

Применение данных фотометрических исследований к оценке деградации усталостных свойств сплава АМгб*

В. А. Ермишкин^а, С. П. Кулагин^а, И. Н. Овчинников^б

^а Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН, Москва, Россия

^б Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Рассмотрен метод построения кривых усталости по данным фотометрического анализа рабочей поверхности трех-четырех плоских образцов, испытанных на усталость при консольном изгибе на примере алюминиевого сплава АМгб. До и после испытаний обе рабочие поверхности каждого образца сканируются и по полученным данным оценивается долговечность их фрагментов при известных амплитудах напряжений.

Ключевые слова: усталость, поврежденность, фотометрия, спектр, структура, анализ, поверхность, спектральная плотность.

Введение. Известно, что усталостные испытания конструкционных материалов – один из наиболее трудоемких и продолжительных видов механических испытаний. Для построения достаточно представительной кривой усталости на базе 10^7 цикл требуется испытать 15–50 образцов в течение не менее 5000–5500 ч. Существенно сократить время испытаний можно только при использовании нескольких установок для усталостных испытаний. С другой стороны, сопротивление материалов усталостному разрушению является их важной характеристикой, так как переменные нагрузки имеют место при эксплуатации большинства машин и инженерных сооружений. Между тем теории усталостного разрушения металлов и сплавов, учитывающей весь объем существующей информации по их поведению при циклическом нагружении и являющейся основой для инженерных расчетов на прочность, до настоящего времени еще не создано [1]. Предпринимаемые попытки анализа усталостного разрушения на базе подходов механики разрушения [2] были не очень успешными, поскольку при анализе условий зарождения усталостных трещин и подрастания их до критических размеров они оказываются неприменимыми на практике. Исходя из этого необходимо дальнейшее накопление данных усталостных испытаний. Принимая во внимание вышеизложенное, следует отметить актуальность разработки методов усталостных испытаний, что позволило бы резко сократить их объем без снижения информативности и достоверности с одновременным уменьшением их стоимости. Именно таким является метод ускоренных испытаний на усталость, основанный на использовании информации о структурной эволюции материала под действием циклических нагрузок. Подход к оценке усталостной поврежденности материалов, развиваемый совместно ИМЕТ РАН и МГТУ им. Н. Э. Баумана, базируется на применении фотометрической диагностики структурной поврежденности поверхности образцов, испытанных на усталость по схеме консольного изгиба с жестким закреплением головки образца по типу заделки.

Материалы и методики исследования. Объектом исследования служили плоские образцы лопаточного типа из алюминиевого сплава АМгб, химический состав которого приведен в табл. 1.

Использовали образцы длиной $l = 149$ мм, шириной $b = 10$ мм и толщиной $\delta = 1$ мм. Испытания проводили на электродинамических вибростолах в режиме

* Доклад на Международной научно-технической конференции “Усталость и термоусталость материалов и элементов конструкций” (Киев, 2013).

резонансного возбуждения колебаний образцов при частотах, близких к частоте первой гармоники их собственных колебаний. Параметры режима испытания образцов и их результаты приведены в табл. 2. Предварительно рабочие поверхности образца разбиваются на равновеликие фрагменты и сканируются. На рис. 1 показан пример разбиения изображения образца в компьютере на отдельные фрагменты.

Т а б л и ц а 1

Химический состав, мас.%, сплава АМгб

Mg	Mn	Ti	Be	Al	Fe	Si	Zn	Cu	Прочие
					Не более				
<u>5,8...6,8</u> 7,22	<u>0,5...0,8</u> 0,905	<u>5,8...6,8</u> 0,05	<u>0,0001...0,005</u> —	Основа Основа	<u>0,40</u> 0,43	<u>0,40</u> 0,76	<u>0,20</u> 0,21	<u>0,100</u> 0,285	<u>0,1</u> —

Примечание. Над чертой приведены справочные данные сплава [3], под чертой – данные измерения на рентгеновском микроанализаторе.

