

УДК 539.4.013.3:669

В.В. Мыльников, М.В. Мыльникова, Е.А. Чернышов, Д.И. Шетулов, Е.С. Беляев

**АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ
СТАЛЕЙ И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ В ЗАВИСИМОСТИ
ОТ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ НА ИХ ПОВЕРХНОСТИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрено влияние частоты изменяющихся циклов нагружения на структуру, прочность и долговечность конструкционных материалов в зависимости от физических процессов протекающих на их поверхности. Показано, что торможение дислокаций у препятствий в плоскостях скольжения осуществляется тем эффективнее, чем ниже энергия дефекта упаковки, следовательно, тем больше материал способен к деформационному упрочнению и сопротивление среды прохождению физического процесса пластической деформации становится выше. Приведён сравнительный анализ изменения показателей сопротивления усталости сталей и титановых сплавов. Установлено, что у сталей увеличение частоты циклов нагружения приводит к заметному уменьшению наклона левой ветви кривой усталости, т.е. к улучшению сопротивления усталости в отличие от титановых сплавов, показывающих обратную зависимость.

Ключевые слова: частота циклов нагружения, сопротивление усталости, повреждаемость поверхности, пластическая деформация, энергия дефекта упаковки.

Многочисленные исследования по усталости металлов и сплавов не дают достаточной информации о природе и кинетике развития усталостного разрешения. В настоящее время не удается предвидеть всех сложных физических явлений, происходящих в материале деталей машин и конструкций. На прочность и долговечность металлов влияет большое количество факторов, одним из которых является частота циклического нагружения (ω). Существенным является изучение вопроса изменения прочности и долговечности металлов под влиянием фактора частоты циклов нагружения. Влияние частоты циклов нагружения (ω) неразрывно связано с поверхностными эффектами, происходящими в образцах (деталях), связь которых с показателями сопротивления усталости материалов является сложной.

Анализ опубликованных в научной литературе исследований как российских, так и зарубежных авторов, о влиянии частоты циклического нагружения на прочность и долговечность деталей машин и конструкций не дает исчерпывающей информации. Существует мнение, что изменение частоты не оказывает значительного влияния на сопротивление усталости материалов, хотя признается некоторая тенденция к увеличению сопротивления усталости материалов при увеличении частоты нагружения [1-3]. Недостаточность фундаментальных знаний о факторе частоты циклов объясняется в первую очередь сложностью физических процессов [3-5], происходящих в поверхностном слое металлов, и длительностью эксперимента.

Представляет интерес выявление закономерностей влияния частоты циклического нагружения на прочность и долговечность конструкционных материалов в зависимости от физических процессов протекающих на их поверхности.

В связи с этим, требуется более детальное изучение этого вопроса, поскольку при циклическом нагружении речь идёт о пластической деформации в поверхностных слоях.

Достаточно сложные явления, протекающие в поверхностных слоях образцов (деталей) при изменении частоты циклического нагружения, можно соотнести с представлением о суммарной деформации ϵ_{ω} , которая накапливается при усталостных испытаниях в поверхностных слоях. Она связывается с количеством циклов N и определяется углом наклона левой ветви кривой усталости α_{ω} . Эта связь в первом приближении может быть представлена как изменение суммарного накопления усталостных дефектов или повреждений решётки dZ :

$$dZ = dZ_1 - dZ_2, \quad (1)$$

где dZ_1 – увеличение плотности (количества) дефектов вследствие накопления суммарной деформации ε_ω ; dZ_2 – уменьшение плотности дефектов вследствие релаксации.

При этом вносится определённое допущение, связанное с тем, что релаксация напряжений не всегда связана с уменьшением концентрации дефектов. Например, в случае повторяющихся актов поперечного скольжения, возникающие в полосах скольжения интрузии приводит к увеличению вероятности разрушения тем в большей степени, чем больше энергия дефекта упаковки (γ) [6].

Конечное выражение этой зависимости представляется в виде соотношения

$$Z = Z^* (\varepsilon_\omega / \varepsilon_\omega^*)^{\beta - \alpha / \omega}, \quad (2)$$

связывающего суммарное повреждение Z с величиной суммарной деформации ε_ω и частотой циклов (ω), где $Z^* = Z$, а $\varepsilon_\omega^* = \varepsilon_\omega$ для одного цикла напряжения; β – зависит от рода вещества; α – видимо, должна возрастать с температурой, но уменьшаться с увеличением энергии дефекта упаковки.

