

С. Е. БЕЛЬСКИЙ (Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь), И. П. ВОЛЧОК, А. А. МИТЯЕВ (ЗНТУ, Запорожье)

МЕТОДИКА УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ НА ВЫНОСЛИВОСТЬ

Було розглянуто методи тестування витривалості алюмінієвих сплавів на високих частотах від 0,3 до 44,0 кГц.

Ключові слова: прискорені випробування на витривалість, алюмінієві сплави

Были рассмотрены методы тестирования выносливости алюминиевых сплавов на высоких частотах от 0,3 до 44,0 кГц.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, ускоренные испытания на выносливость

The methods of endurance testing of aluminum alloys at high frequencies from 0.3 to 44.0 kHz are considered.

Keywords: rapid endurance tests, aluminum alloys

Введение

Многочисленные детали транспортных машин, энергетических установок, летательных аппаратов и других конструкций в процессе эксплуатации подвергаются как статическому воздействию, так и циклическим напряжениям широкого амплитудно-частотного диапазона.

Установлено, что 70...90 % аварий связано с усталостными разрушениями деталей, обусловленными процессом накопления в материале повреждений под действием переменных напряжений (деформаций). Поэтому создание высоконадежных конструкций, работающих при различных эксплуатационных температурах в условиях вибрационных нагрузок, требует как разработки и внедрения новых материалов, так и использования в прочностных расчетах уточненных характеристик усталости.

Суть проблемы

Традиционные методы испытаний на выносливость обычно проводятся при частотах нагружения 50...100 Гц на машинах типа МУИ-6000, МВП-10000 и др. Однако известные низкочастотные методы усталостных испытаний требуют значительных материальных и временных затрат. Особенно это проявляется при необходимости учета дополнительных факторов, таких как температура, свойства материалов, вид напряженного состояния моделей и т.д., которые существенно усложняют физическую картину протекания процессов усталостного разрушения.

С целью снижения трудоемкости и значительного сокращения времени проведения усталостных испытаний, особенно при больших базах, весьма перспективным является использование высоких частот механических колебаний, позволяющих за приемлемый промежуток

времени обеспечить наработку значительного числа циклов. Однако широкое внедрение в практику такого метода испытаний, в связи с отличием характеристик усталости, получаемых при высоких и низких частотах, требует установления научно-обоснованных корреляционных зависимостей между параметрами выносливости и целым рядом структурно-чувствительных характеристик большой номенклатуры металлов и сплавов при различных амплитудно-частотных, временных и температурных режимах испытаний.

Результаты исследований и их обсуждение

При проведении испытаний на многоцикловую усталость для металлов и сплавов, ординаты кривых усталости которых по всей длине непрерывно уменьшаются с ростом числа циклов (т.е. для материалов с базой испытаний определения пределов выносливости по ГОСТ 25.502 в $100 \cdot 10^6$ циклов), оценка снижения трудозатрат с использованием высокочастотного нагружения может быть проведена следующим образом. Приняв за максимально возможную частоту нагружения из диапазона от 10 до 300 Гц, где она не регламентируется (для обычных атмосферных условий и в отсутствии изменения механических свойств и разогрева рабочей части образцов выше 50 °С по ГОСТ 25.502) 300 Гц, при условии непрерывности нагружения до достижения заданной базы испытаний одним образцом, получим время безостановочной работы испытательной машины 92,6 часов ($100 \cdot 10^6 / 300 \cdot 60 \cdot 60$) или 3,85 суток. В то же время использование высокочастотного нагружения с частотой, например 18 кГц, при которой большинство легких сплавов имеет еще несущественный разогрев, особенно при использовании знакопеременного изгиба, позволяет достичь той же базы всего за 92 мину-

ты, или 1,5 часа ($100 \cdot 10^6 / 18000 \cdot 60 \cdot 60$) работы испытательного стенда. Особенно эффективно использование данного вида нагружения при проведении сравнительных испытаний (база для определения предела выносливости принимается $10 \cdot 10^6$ циклов).

В связи с этим разработка методов испытаний на усталость в широком диапазоне частот позволяет моделировать обширный спектр реальных условий эксплуатации деталей, прогнозировать сопротивление усталостному разрушению разных конструкционных материалов, а также значительно сократить время проведения исследований.