Т а б л и ц а 2

Параметры режима испытаний на усталость образцов сплава АМгб и их результаты

№ образца	Амплитуда колебаний образца, мм	Частота колебаний, Гц	Долговечность, мин	Число циклов до разрушения
1	37,0	36,2	104,50	226974
2	32,5	36,2	890,22	1933688
9	32,5	36,2	266,78	579446
8	37,0	36,6	108,58	238442
10	30,0	36,6	2452,00	5384592
11	25,0	36,6	14941,00	32810436

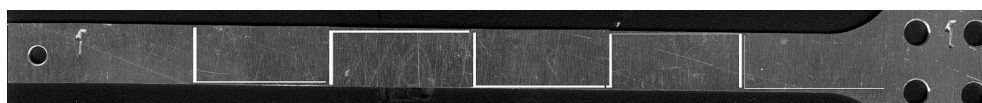


Рис. 1. Схема процесса выделения фрагментов поверхности образца для исследования методом ФАСИ.

Видно, что рабочая поверхность образца разбита на шесть фрагментов размером 20×10×1 мм. Учитывая, что образец имеет две рабочие поверхности, информация, получаемая при испытании каждого из них эквивалентна испытанию 12 образцов по стандартной методике. В действительности число образцов меньше, так как фрагменты поверхности в хвостовой части испытываются при амплитудах напряжений, которые ниже предела выносливости, и поэтому не используются для расчета кривой усталости.

Информация об исходном структурном состоянии образцов вводится в компьютер в цифровом коде, где она анализируется с помощью фотометрического анализатора структурных изображений (ФАСИ), разработанного в ИМЕТ РАН [4, 5]. После разрушения образца его поверхности вновь сканируются и сравнивается состояние каждого фрагмента до и после усталостного испытания. На рис. 2 показан типичный

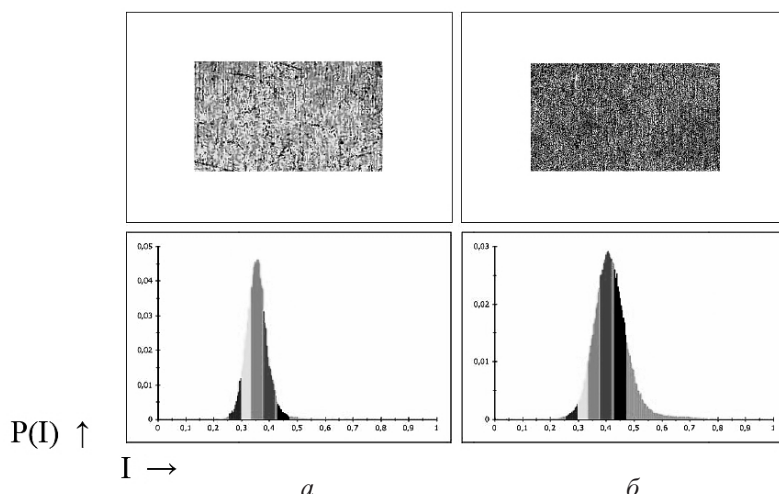


Рис. 2. Данные анализа фрагмента 1 образца № 1 сплава АМг6 методом ФАСИ до (а) и после (б) испытаний на усталость.

пример обработки результатов анализа изменений в структуре поверхности исследуемого фрагмента образца сплава АМг6, обусловленных действием циклических нагрузок, методом ФАСИ. В верхней части рис. 2,а показана структура исследуемого фрагмента образца до его испытания на усталость, в нижней – спектр яркости отражения видимого света от него. На рис. 2,б приведено изображение структуры того же фрагмента и спектр яркости отражения после усталостного разрушения образца. Эти данные позволяют определить структурную поврежденность каждого фрагмента испытанных образцов. Спектр яркости отражения видимого света строится в координатах яркость отражения света I – соответствующая спектральная плотность при этом значении яркости отражения $P(I)$. По оси абсцисс откладываются значения яркости отражения, измеренные в условных единицах шкалы, в которой за ноль принято абсолютное поглощение видимого света, а за единицу – полное его отражение от поверхности фрагмента, по оси ординат – соответствующие значения спектральной плотности яркости отражения $P(I)$, которая определена как отношение числа пикселей, имеющих среднюю яркость отражения I ($N(I)$), к общему числу пикселей, на которое разбивается изображение фрагмента N :

