

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.185.532

А. В. Блохин, В. А. Симанович, А. И. Сурус, А. М. Лось

ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК УСТАЛОСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ИЗ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ИСПЫТАНИЙ

UDC 621.185.532

A. V. Blakhin, V. A. Simanovich, A. I. Surus, A. M. Los

UNCERTAINTY EVALUATION OF THE FATIGUE CHARACTERISTICS OF ALUMINUM ALLOYS FROM SECONDARY RAW MATERIALS AFTER HIGH-FREQUENCY TESTS

Аннотация

Проведено экспериментальное исследование статистических характеристик результатов высокочастотных усталостных испытаний и дана оценка неопределенности с применением эмпирического метода. В качестве объекта исследований выступали плоские балочные образцы, изготовленные из алюминиевого сплава. Сплав был получен из вторичного сырья и по химическому составу соответствовал сплаву АК9М2. Образцы нагружались знакопеременным изгибом на низких (до 300 Гц) и высоких (18 000 Гц) частотах.

Было установлено, что высокочастотные методы определения характеристик усталости могут быть использованы для исследования вторичных алюминиевых сплавов. Оценка неопределенности показала необходимость в дальнейших исследованиях, направленных на разработку методического обеспечения точности результатов таких испытаний.

Ключевые слова:

деталь, образец, сплав, характеристики усталости, неопределенность.

Abstract

Pilot study of statistical characteristics of high-frequency fatigue test results and the evaluation of uncertainty of research result were carried out. To evaluate the uncertainty the empirical method was used. Flat beam specimens made from aluminum alloy were used for testing. The alloy was obtained from secondary raw materials and its chemical composition corresponded to the АК9М2 alloy. The samples were loaded with alternating bending at low (300 Hz) and high (18 kHz) frequencies. It was found that high-frequency methods for determining the fatigue characteristics can be used to study secondary aluminum alloys. Uncertainty assessment showed the need for further research aimed at developing the methodological aspect of the accuracy of the results of such tests.

Key words:

component, test specimen, alloy, characteristics of fatigue, uncertainty.

Введение

На сегодняшний день устоявшейся тенденцией в машиностроении является замещение сплавов на основе железа

алюминиевыми сплавами для изготовления широкой номенклатуры деталей машин, элементов конструкций и других технических систем. Многие детали машин подвергаются в процессе своей

© Блохин А. В., Симанович В. А., Сурус А. И., Лось А. М., 2018



эксплуатации динамическим и циклическим нагрузкам. Это детали шатунно-поршневой группы двигателей внутреннего сгорания и компрессоров, рычаги подвесок, кронштейны, радиаторы, теплообменники, корпуса навесного оборудования двигателей и редукторов и т. п. Если в 1990 г. масса алюминиевых сплавов в легковом автомобиле составляла в среднем около 5 %, то в настоящее время – 8...10 % от массы автомобиля [1]. В абсолютном выражении средняя масса деталей из алюминиевых сплавов по состоянию на 2016 г. увеличилась до 152 кг [2], а к 2025 г. прогнозируется рост до 250 кг. Это объясняется высокими показателями удельной прочности таких материалов, их коррозионной стойкостью, а также способностью к поглощению энергии колебаний.

Несмотря на наблюдающийся рост производства (в период с 2000 г. по 2016 г. – с 25 до 58 млн т [3]) и потребления первичного алюминия, значительная часть деталей изготавливается из сплавов, содержащих вторичное сырье, что объясняется высокой стоимостью первичного алюминия. В связи с этим одним из способов обеспечения потребности в конструкционных материалах на основе алюминия может быть создание замкнутого цикла использования таких материалов. В контексте отсутствия возможности получения первичного алюминия и сплавов на его основе для Республики Беларусь организация эффективного сбора алюминий-содержащего лома и его переработка выступают стратегически важной задачей, решение которой позволит частично заместить первичные сплавы их аналогами, изготовленными с использованием (или полностью) вторичного сырья.