Использование высоких частот для проведения усталостных испытаний ограничивается отсутствием установок, позволяющих проводить нагружение моделей различными типами колебаний в широком диапазоне частот. В связи с этим в Белорусском государственном технологическом университете были разработаны и изготовлены испытательные стенды, позволяющие проводить испытания материалов на частотах 0,3; 2,8; 8,8; 18,0 и 44,0 кГц (рис. 1).

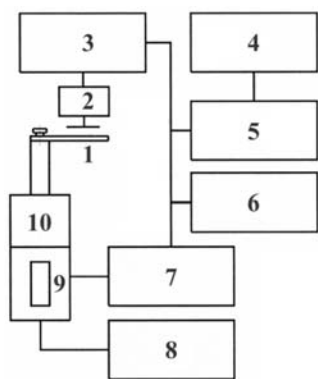


Рис. 1. Принципиальная схема высокочастотного испытательного стенда:

1 – образец; 2 – виброметр МРТИ; 3 – прибор стабилизации амплитуды ПСА; 4 – цифropечать Ф-30; 5 – частотомер ЧЗ-35; 6 – осциллограф С1-64; 7 – усилитель УПВ-5; 8 – блок подмагничивания; 9 – преобразователь; 10 – концентратор

Для проведения испытаний на высоких частотах использовались магнитострикционные стенды, работающие в автоколебательном режиме. Активными элементами этих установок, преобразующими электрические колебания в механические, служили магнитострикционные преобразователи. Механические колебания пакета возникают под воздействием переменного магнитного поля, возбуждаемого высокочастотными генераторами. Эффективная работа преобразователей обеспечивается оптимальным уровнем подмагничивания постоянным магнитным полем.

На сегодняшний день алюминиевые сплавы являются основным конструкционным материалом после сплавов на основе железа. Широкое использование обусловило накопление значительного количества отходов, переработкой которых активно занимаются во всех промышленно развитых странах.

Так как сфера потребления алюминиевых сплавов весьма широка, и они используются для изготовления деталей ответственного назначения, работающих в широком диапазоне частот и нагрузок, очень важно, чтобы вторичные сплавы, изготовленные путем рециклинга, имели свойства соответствующие уровню первичных.

В данной работе приведены результаты исследований вторичного сплава АК8МЗ (8,20 % Si; 2,65 % Cu; 0,98 % Fe; 0,87 % Zn) после термической обработки по режиму Т5 (закалка + искусственное старение) и полученного с использованием разных технологических схем.

Согласно заводской технологии плавление металла осуществляли под покровным флюсом 33 % KCl, 67 % NaCl с последующей обработкой рафинирующим флюсом: 15 % KCl, 45 % NaCl, 40 % AlF₃. По экспериментальной технологии сплав дополнительно был обработан таблетированным модификатором [1], в количестве 0,05 % от массы расплава.

ГОСТ 25.502-79 для легких сплавов и других металлов, ординаты кривых усталости которых по всей длине непрерывно уменьшаются с ростом числа циклов, устанавливает базу испытаний для определения пределов выносливости – $100 \cdot 10^6$ циклов. В тоже время для сравнительных испытаний база для определения пределов выносливости составляет $10 \cdot 10^6$ циклов [2]. Результаты экспериментов изображали в виде кривых усталости в полулогарифмических координатах $\sigma_a - \lg N$ (рис. 2).

Как показали результаты исследований, практически 80 % периода времени нагружения образцов характеризовались стабильной частотой колебаний. Стабильность резонансных характеристик системы в этот период свидетельствует о том, что в течение данного срока в материале происходит постепенное накопление искажений структуры и зарождение микротрещин, однако суммарное их влияние на усталостные характеристики еще невелико. В течение следующего, значительно более короткого промежутка времени, происходит активное развитие и слияние микротрещин в одну или несколько магистральных. По мере развития микро- и макроскопических трещин усталости

происходит изменение геометрических параметров, характеризующих поперечное сечение, что приводит к уменьшению площади неповрежденной части и момента сопротивления, а также снижению жесткости испытываемого образца. В результате этих явлений наблюдается резкое падение частоты колебаний, что свидетельствует о начале усталостного разрушения образца.