$$P(I) = \frac{N(I)}{N}. \tag{1}$$

Для расчета кривой усталости необходимо определить зависимость структурной поврежденности D_s от амплитуды действующих напряжений и рассчитать критическое число циклов, способное разрушить образец при уровнях напряжений, не приводивших к разрушению в условиях данного эксперимента. Такой расчет можно выполнить из условия, что поврежденность по Майнеру [6] равна структурной поврежденности по данным ФАСИ, т.е. из формулы

$$\frac{N_i}{N_{ir}} = \frac{p_i(t_r) - p_i(0)}{p_{\max}(t_r) - p_{\max}(0)}, \tag{2}$$

где N_{ir} – число циклов до разрушения i -го фрагмента образца; N_i – число циклов, которое простоял i -й фрагмент при амплитуде напряжений σ_i ; $p_i(t_r)$ – параметр

спектра яркости отражения от i -го фрагмента образца после его разрушения; $p_i(0)$ – параметр спектра яркости отражения от i -го фрагмента образца до начала испытаний; $p_{\max}(t_r)$ – параметр спектра яркости отражения фрагмента образца, в котором произошло разрушение; $p_{\max}(0)$ – параметр спектра яркости отражения фрагмента образца, в котором произошло разрушение до начала испытаний. Выполнение равенства (2) было подтверждено экспериментальными данными, полученными на стали 08КП [5].

Полагаем, что средняя величина амплитуды напряжений σ_i в i -м фрагменте равна напряжению, действующему в его центральном сечении. Тогда сопоставляя напряжение σ_i с соответствующим значением структурной поврежденности

$$D_{si} = \frac{p_i(t_r) - p_i(0)}{p_{\max}(t_r) - p_{\max}(0)}, \quad (3)$$

получаем два массива данных $\{\sigma_i\}$ и $\{D_{si}\}$, которых достаточно, чтобы построить градуировочный график $D_s = f(\sigma)$, необходимый для расчета кривой усталости.

Результаты экспериментов и их обсуждение. Уровень действующих в образце напряжений был получен из решения задачи о распределении напряжений в консолю закрепленной балке, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой инерционного происхождения q . Измерения прогибов балки на ее свободном конце позволяют вычислить значения этой нагрузки, если известно уравнение упругой изогнутой линии для балки, нагруженной и закрепленной по заданной схеме. Для решения подобных задач существуют стандартные методы, которые подробно изложены в [6]. В данной работе расчеты уравнения упругой линии балки и распределения действующих амплитуд напряжений в направлении ее продольной оси z для статического случая были выполнены по этим методам. Полученное решение для распределения прогибов по длине балки $y = f(z)$, нагруженной и закрепленной по схеме, реализованной в данной серии испытаний, описывается формулой

$$y(z) = \frac{q}{EJ_x} \left(\frac{lz^3}{6} - \frac{z^4}{24} \right), \quad (4)$$

где E – модуль Юнга материала балки; J_x – момент инерции сечения балки относительно горизонтальной оси сечения; l – длина образца.

Интенсивность распределенной инерционной нагрузки q определяли по формуле

$$q = \frac{yEJ_x}{\left(\frac{lz^3}{6} - \frac{z^4}{24} \right)} \quad (5)$$

после подстановки в нее $z = l$.

На рис. 3 показано распределение упругих прогибов по длине образца, вычисленных по формуле (4).

Амплитуды напряжений в центральных сечениях исследуемых фрагментов вычисляли по формулам [7]

$$\sigma = \frac{M(z)}{W_x}, \quad (6)$$

$M(z)$, W_x – изгибающий момент в рассматриваемом сечении и момент сопротивления поперечного сечения образца, определяемые для данной схемы нагружения плоских образцов по формулам

$$M(z) = \frac{q}{2}(l^2 - z^2), \quad W_x = \frac{bh^2}{2}. \quad (7)$$

На рис. 4 приведено распределение амплитуд напряжений по длине образцов при испытании на усталость.

