации обладают упрочненные образцы по сравнению с электрополированными во всем рассматриваемом диапазоне напряжений, поскольку соответствующие линии практически параллельны. При температуре 850 °C и напряжениях выше 280 МПа большей энергией активации обладают упрочненные образцы, а при напряжениях ниже 280 МПа большей энергией активации обладают электрополированные образцы — это видно из расположения соответствующих линий и их точки пересечения, соответствующей  $\sigma_a = 280$  МПа. При температуре 950 °C и напряжениях выше 260 МПа большей энергией активации обладают упрочненные образцы, а ниже 260 МПа — электрополированные, что также можно видеть из расположения соответствующих линий диаграммы. Известно, что энергия активации  $U$  с энергетических позиций определяет прочность и долговечность тела при нагружении, в частности усталостном. Чем выше  $U$ , тем выше эти характеристики. С другой стороны, очевидно, что, чем больше величина переменных напряжений  $\sigma_a$ , тем меньше долговечность, или ресурс, детали.

Таким образом, используя термодинамический подход к прочности [1, 2], мы приходим к подтверждению наличия температурно-ресурсных зон работоспособности сплавов [3]. Подтверждено, что влияние упрочнения на долговечность материала зависит

от длительности и температуры испытания. В первой зоне условия эксплуатации определяют возможность эффективного использования методов упрочняющей технологии (при большом ресурсе — достаточно низкая температура и при высокой температуре — малый ресурс). Во второй зоне для обеспечения наибольшей прочности необходимо применять деформационное упрочнение (поверхностное или сквозное) оптимальной величины. В третьей зоне при любых сочетаниях температуры и ресурса условия эксплуатации таковы, что максимальной долговечностью будут обладать образцы и детали, металл которых не претерпевал пластической деформации (электрополированные).

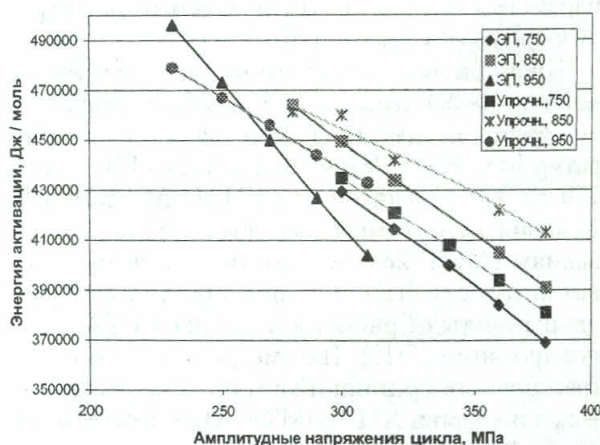


Рис. 2. Зависимость энергии активации от амплитуды переменных напряжений (жаропрочный сплав ХН51ВМТЮКФР)

На рис. 3 и 4 для сплава ХН51ВМТЮКФР изображены зависимости энергии активации от температуры для девяти уровней переменных напряжений соответственно для электрополированных образцов (металл в исходном состоянии) и для образцов, имеющих сквозной наклеп растяжением, степень наклепа  $\delta = 2,5\%$ . На этих рисунках видно, что зависимость энергии активации от температуры может быть представлена квадратичной интерполяцией и что она имеет максимум. Причем для сплава ХН51ВМТЮКФР после электрополирования максимум находится в зоне температур 820 ... 830 °C, а после сквозного наклепа смещается в зону 850 ... 860 °C.

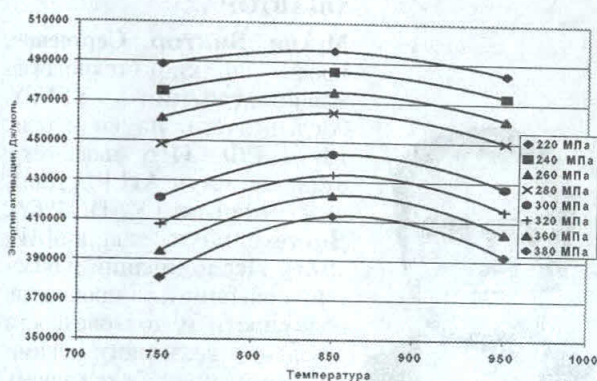


Рис. 3. Зависимость энергии активации от температуры при различных значениях  $\sigma_a$  (жаропрочный сплав ХН51ВМТЮКФР, электрополирование)

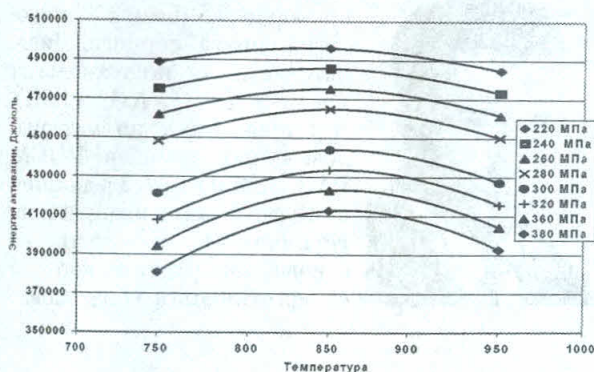


Рис. 4. Зависимость энергии активации от температуры при различных значениях  $\sigma_a$  (жаропрочный сплав ХН51ВМТЮКФР, сквозной наклеп растяжением)

Максимум на кривой изменения усталостной прочности в зависимости от температуры был установлен также и другими исследователями [4–6] и объясняется эффектом упрочнения вследствие деформационного старения. При этом существование такого максимума для сталей связывают, в первую очередь, с различным влиянием температуры на подвижность атомов внедрения. При температуре, которой соответствует максимум усталостной прочности, диффузионная подвижность атомов внедрения такова, что они блокируют дислокации, способствуя тем самым повышению усталостной прочности. Можно предположить, что для жаропрочных никелевых сплавов, как и для сталей, появление максимума усталостной прочности также определяется механизмом деформационного старения.