При сравнении усталостных характеристик вторичного сплава АК8МЗ, который был получен с использованием экспериментальной и заводской технологий, установили, что показатели циклической прочности экспериментального сплава были значительно более высокими во всем диапазоне исследованных частот (см. рис. 2). Так в диапазоне частот 0,3; 8,8; 18 и 44 кГц повышение предела выносливости составило 32...36, 28...40, 26...48 и 28...40 % соответственно. Одновременно с этим, долговечность (число циклов при заданном напряжении σ) экспериментального сплава возросла в 3,75...5 раз при частоте 0,3 кГц, в 4...7 раз при

частоте 8,8 кГц, а также в 5...15 и 8,6...15 раз на частотах 18 и 44 кГц соответственно. Объяснить это можно состоянием микроструктуры сплавов. Фазы, присутствующие в исследуемых сплавах, имели практически одинаковые значения параметров формы ($\lambda = 1...3$), однако в экспериментальном сплаве их дисперсность и равномерность распределения в матрице были значительно более высокими.

Как видно из экспериментальных данных для сплава АК8МЗ, полученного по заводской технологии, увеличение частоты не изменяет форму кривых усталости (см. рис. 2). Кривые усталости для разных частот располагаются эквидистантно с близкими углами наклона и отчетливо наблюдается увеличение усталостной долговечности с ростом частоты нагружения (рис. 3). При этом в диапазоне частот 0,3...18 кГц рост долговечности был особенно активным. Это повышение носило выраженный монотонный характер для широкого диапазона баз испытаний от $6 \cdot 10^5$ до $2 \cdot 10^8$ циклов (см. рис. 2 и рис. 3).

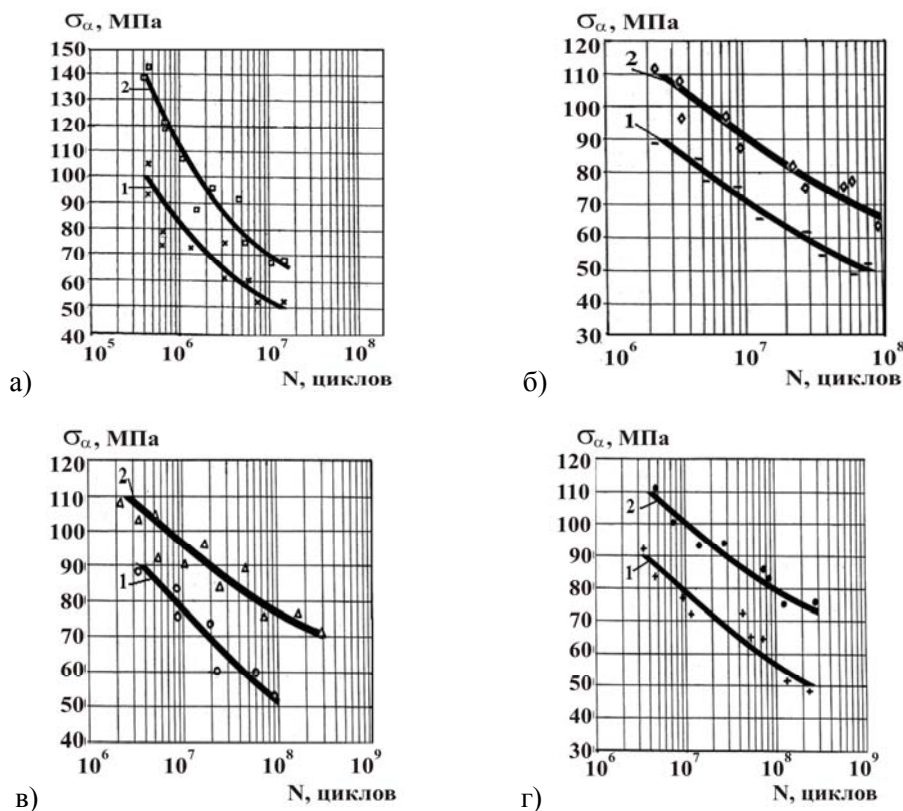


Рис. 2. Сравнительные усталостные характеристики вторичного сплава АК8МЗ при испытаниях на частотах 0,3 кГц (а), 8,8 кГц (б), 18 кГц (в) и 44 кГц (г): 1 – заводская технология производства; 2 – экспериментальная