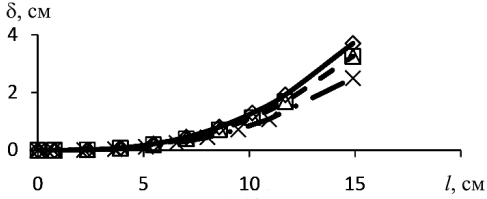


Рис. 3

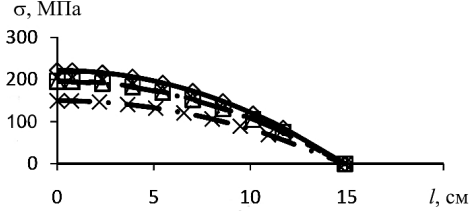


Рис. 4

Рис. 3. Распределение упругих прогибов по длине образца в процессе испытаний на усталость. (Здесь и на рис. 4: \diamond , \square , \triangle , \times – образцы № 1, 2, 9, 11 соответственно.)

Рис. 4. Распределение амплитуд напряжений по длине образца при испытаниях на усталость.

Аппроксимированная градуировочная кривая, связывающая структурную поврежденность исследуемого материала с величиной действующих напряжений, была построена по данным испытания первых трех образцов, обработанных по методу наименьших квадратов [8] (рис. 5).

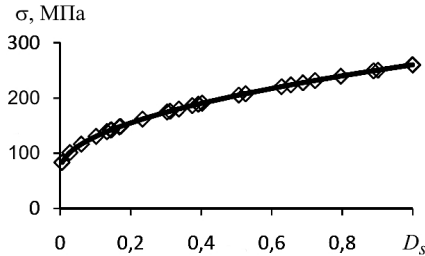


Рис. 5. Аппроксимированная зависимость $D_s = f(\sigma)$ для сплава АМг6.

Из тождества (4) следует формула для оценки расчетного значения критического числа циклов, при котором может произойти усталостное разрушение образца при амплитудах напряжений N_{ir} , для которых отсутствуют экспериментальные данные по долговечности образцов. С помощью графика на рис. 5 можно построить кривую усталости, которую аналитически можно записать в таком виде:

$$N_{ir} = N_r \frac{D_{s \max}}{D_{si}}, \quad (8)$$

где N_r – число циклов, вызвавших разрушение анализируемого образца, для всех других фрагментов выполняется равенство $N_i = N_r$; $D_{s \max}$ – структурная поврежденность фрагмента, в котором произошло разрушение образца; D_{si} – структурная поврежденность фрагментов образца, для которых необходимо вычислить расчетные значения числа циклов, при которых могло бы произойти разрушение при амплитуде напряжений σ_i .

Как показали проведенные исследования, наиболее надежные оценки D_{si} получены в случае если в качестве параметра $p_i(I)$ используются значения площадей под

спектральными кривыми яркости отражения видимого света, т.е. $S_i = \int_{l_0}^{l_c} D_s(I)dl$, и значения спектральной плотности яркости отражения в тех интервалах, в которых ее абсолютные значения достаточно большие. С учетом того что плоский образец лопаточного типа с длиной рабочей части 140 мм разбивается на восемь–десять фрагментов, а каждый образец имеет по две рабочие поверхности, объем компьютерного анализа даже одного образца очень велик, что дает объем информации, обеспечивающей получение 20–40 расчетных точек для построения кривой усталости. Это способствует повышению надежности полученных результатов и резко сокращению материальных затрат, рабочего времени и парка испытательных машин при экспериментальных исследованиях. При исследовании одного образца методом ФАСИ необходимо проанализировать 34 фрагмента, и при выполнении полной программы анализа получали 20–30 расчетных точек.