Если считать, что между ε_ω и числом циклов до разрушения существует прямая пропорциональность, то, когда для достаточно низких гомологических температур (θ) отношение α/ω стремится к нулю, продолжительность испытаний определяется числом циклов. Напротив, при достаточно высоких θ величина Z обуславливается как ε_ω (или N), так и частотой ω , то есть с увеличением температуры величина накопленных напряжений, а следовательно, и продолжительность испытаний всё больше определяется не числом циклов, а временем, причём Z оказывается тем больше (время до разрушения тем меньше), чем больше частота циклов. Из уравнения (2) следует, что

$$\lg \varepsilon_\omega = \frac{\lg \frac{z}{z^*} + \left(\beta - \frac{\alpha}{\omega} \right) \lg \varepsilon_\omega^*}{\beta - \frac{\alpha}{\omega}}, \quad (3)$$

то есть увеличение частоты приводит в общем к снижению ε_ω (или N).

Однако при исследовании вопроса о влиянии частоты циклов на повреждаемость поверхности следует учитывать еще ряд обстоятельств. На «чистое» влияние ω , накладывается влияние ряда других факторов, например: природы материала, температуры и т.д. Следует рассматривать способность материала накапливать суммарную пластическую деформацию с увеличением числа циклов в зависимости от ряда обстоятельств [7]. Если материал неспособен накапливать достаточно большую суммарную деформацию ε_ω по причине своей природы, или из-за условий деформирования, или по той и другой причине одновременно, то даже при большой частоте ω , когда сопротивление деформации должно быть большим и упругие должны превалировать над разупрочнением, мы можем получить обратный эффект.

За характеристику материала можно принять энергию дефекта упаковки (γ). Энергия дефекта упаковки γ определяет сопротивление среды прохождению физического процесса пластической деформации. Торможение дислокаций у препятствий в плоскостях скольжения осуществляется тем эффективнее, чем ниже энергия γ . Чем ниже γ , тем больше материал способен к деформационному упрочнению, сопротивление среды прохождению физического процесса пластической деформации становится выше. Узкая дислокация имеет более высокую энергию дефекта упаковки – γ и движется в плоскости скольжения свободней, чем широкая дислокация с низкой γ . Узкая дислокация также более свободно совершает поперечное скольжение.

Следовательно, чем выше энергия дефекта упаковки, тем более превалируют эффекты разупрочнения над эффектами упрочнения и тем меньшее сопротивление оказывает среда прохождению физического процесса пластической деформации, путем скольжения расщепленных дислокации.

Таким образом, величина энергии дефекта упаковки определяет интенсивность поперечного скольжения, которое приводит к накоплению усталостных повреждений в полосах скольжения. Затем при остаточном разрыхлении полосы и при её соприкосновении с границей зерна в границе образуется надрыв, как следствие сдвига; и чем больше полос, тем больше надрывов и тем интенсивнее развитие трещины по границе. Последнее обстоятельство снижает параметры сопротивления усталости материала в виде увеличения наклона кривой усталости, приводящего к уменьшению количества циклов до разрушения.

В работе [6] параметр, определяющий сопротивление среды прохождению физического процесса пластической деформации, параметр упрочнения материала при скольжении расщепленных дислокации обозначен как K_{Ay} . Таким образом, $K_{Ay\gamma_1} > K_{Ay\gamma_2}$ при $\gamma_1 < \gamma_2$.

В условиях эксплуатации оборудования поверхностные слои материала деталей машин и элементов конструкций подвергнуты влиянию ряда факторов. Эти факторы влияют на параметр K_{Ay} . Помимо влияния энергии дефекта упаковки как характеристики природы материала, на параметр K_{Ay} оказывает влияние фактор частоты циклического нагружения. Изменение частоты циклов приводит к изменению скорости деформации поверхностных слоев, а это, как известно, приводит к изменению сопротивления деформации материала, т.е. оказывает прямое влияние на параметр K_{Ay} [8]. Поэтому скоростной эффект выражается при условии $\omega_2 > \omega_1$, когда напряжение σ_{ω_2} , всегда больше σ_{ω_1} , за исключением случаев, относящихся к деформационному старению. Причём скоростной эффект выражен тем сильнее, чем выше гомологическая температура испытания (θ).

Из всего изложенного следует, что частота циклов (ω) влияет на физические процессы, происходящие в поверхностном слое с аномальными свойствами конструкционных материалов и на показатели сопротивления усталости неоднозначно.

За показатели сопротивления усталости приняты: наклон левой ветви кривой усталости в координатах $\lg \sigma - \lg N$ ($\text{tg} \alpha_w$) и повреждаемость поверхности (Φ) [9-13].