Для экспериментального сплава кривые усталости наглядно демонстрируют повышение долговечности с увеличением частоты нагружения (см. рис. 3). С возрастанием частоты сокращается время нахождения образца под мак-

симальной нагрузкой. При этом степень упрочнения сплава АК8МЗ снижается, так как пластическая деформация всегда запаздывает относительно прикладываемых нагрузок и, поэтому, максимальное упрочнение, связанное с

процессами разрушения, наблюдали после значительно большего числа циклов. Уже после зарождения трещин в образцах, сопротивляемость материала определяется скоростью продвижения вершины трещины в теле образца. При повышении частоты и, следовательно, скорости нагружения, продолжительность локального деформационного воздействия в вершине трещины сокращается, что, в свою очередь, уменьшает деформированный объем, обеспечивающий продвижение трещины. Таким образом, повышается сопротивляемость разрушению и долговечность. Полученные результаты хорошо согласуются с данными исследований [3].

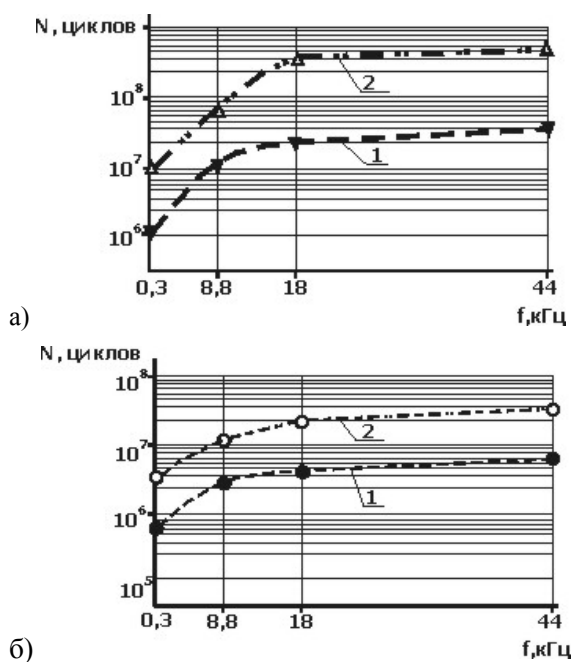


Рис. 3. Зависимость усталостной долговечности сплава АК8МЗ от частоты нагружения для уровня циклических напряжений 70 МПа (а) и 90 МПа (б): 1 – заводская технология; 2 – экспериментальная

Исследование поверхностей, по которым происходило распространение усталостных трещин (рис. 4), производили с использованием сканирующего микроскопа «JSM-5610LV» фирмы JEOL (Япония) на образцах обеих технологий выплавки, разрушенных при частотах нагружения 0,3 кГц и 18 кГц. При частоте 0,3 кГц ресурс долговечности сплава, полученного по заводской технологии, в среднем был в 4,5 раза ниже, чем у экспериментального. Микрофрактографическая картина свидетельствует о неравномерном продвижении трещины (см. рис. 4, а). Наличие большого количества гладких и ровных участков указывает на активное продвижение трещины по границам разде-

ла «матрица – интерметаллидное включение» или же по расщепленным интерметаллидным включениям. Это обусловлено тем, что интерметаллидные включения типа β (Al_3SiFe), W ($\text{Al}_3\text{Mg}_8\text{Si}_6\text{Cu}_2$), N ($\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$), S (Al_2CuMg), π ($\text{Al}_8\text{Si}_6\text{Mg}_3\text{Fe}$) и другие имеют неблагоприятное кристаллографическое соответствие с матрицей и обладают высокой хрупкостью, а также, имея достаточно большие размеры, способствуют продвижению трещины на значительные расстояния при малом количестве циклов. Наличие большого количества вторичных микротрещин (см. рис. 4, а, в) подтверждает факт высокой хрупкости включений и низкого запаса пластичности матрицы на границе контакта вследствие высокого уровня внутренних напряжений в этих зонах.