Одной из ощутимых проблем получения вышеописанных материалов является их более низкое качество по сравнению со сплавами из первичного алюминия. Вторичные сплавы уступают их первичным аналогам по целому комплексу характеристик, в том числе уста-

лостным. Основными причинами, отрицательно влияющими на литейные свойства и механические характеристики, являются посторонние материалы в скрапе, такие как пластик, другие сплавы и неметаллические загрязнители. В связи с этим в структуре алюминиевых сплавов, изготовленных с использованием вторичного сырья, присутствует значительное количество интерметаллидов, такие сплавы характеризуются повышенной газовой пористостью, а также могут содержать неметаллические включения, отличаются неоднородностью структуры [4]. Это отрицательно сказывается в целом на широте области применения вторичных сплавов, особенно на возможности использования таких материалов для изготовления деталей и элементов конструкций, испытывающих циклические нагрузки.

Для выявления факторов, влияющих на характеристики усталости вторичных алюминиевых сплавов, и разработки эффективных технологий по получению таких материалов требуется большой объем исследований. Для снижения затрат, связанных с определением характеристик усталости, можно прибегнуть к высокочастотному нагружению [5, 6]. Возможность использования ускоренных усталостных испытаний металлических материалов за счет повышения частоты нагружения показана в [7, 8].

Следует отметить, что СТБ ИСО/МЭК 17025 требует при оценке точности испытаний давать оценку неопределенности. Аналогичное требование имеет место в последних изменениях ГОСТ 8.010.

В этой связи возникают вопросы оценки степени соответствия результатов исследований характеристик усталости сплавов, изготовленных из вторичного сырья, с использованием высокочастотного нагружения, результатам, полученным на низких частотах (до 300 Гц).

Для количественной оценки неопределенности результатов испытаний



широко используют два метода моделирования [9]: с применением закона распределения неопределенности; метод Монте-Карло. Также применяются эмпирические методы, основанные на исследовании методов испытаний.

В данной работе был применен эмпирический метод, т. к. использование методов моделирования представляется достаточно сложным.

При использовании эмпирического метода неопределенность результатов исследований характеристик усталости можно оценить по выражению [9]

$$u = \sqrt{s^2 + b^2}, \quad (1)$$

где s – стандартное отклонение, характеризующее прецизионность измерения; b – смещение.

В свою очередь, величину смещения находят по выражению [9]

$$b = \sqrt{\Delta^2 + u_{ref}^2 + \frac{s^2}{n}}, \quad (2)$$

где Δ – среднее отклонение; u_{ref} – неопределенность эталонного значения (принимались результаты усталостных испытаний, выполненных по методике, изложенной в ГОСТ 25.502); s – прецизионность среднего значения повторных измерений.

Цель проводимой работы заключалась в определении статистических характеристик результатов высокочастотных усталостных испытаний при нагружении знакопеременным изгибом образцов, изготовленных из сплавов, полученных с использованием вторичного алюминия, и оценке неопределенности эмпирическим методом.

Основная часть

Для определения среднего квадратического отклонения (СКО) предела ограниченной выносливости образцов были изготовлены несколько серий об-

разцов. Сплав, из которого изготавливались образцы для испытаний, выплавлялся из алюминиевого лома под покровным флюсом (33 % KCl, 67 % NaCl) с последующим рафинированием составом, разработанным специалистами ЗНТУ. Далее осуществлялась продувка флюса через расплав с помощью азота. Полученный материал по концентрации основных компонентов был близок к сплаву АК9М2. Все слитки подвергались термической обработке Т5.

Для осуществления нагружения образцов на высокой (18 000 Гц) частоте применялся магнитострикционный стенд (рис. 1), работающий в автоколебательном режиме [5, 6].

Для обеспечения возможности сравнения результатов высокочастотных испытаний с испытаниями на низких частотах использовали следующий подход:

1) подготовительные операции (механическая обработка; если предусмотрена – термическая обработка; электрохимическое полирование с целью удаления следов механической и термической обработки, обеспечивающее среднее арифметическое отклонение профиля рабочих поверхностей образцов для испытаний не более 0,25 мкм);

2) определение микротвердости на рабочих поверхностях образцов до проведения испытаний;

3) проведение (одновременно) испытаний образцов на частоте 300 Гц и на частоте 18 000 Гц (база испытаний принималась $5 \cdot 10^6$ циклов);