Наклон $\text{tg} \alpha_w$ чутко реагирует на интенсивность процесса усталости, проходящего в конструкционном материале. В то же время параметр $\text{tg} \alpha_w$ коррелирует с образованием полос скольжения, возникающих на поверхности Φ материала при циклических нагрузках.

Воздействие нагрузки приводит к изменению структуры поверхностного слоя, что выражается в появлении так называемых полос скольжения, как уже упоминалось, по их количеству и форме, количеству зерен микроструктуры, поврежденных или затронутых полосами скольжения, ряду других количественных характеристик структуры материала можно судить о развитии физических процессов усталости в конструкционном материале. Характеристика Φ позволяет использовать её в качестве критерия для оценок прочности и долговечности материалов с момента изготовления детали.

Уравнения кривых усталости и характеристики высокопрочных сплавов полученные в работе [14] показаны в табл. 1. Сталь 30ХГСН2А показывает увеличение сопротивления усталости с ростом частоты циклов (ω) приложения нагрузки [15]. В табл. 1 при одинаковых пределах прочности это хорошо заметно. При самой высокой частоте ($\omega=50$ Гц) получается очень низкий наклон кривой усталости ($\text{tg} \alpha_w = 0,08723$) (табл.1), предел прочности при этом тоже выше, чем в предыдущих случаях. Однако следует иметь в виду, однозначной связи между пределом прочности и сопротивлением усталости нет.

Сталь Х15Н5Д2Т (ВНС-2) показывает результаты, аналогичные результатам стали 30ХГСН2А (табл.1).

Сплавы ОТ-4 и ОТ-4-1 показывают обратную картину, в сравнении с Х15Н5Д2Т и 30ХГСН2А, то есть с увеличением частоты циклического нагружения сопротивление усталости ухудшается, наклон, $\text{tg} \alpha_w$ растёт (табл. 1).

Анализ экспериментальных данных позволил получить численные значения различных параметров, связанных с изменением частоты циклов нагружения. Эти данные представ-

лены в табл. 2. Величины напряжений $\sigma_{N=10^6}$ в некоторых случаях условные, т.е. они получены путем продолжения левой ветви кривой усталости до пересечения с ординатой долговечности $N=10^6$ циклов. Есть такие случаи, когда излом кривой усталости соответствует долговечности $N < 10^6$ циклов, в этом случае показано два числа (табл. 2, №8).

Таблица 1

Уравнение кривых усталости и характеристики сплавов

Сплав	Уравнение кривых усталости	Температура испытаний, °С	Частота циклов, Гц	Предел прочности, МПа
30ХГСН2А	$\lg\sigma = 4,0779 - 0,3010 \lg N$	20	0,17	1800
	$\lg\sigma = 3,9821 - 0,3010 \lg N$		0,17	1280
	$\lg\sigma = 3,9239 - 0,2552 \lg N$		40,00	1800
	$\lg\sigma = 3,7682 - 0,2466 \lg N$		40,00	1280
	$\lg\sigma = 3,3432 - 0,08723 \lg N$		50,00	1500
Х15Н5Д2Т (ВНС-2)	$\lg\sigma = 3,8171 - 0,2430 \lg N$	20	25,0	1250
	$\lg\sigma = 3,4353 - 0,1358 \lg N$		46,7	1250
ОТ-4	$\lg\sigma = 3,8699 - 0,2684 \lg N$	20	25,0	792
	$\lg\sigma = 3,5154 - 0,2041 \lg N$		4,7	792
ОТ-4-1	$\lg\sigma = 3,5866 - 0,2219 \lg N$	20	37,0	722
	$\lg\sigma = 3,2607 - 0,1461 \lg N$		1,00	722

Таблица 2

Параметры сопротивления усталости в связи с изменением частоты циклического нагружения и пределом прочности материала

№ п/п	Материал	Частота циклов, ω , Гц	Показатель сопротивления усталости, $\text{tg}\alpha_w$	Напряжение, соответствующее долговечности $N = 10^6$ циклов, МПа	Предел прочности, σ_b , МПа	Отношение $\chi = \frac{\sigma_{N=10^6}}{\sigma_b}$
1	2	3	4	5	6	7
1	Сталь 30ХГСН2А	0,17	0,3010	275	1800	0,153
2	Сталь 30ХГСН2А	0,17	0,3010	235	1280	0,180
3	Сталь 30ХГСН2А	40,0	0,2552	265	1800	0,147
4	Сталь 30ХГСН2А	40,0	0,2466	200	1280	0,156
5	Сталь 30ХГСН2А	50,0	0,08723	635	1500	0,420
6	Сталь Х15Н5Д2Т	0,2	0,3521	115	1400	0,082