Такое положение граничной температуры, разделяющей области с преимущественным атермическим и термическим активируемыми процессами усталостного разрушения, можно объяснить [7,8] довольно быстрым

ростом выделений  $\gamma'$ -фазы при нагреве выше  $0,6T_{пл}$  (что для исследуемых сплавов составляет 800 ... 850°C). Выделение  $\gamma'$ -фазы является основной упрочняющей фазой для дисперсионнотвердеющих сплавов на никелевой основе.

Как следует из внешнего вида зависимостей, изображенных на рис. 3 и 4, их следует выражать полиномом второй степени

$$\Delta U(T) = \xi T^2 + \psi T + \lambda, \quad (6)$$

где  $\xi$ ,  $\psi$ ,  $\lambda$  — эмпирические коэффициенты.

Параметры уравнений (6) были определены по интерполяционной формуле Ньютона для сплава ХН51ВМТЮКФР при напряжениях  $\sigma_a = 300$  МПа. Для электрополированных образцов уравнение (6) имеет вид

$$\Delta U(T) = -1,1956T^2 + 2614T - 993537,$$

а для образцов после сквозного наклепа растяжением:

$$\Delta U(T) = -1,7657T^2 + 3984,6T - 1793845.$$

## ВЫВОДЫ

По результатам высокотемпературных испытаний жаропрочных сплавов ХН70ТЮР и ХН51ВМТЮКФР на статический разрыв и многоцикловую усталость в широком диапазоне напряжений, температур и для двух структурных состояний (после электрополирования и сквозного наклепа растяжением), установлено следующее.

1. Доказана обратно пропорциональная зависимость энергии активации  $U$  от напряжений  $\sigma_a$ , которая может быть отображена регрессионными уравнениями как линейного, так и квадратичного видов при коэффициентах корреляции, близких к единице. Определены параметры соответствующих регрессионных уравнений (табл. 2).

2. Показано, что зависимость энергии активации  $U$  от температуры  $T$  может быть отображена полиномом второй степени (6). Для сплава ХН51ВМТЮКФР приводятся параметры уравнения (6), рассчитанные для электрополированных и упрочненных сквозным наклепом образцов.

3. Зависимость энергии активации от напряжений и температуры (4) соответствует опытным данным, при этом величину  $\Delta U(T)$  следует определять по уравнению (6).

4. На основании термодинамического подхода к прочности подтверждено наличие температурно-ресурсных зон эксплуатации сплавов.

5. Установленные закономерности позволяют расчетным путем на основе зависимостей типа (1)–(3) производить оценку усталостной долговечности образцов и деталей, а также решать ряд других прикладных задач.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Федоров В. В.** Кинетика повреждаемости и разрушения твердых тел. Ташкент: Фан, 1985. 168 с.
2. **Щипачев А. М.** Термодинамическая теория прочности: прогнозирование многоциклового усталости. Уфа: УТИС, 1998. 108 с.
3. **Мухин В. С.** Технологические методы обеспечения качества поверхности деталей. Уфа: УАИ, 1981. 74 с.
4. **Ищенко И. И., Погребняк А. Д., Синайский Б. Н.** Влияние высоких температур на сопротивление усталости жаропрочных сталей и сплавов. Киев: Наукова думка, 1979. 176 с.
5. **Екобори Т.** Физика и механика разрушения твердых тел. М.: Металлургия, 1971. 264 с.
6. **Кеннеди А. Дж.** Ползучесть и усталость в металлах. М.: Металлургия, 1965. 312 с.
7. **Бокштейн С. З.** Строение и свойства металлических сплавов. М.: Металлургия, 1971. 496 с.
8. **Симс Ч., Хагель В.** Жаропрочные сплавы. М.: Металлургия, 1976. 568 с.

#### ОБ АВТОРАХ

**Мухин Виктор Сергеевич**, проф., зав. каф. технологии машиностроения УГАТУ. Засл. деятель науки и техн. РБ и РФ. И. о. акад.-секр. отд. техн. наук АН РБ. Дипл. инж.-механик (УАИ, 1962). Д-р техн. наук (защ. в МАИ, 1975). Исследования в области повышения прочности, надежности и долговечности деталей технологическими методами; разработки новых технологий.



**Щипачев Андрей Михайлович**, проф., зав. каф. сервиса бытовых машин и приборов Уфимск. технолог. ин-та сервиса. Дипл. инж.-механик по технологии машиностроения (УАИ, 1981). Д-р техн. наук по материаловедению (защ. в ИПСМ РАН, 2000). Исследования в области прогнозирования усталостной прочности на основе энергетического и синергетического подходов.