4) определение микротвердости на рабочих поверхностях образцов после проведения испытаний;

5) сравнение микротвердости до и после проведения испытаний и определение значения пороговых напряжений (напряжений, при которых фиксировалось изменение структурно-чувствительной характеристики – микротвердости) на частоте 300 Гц $\sigma_{n(0,3 \text{ кГц})}^t$ и на частоте 18 000 Гц $\sigma_{n(18 \text{ кГц})}^t$;



б) параллельно операциям 2 и 3 осуществление испытаний образцов на частоте 18 000 Гц на выбранных уровнях напряжений;

7) определение высокочастотных (полученных при нагружении на частоте 18 000 Гц) ограниченных пределов выносливости;

8) определение расчетным мето-

дом низкочастотных ограниченных пределов выносливости:

$$\sigma_{-1(0,3 \text{ кГц})}^t = \sigma_{n(0,3 \text{ кГц})}^t + (\sigma_{-1(18 \text{ кГц})}^t - \sigma_{n(18 \text{ кГц})}^t). \quad (3)$$

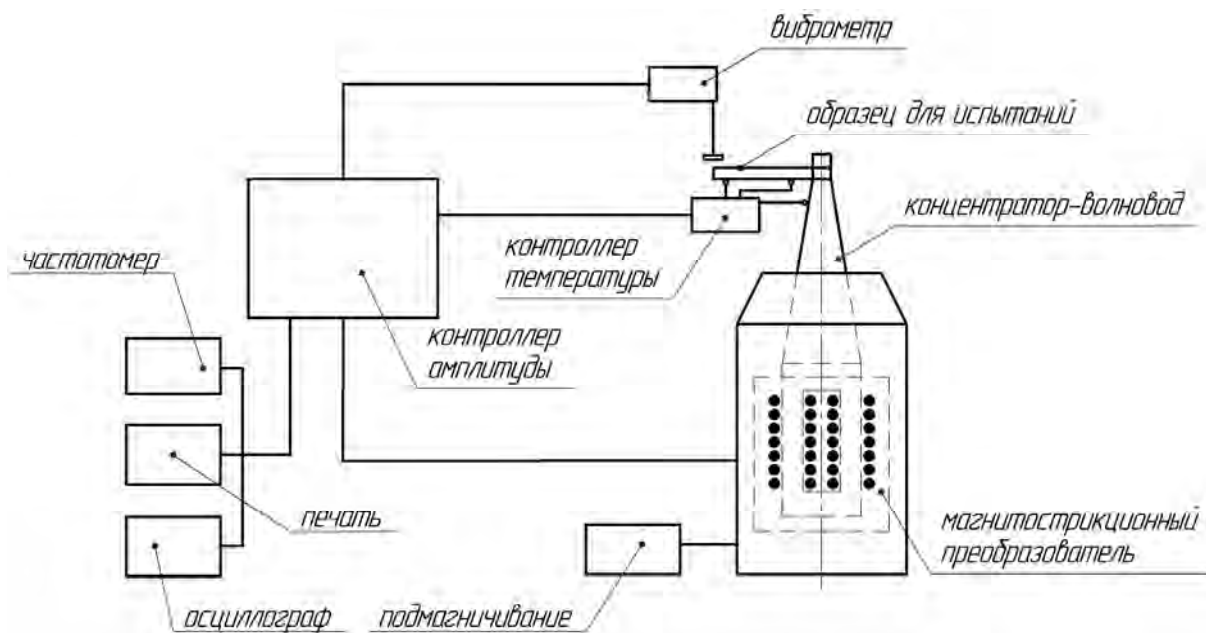


Рис. 1. Схема испытательной установки для реализации усталостных испытаний образцов на изгиб (частота 16 000...24 000 Гц)

Для испытания на усталость при знакопеременном изгибе изготавливались балочные образцы (рис. 2) прямоугольного поперечного сечения с хвостовиком, дающим возможность консольного закрепления. Длина образца l принималась с учетом физико-механических характеристик полученных сплавов для обеспечения резонансного режима нагружения на испытательном стенде. Высота образца h принималась как одна треть ширины b .