Фрактограмма поверхности распространения усталостной трещины в экспериментальном сплаве при частоте 0,3 кГц свидетельствовала о равномерном протекании процесса, который определялся более упорядоченной и тонкодифференцированной структурой, компактной формой интерметаллидных фаз с малым параметром формы и, как следствие, большим запасом пластичности матрицы, о чем можно судить по отсутствию вторичных микротрещин (см. рис. 4, б). При этом шаг продвижения трещины за каждый цикл нагружения был значительно более коротким (см. рис. 4, б). Микрофрактографические картины поверхностей образцов, разрушенных при частоте нагружения 18 кГц, показали, что в сплаве заводской выплавки расстояние между гребнями было значительно большим, что свидетельствовало о более высокой скорости продвижения усталостной трещины и определяло более низкую долговечность данного сплава (см. рис. 4, в). В то же время в экспериментальном металле скорость и расстояние продвижения трещины за цикл были существенно меньшими, а многочисленные равномерно распределенные включения компактной формы служили препятствиями на пути фронта трещины (см. рис. 4, г). Как следствие, долговечность экспериментального сплава при частоте нагружения 18 кГц в среднем была в 10 раз более высокой (см. рис. 2).

Сравнение фрактограмм разрушения сплава при разных частотах нагружения показало, что с увеличением частоты шаг усталостных бороздок, характеризующих расстояние, на которое продвигается усталостная трещина за цикл, сокращается (см. рис 4, б, г).

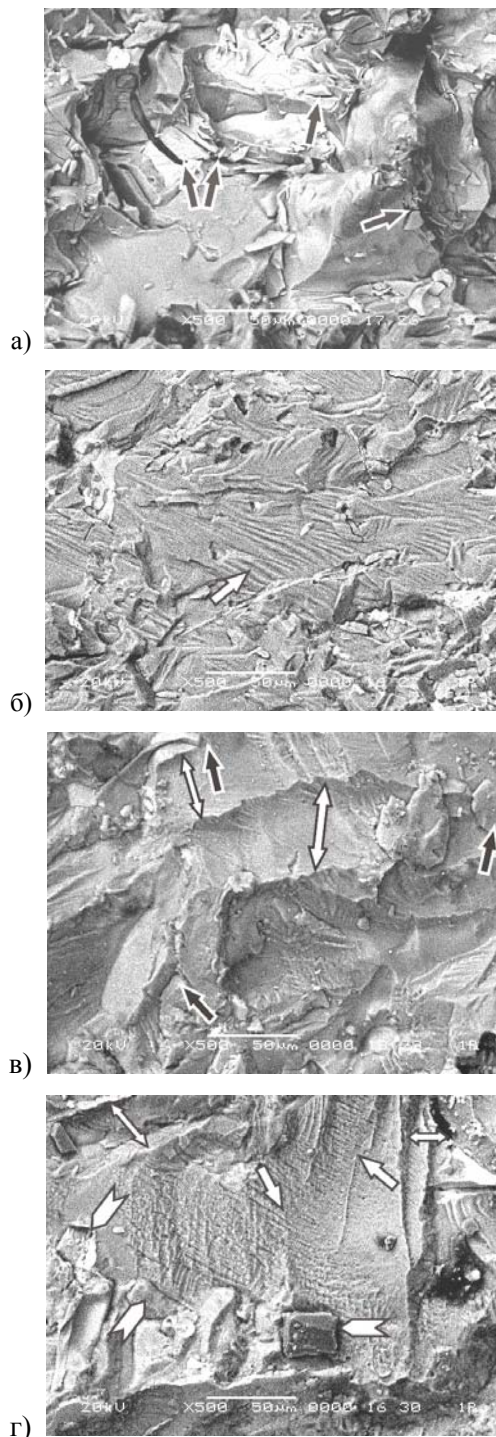


Рис. 4. Фрактограммы усталостного разрушения вторичного сплава АК8МЗ при частоте 0,3 кГц (а; б) и 18 кГц (в; г):

а, в – заводская технология; б, г – экспериментальная;
 ← – вторичные микротрещины; ⇐ – бороздки;
 ⇐ – включения; ⇐ – расстояние между гребнями