Окончание табл. 2

7	Сталь X15H5Д2Т	25,0	0,2430	230	1400	0,164
8	Сталь X15H5Д2Т	46,7	0,1358	400	1400	0,286
				435*)		0,310*)
9	ОТ-4	25,0	0,2684	280	792	0,350
10	ОТ-4	4,7	0,2041	295	792	0,370
11	ОТ-4-1	37,0	0,2219	240	722	0,230
12	ОТ-4-1	1,0	0,1461	240	722	0,230

Примечание: * число в знаменателе получено путем условного пересечения левой ветви кривой усталости с ординатой долговечности $N = 10^6$ циклов.

Таким образом, в ряде случаев частота циклов нагружения (ω) оказывает существенное влияние на физические процессы, происходящие в поверхностном слое и на показатели сопротивления усталости. Установлено, что у сталей увеличение частоты циклов нагружения и, в дополнение к этому, смягчение схемы напряженного состояния приводит к заметному уменьшению параметра $\text{tg } \alpha_w$, т.е. к улучшению сопротивления усталости (а стало быть, и на предел усталости) в отличие от титановых сплавов (табл. 2). Улучшение параметра сопротивления усталости связано с повышением упрочняемости материала поверхностных слоев образцов (деталей), что снижает усталостную повреждаемость собственно поверхности. Титановые сплавы (табл. 2) с увеличением частоты циклического нагружения показывают противоположную картину, т.е. разупрочняются. Однако следует иметь в виду, что параметр $\text{tg } \alpha_w$ напрямую связан с повреждаемостью поверхности (Φ) и в обеих группах металлических сплавов рост показателя (Φ) приводит к увеличению $\text{tg } \alpha_w$ (рис. 1).

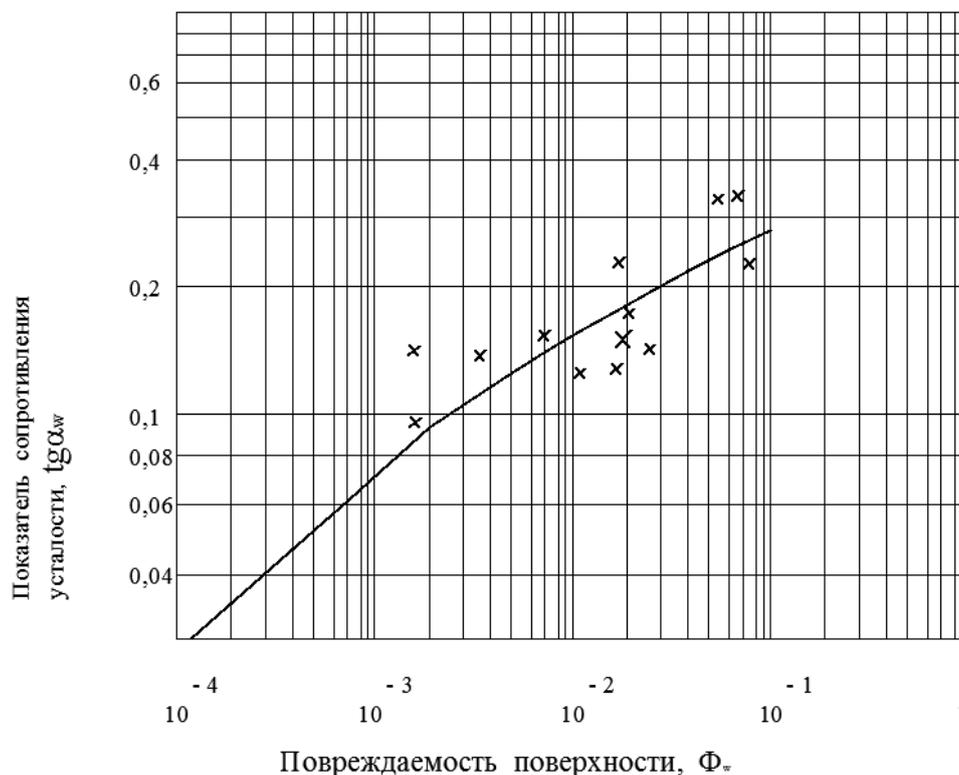


Рис. 1. Зависимость показателя сопротивления усталости ($\text{tg } \alpha_w$) от повреждаемости поверхности (Φ) ряда конструкционных материалов