Все партии образцов в соответствии с ГОСТ 25.502 случайным образом разбивались на пять групп, каждая из которых испытывалась на заданном уровне напряжений. Далее, после обработки, результаты испытаний представ-

лялись в виде вариационных рядов и строились кривые распределения долговечности (рис. 3).

Семейства кривых усталости (рис. 4) строились методом секущих для заданных вероятностей разрушения в соответствии с ГОСТ 25.502.

Для построения кривой распределения вероятности разрушения (рис. 5) исследованных образцов использовались точки с координатами $\sigma - P$, которые определялись пересечением вертикальной прямой, располагающейся в соответствии с выбранной базой испытаний ($5 \cdot 10^7$ циклов), и кривых усталости (см. рис. 4).

Полученная кривая обрабатывалась по методике, изложенной в

ГОСТ 25.502. В результате определялись статистические характеристики пределов ограниченной выносливости (табл. 1) для всех партий образцов, из-

готовленных из алюминиевого сплава с использованием вторичного сырья (частота испытаний 300 Гц).

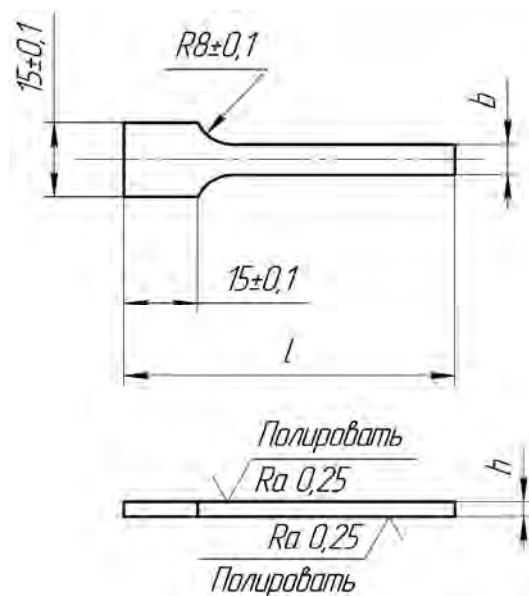


Рис. 2. Геометрические параметры образцов для испытаний

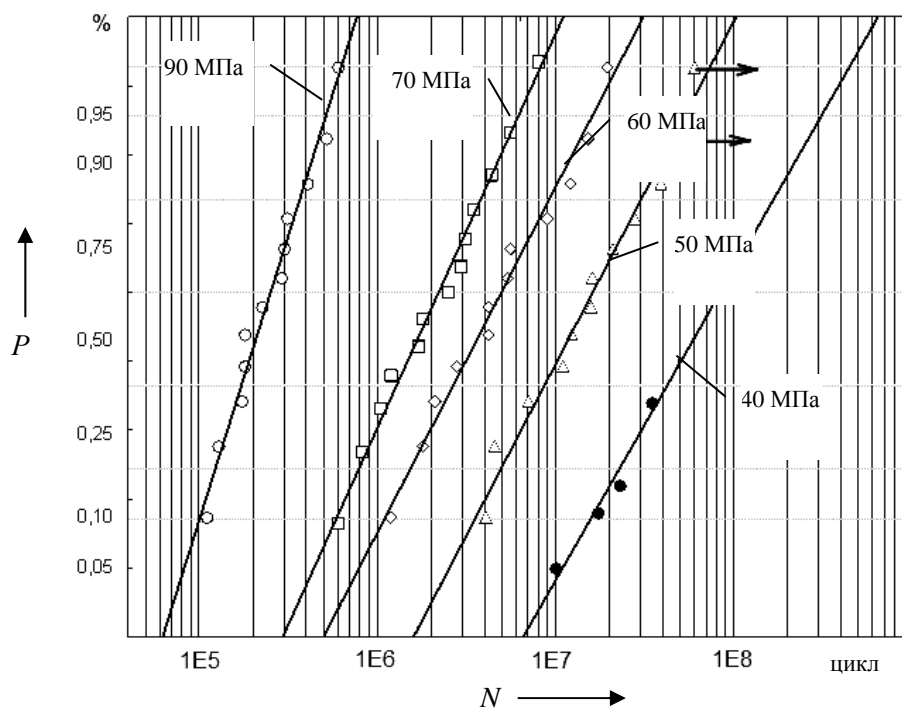


Рис. 3. Распределение долговечности образцов для испытаний, изготовленных из алюминиевого сплава с использованием вторичного сырья (частота испытаний 300 Гц), для пяти уровней напряжений