Более высокие показатели циклической прочности экспериментального сплава АК8МЗ определялись структурой и уровнем механических свойств. Заводская технология обеспечила предел прочности на уровне 117 МПа, относительное удлинение – 1,0 %, ударную вязкость – 50 кДж/м², в то время как у экспериментально-

го сплава: предел прочности – 170 МПа, относительное удлинение – 1,4 %, ударная вязкость – 62 кДж/м². Структура экспериментального сплава содержала более тонкодифференцированные и равномерно распределенные включения сильноразветвленных комплексных фаз в сравнении со структурой сплава, который был получен по заводской технологии. Также пористость экспериментального сплава соответствовала 1 баллу по ДСТУ 2839-94 (ГОСТ 1583-93), в то время как заводской сплав соответствовал 2 баллу.

Результаты исследований циклической прочности вторичного сплава АК8МЗ в зависимости от частоты нагружения сравнили с результатами испытаний на усталость сплава Д16 в отожженном состоянии (370 °С, 6 ч) (рис. 5), который нашел широкое применение в авиации и транспортном машиностроении при изготовлении ответственных элементов несущих конструкций и деталей обшивки. База сравнительных испытаний по определению пределов выносливости составила $10 \cdot 10^6$ циклов [2]. Сплав Д16 (3,85 % Cu; 1,6 % Mg; 0,72 % Mn; 0,5 % Fe; 0,33 % Si) обладал следующим уровнем механических свойств: $\sigma_b = 255$ МПа, $\sigma_T = 138$ МПа, $\delta = 6$ %, $\psi = 34$ %.

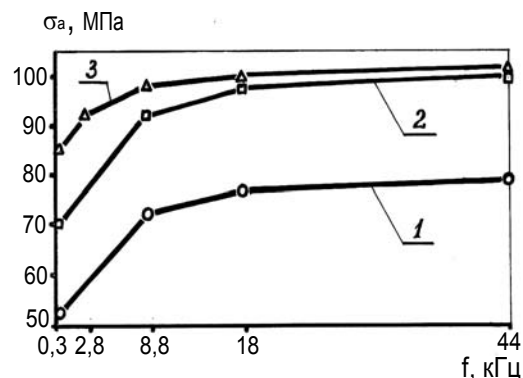


Рис. 5. Влияние частоты нагружения на предел выносливости сплавов:

1 – сплав АК8МЗ (заводская технология получения);
 2 – сплав АК8МЗ (экспериментальная технология);
 3 – сплав Д16

Выводы

Исследования показали, что увеличение частоты нагружения не изменяет форму кривых (см. рис. 5). Для сплава АК8МЗ разных технологий производства они расположены практически эквидистантно с близкими углами наклона кривых в исследуемом диапазоне. Для всех сплавов наблюдали монотонное увеличение усталостной долговечности при повышении частоты колебаний. Сравнение характеристик

циклической прочности экспериментального вторичного сплава АК8МЗ и Д16 показало, что наибольшая разница в показателях сохраняется в диапазоне частот 0,3...8,8 кГц (см. рис. 5). При этом следует отметить, что она возрастает с уменьшением частоты нагружения и практически отсутствует в диапазоне 8,8...44 кГц.

Результаты исследований свидетельствуют о том, что вторичные алюминиевые сплавы, полученные из 100 % лома и отходов производства, обладают высокими потенциальными возможностями в увеличении показателей усталостной долговечности и повышении циклической прочности. В настоящее время данный вопрос изучен недостаточно, его развитие является актуальным и требует дополнительных исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 57584А Україна, МКВ С22С 1/06. Модифікатор для алюмінієвих сплавів [Текст] / Волчок І. П., Мітяєв О. А.; заявник і патентоутримувач Запорізький національний техн. ун-т. – № 2002108343; заявл. 22.10.2002; опубл. 16.06.2003, Бюл. № 6.
2. ГОСТ 25.502-79. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 32 с.
3. Школьник, Л. М. Методика усталостных испытаний [Текст] : справочник / Л. М. Школьник. – М.: Металлургия, 1978. – 304 с.

Поступила в редколлегию 20.04.2011.

Принята к печати 27.04.2011.