На рис. 6 сплошная линия построена по данным испытания трех первых образцов, которые были аппроксимированы уравнением [9]

$$\sigma = 170,66 + \frac{25608,1}{\sqrt{N_r}} \tag{9}$$

Результаты последующих усталостных испытаний исследуемых материалов после ФАСИ позволяют вносить в зависимость $D_s = f(\sigma)$ новые уточнения и тем самым повышать достоверность прогноза усталостных кривых. На аппроксимированную расчетную кривую (рис. 6) нанесены экспериментальные точки, полученные методом ФАСИ на шести испытанных образцах. Данные испытаний были статистически обработаны по методу наименьших квадратов, чтобы найти новые значения параметров аппроксимации уравнения (9).

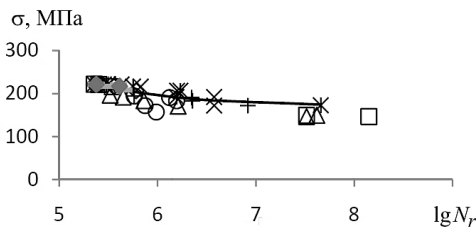


Рис. 6

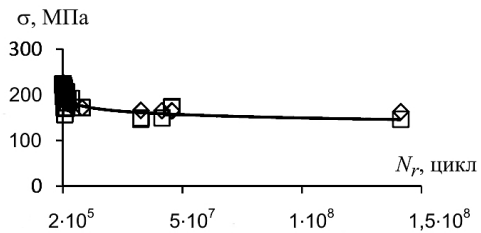


Рис. 7

Рис. 6. Кривая усталости сплава АМг6, построенная по данным испытания методом ФАСИ трех образцов (□).

Рис. 7. Уточненная кривая усталости сплава АМг6, построенная по данным испытания методом ФАСИ шести образцов.

Всю совокупность экспериментальных данных (56 точек – на рис. 7 точки (◇)) описывает уравнение

$$\sigma = 160,5 + \frac{31312,4}{\sqrt{N_r}} \tag{10}$$

График на рис. 7 соответствует тенденции изменения всех данных и описывается формулой

$$\sigma = 10,5 \ln(N_r) + 342,88 \tag{11}$$

Заклучение. Разработан метод построения градуировочной кривой, связывающей усталостную поврежденность с уровнем амплитуд действующих напряжений ($D_s = f(\sigma)$). Градуировочная зависимость $D_s = f(\sigma)$ для исследованного конструкционного материала в заданном структурном состоянии позволяет построить кривую усталости и описать ее аналитически.

Резюме

Розглянуто метод побудови кривих утоми за даними фотометричного аналізу робочої поверхні трьох-чотирьох плоских зразків при випробуваннях на втому при консольному згині на прикладі алюмінієвого сплаву АМг6. До і після випробувань обидві робочі поверхні кожного зразка скануються і за отриманими даними оцінюється довговічність їх фрагментів при відомій амплітудній напрузі.

1. *Macherauch E.* Strukturmechanische Grundlagen der Werkstoffermüdung // *Z. Werkstofftechnik.* – 1977. – 8. – S. 213 – 224.
2. *Hertzberg R. W.* Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials. – New York: Wiley, 1983. – 704 p.
3. *Справочник по авиационным материалам /* Под ред. А. Т. Туманова. – М.: Машиностроение, 1965. – 455 с.
4. *Ермишкин В. А., Мурат Д. П., Подбельский В. В.* Информационные технологии фотометрического анализа усталостной повреждаемости материалов // *Информ. технологии.* – 2007. – № 11. – С. 65 – 70.
5. *Ермишкин В. А., Мурат Д. П., Подбельский В. В.* Система фотометрического анализа структурных изображений и ее применение для исследования материалов в условиях усталости // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика.* – 2008. – № 10. – С. 38 – 44.
6. *Miner M. A.* Cumulative damage in fatigue // *J. Appl. Mech.* – 1945. – 12, No. 9. – P. 159 – 164.
7. *Феодосьев В. И.* Соппротивление материалов. – М.: Из-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. – 589 с.
8. *Демидович Б. П., Барон И. А., Шувалова Э. З.* Численные методы анализа. – М.: Наука, 1967. – 368 с.
9. *Новиков И. И., Ермишкин В. А.* Физическая механика реальных материалов. – М.: Наука, 2004. – 323 с.

Поступила 14. 11. 2013