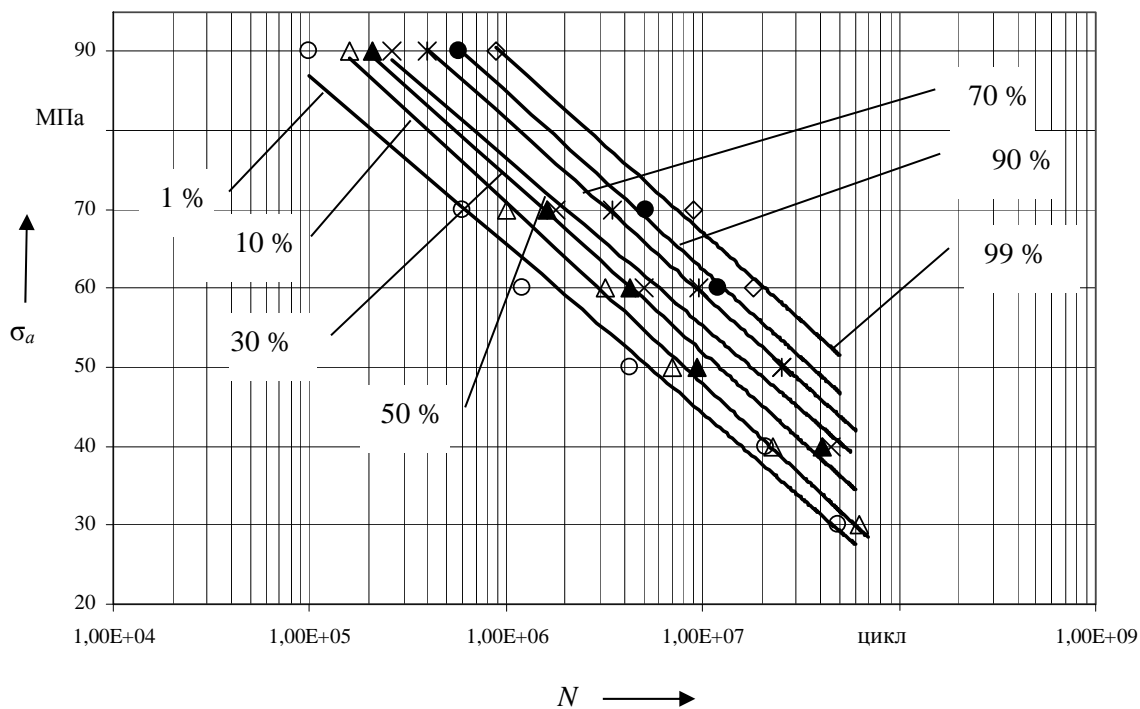


Рис. 4. Кривые усталости образцов для испытаний, изготовленных из алюминиевого сплава с использованием вторичного сырья (частота испытаний 300 Гц)