Библиографический список

1. Механика разрушения и прочность материалов: справ. пособ. / под ред. В.В. Панасюка. Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / О.Н. Романив [и др.]. – Киев: Наукова думка, 1990. Т. 4.
2. R.W.K. Honeycombe. The Plastic Deformation of Metals. London: Edward Arnold Ltd., 1984.
3. **Трошенко, В.Т.** Прочность металлов при переменных нагрузках / В.Т. Трошенко. – Киев: Наук. думка, 1978. – 176 с.
4. **Готтштайн, Г.** Физико-химические основы материаловедения: [пер. с англ.] / Г. Готтштайн; под ред. В.П. Зломанова. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – 400 с.
5. **Владимиров, В.И.** Физическая природа разрушения металлов / В.И. Владимиров. – М.: Металлургия, 1984. – 280 с.
6. **Мыльников, В. В.** Исследование повреждаемости поверхности чистых металлов с учетом частоты циклического нагружения / В. В. Мыльников, Д. И. Шетулов, Е. А. Чернышов // Известия вузов. Цветная металлургия. 2013. №2. С. 55-60.
7. **Мыльников, В.В.** Анализ влияния частоты циклов нагружения на суммарную пластическую деформацию металлических материалов / В.В. Мыльников, И.И. Рожков, А.И. Пронин // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2013. № 10-2. С. 228–229.
8. **Мыльников, В.В.** Температурно-скоростные зависимости сопротивления деформации некоторых чистых металлов / В.В. Мыльников, Д.И. Шетулов, Е.А. Чернышов // Литейные процессы. 2012. № 11. С. 124–132.
9. **Шетулов, Д.И.** Усталостная повреждаемость высокопрочных сталей / Д.И. Шетулов, В.В. Мыльников // Металлы. 2014. № 2. С. 81-86.
10. **Шетулов, Д.И.** Связь сопротивления циклической нагрузке с повреждаемостью поверхности металлов // Изв. Академии Наук. Металлы. 1991. № 5. С. 160.
11. Mylnikov V.V., Shetulov D.I., Chernyshov E.A. Variation in factors of fatigue resistance for some pure metals as a function of the frequency of loading cycles // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2010. Т. 51. № 3. С. 237-242.
12. **Мыльников, В.В.** Зависимость сопротивления усталости конструкционных материалов от частоты циклического нагружения / В.В. Мыльников, Д.И. Шетулов, Е.А. Чернышов, А.И. Пронин // Технология металлов. 2013. № 9. С. 30–37.
13. **Мыльников, В.В.** О корреляции показателей сопротивления усталости стали 6ХС / В.В. Мыльников, Е.А. Чернышов, Д.И. Шетулов, А.И. Пронин // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2013. № 10-2. С. 227-228.
14. **Мыльников, В.В.** Влияние частоты циклического нагружения на сопротивление усталости высокопрочных конструкционных материалов / В.В. Мыльников, Е.А. Чернышов, Д.И. Шетулов // Заготовительные производства в машиностроении. 2009. №2. С. 33–36.
15. **Мыльников, В.В.** Связь параметра сопротивления усталости с повреждаемостью поверхности стали 30ХГСН2А // Сборник научных трудов Sworld. 2012. Т. 10. № 3. С. 56–61.

*Дата поступления
в редакцию 10.06.2014*

V.V. Mylnikov, M. V. Mylnikova, E.A.Chernyshov, D.I. Shetulov, E.S. Belyaev

**THE ANALYSIS OF CHANGE OF INDICATORS OF FATIGUE RESISTANCE
OF STEELS AND TITANIUM ALLOYS, DEPENDING ON PHYSICAL PROCESSES
OCCURRING ON THE SURFACE**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

The influence of frequency-changing cycles of loading on the structure, strength and durability of structural materials, depending on physical processes on their surface. It is shown that the inhibition of dislocations at obstacles in the slip planes is the better, the lower the stacking fault energy, therefore, the more material is able to deformation hardening and environment resistance to the passage of the physical process of plastic deformation becomes higher. The comparative analysis of the changes in the indices of fatigue resistance of steels and titanium alloys. It was established that steels the increase in the frequency of loading cycles leads to a noticeable decrease in the slope of the left branches of the curve, i.e. to improve the fatigue resistance unlike titanium alloys, showing an inverse relationship.

Key words: frequency of loading cycles, fatigue resistance, surface damaging, plastic deformation, stacking fault energy.