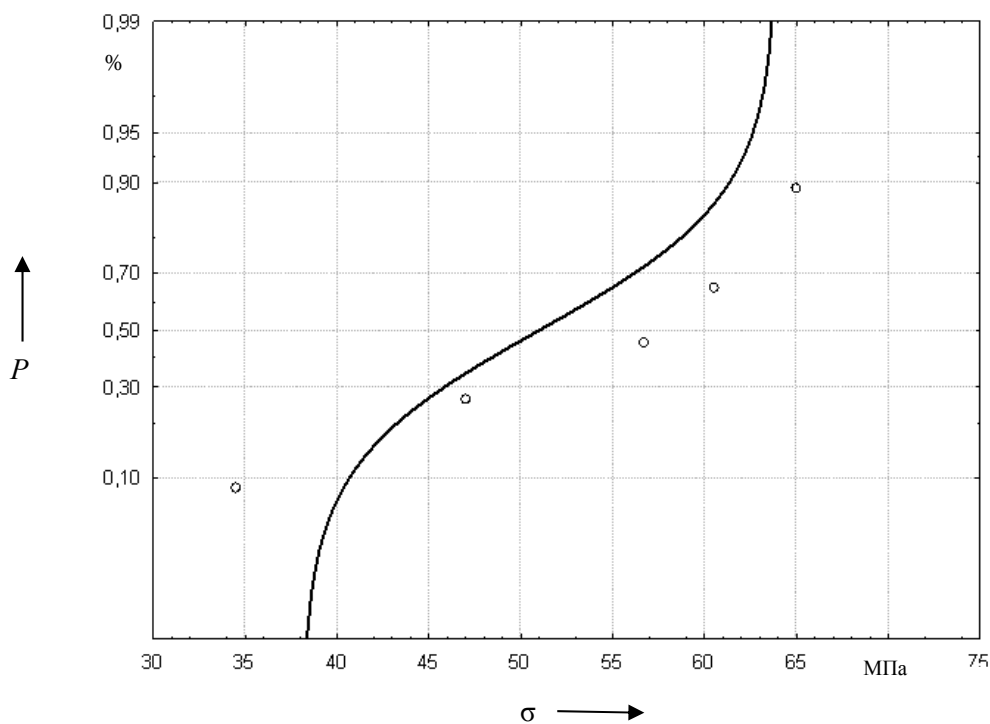


Рис. 5. Кривая распределения вероятности



Табл. 1. Статистические характеристики пределов ограниченной выносливости образцов, изготовленных из исследуемого сплава (частота испытаний 300 кГц)

Характеристика	Номер партии образцов				
	01	02	03	04	05
Среднее значение предела ограниченной выносливости ($5 \cdot 10^7$ циклов), МПа	36,14	35,12	35,52	34,8	36,55
СКО, МПа	4,29	3,92	4,08	4,02	3,95
СКО, %	11,87	11,16	11,49	11,55	10,81

Аналогичным образом были построены кривые распределения долговечности (рис. 6) и кривые усталости по вероятности разрушения (рис. 7) при нагружении образцов для испытаний на частоте 18 000 Гц.

Результаты расчета статистических характеристик ограниченных пределов выносливости, полученных в ходе испы-

таний образцов, изготовленных из алюминиевого сплава с использованием вторичного сырья на частоте нагружения 18 000 Гц, представлены в табл. 2. Также в таблице приводятся статистические характеристики результатов определения пороговых напряжений для образцов, испытанных на низкой (300 Гц) и высокой (18 000 Гц) частотах нагружения.

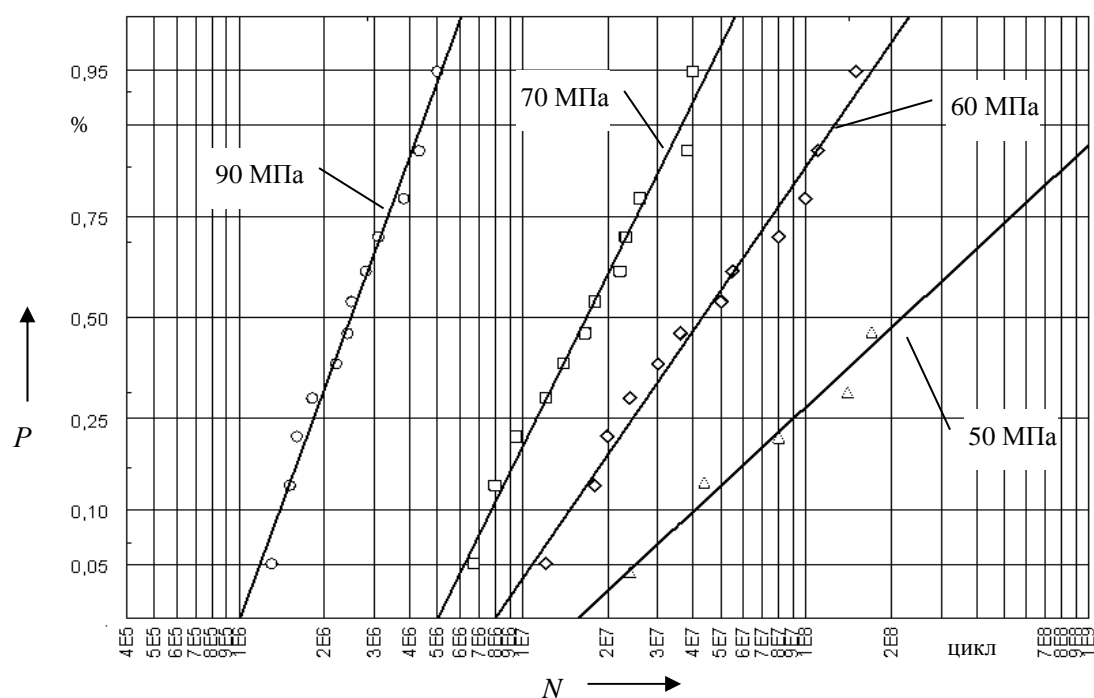


Рис. 6. Распределение долговечности образцов для испытаний, изготовленных из алюминиевого сплава с использованием вторичного сырья (частота испытаний 18 000 Гц), для четырех уровней напряжений



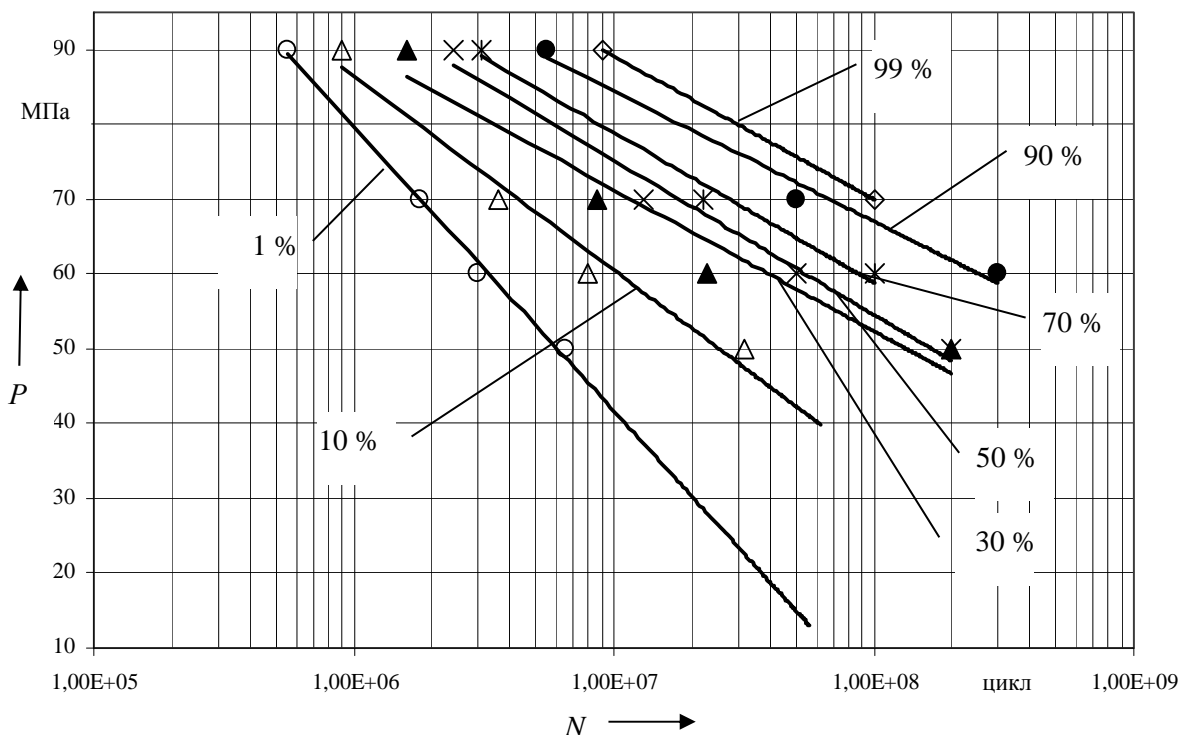


Рис. 7. Кривые усталости образцов для испытаний, изготовленных из алюминиевого сплава с использованием вторичного сырья (частота испытаний 18 000 Гц)

Табл. 2. Статистические характеристики ограниченных пределов выносливости образцов, изготовленных из исследуемого сплава (частота испытаний 300 кГц), и пороговых напряжений (частота испытаний 18 000 Гц)

Характеристика	Номер партии образцов				
	01	02	03	04	05
Предел выносливости (среднее), МПа	44,44	35,12	35,52	34,8	36,55
СКО предела выносливости, МПа	12,54	3,92	4,08	4,02	3,95
СКО предела выносливости, %	28,2	11,16	11,49	11,55	10,81
Пороговые напряжения (среднее), МПа (частота нагружения образцов 300 Гц, база нагружения $5 \cdot 10^7$ циклов)	20,55	21,06	19,98	21,20	20,83
СКО пороговых напряжений (частота нагружения образцов 300 Гц, база нагружения $5 \cdot 10^7$ циклов)	0,48	0,52	0,54	0,39	0,46
Пороговые напряжения (среднее), МПа (частота нагружения образцов 18 000 Гц, база нагружения $5 \cdot 10^7$ циклов)	36,80	36,92	37,51	37,23	37,28
СКО пороговых напряжений (частота нагружения образцов 18 000 Гц, база нагружения $5 \cdot 10^7$ циклов)	0,78	0,75	0,85	0,84	0,81

На основании данных табл. 1 и 2 по формулам (1) и (2) можно определить численные значения величины смещения и неопределенности результатов расчета предела ограниченной выносливости, полученного с использо-

ванием высокочастотного нагружения (18 000 Гц):

$$b = \sqrt{25^2 + 11,9^2 + \frac{4,5^2}{5}} = 27,8 \text{ \%};$$



$$u = \sqrt{28,2^2 + 27,8^2} = 39,6 \text{ \%} .$$

Следует отметить, что наибольший вклад в неопределенность результатов расчета пределов ограниченной выносливости, выполненного с применением методики, схематично описанной ранее, вносит величина смещения, определяемая средним отклонением предела выносливости, а также СКО предела выносливости, полученного в ходе испытаний на высокой частоте (18 000 Гц).

В то же время необходимо обратить внимание на то, что форма кривых распределения долговечности образцов (см. рис. 3 и 6) и кривых усталости по параметру вероятности разрушения (см. рис. 4 и 7) с ростом частоты нагружения не изменяется. Это позволяет предположить, что повышение частоты испытаний не оказывает существенного влияния на механизм усталостного разрушения, а ведет к увеличению рассеяния характеристик усталости.

Выводы

Оценка неопределенности результатов ускоренного определения характеристик усталости вторичных алюминиевых сплавов с использованием высоких частот нагружения (значение неопределенности результатов расчета пределов ограниченной выносливости, выполненного на основании данных, полученных с использованием высоких частот нагружения, достигало 39,6 % от прогнозируемого предела выносливости образцов, изготовленных из исследованного материала) позволяет сделать вывод, что существенный вклад в ее значение вносят характеристики рассеивания результатов усталостных испытаний на высоких частотах нагружения.

Таким образом, была установлена необходимость в дальнейших исследованиях, направленных на разработку методического обеспечения точности результатов усталостных испытаний с использованием высокочастотного нагружения для исследований характеристик усталости цветных сплавов на основе алюминия, в том числе полученных с использованием вторичного сырья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Металлы и цены. Ценовой каталог металлопродукции и оборудования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://metal4u.ru/articles/by_id/203. – Дата доступа 14.05.2011.
2. Все об алюминии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.aluminium-leader.ru/application/transport>. – Дата доступа 22.10.2017.
3. World aluminium [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.world-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-production/#data>. – Дата доступа 22.10.2017.
4. **Неменюк, Б. М.** Теория и практика комплексного модифицирования силуминов / Б. М. Неменюк. – Минск : Технопринт, 1999. – 272 с.
5. **Блохин, А. В.** Развитие комплекса оборудования для усталостных испытаний конструкционных материалов / А. В. Блохин // Тр. БГТУ. – 2004. – Вып. XII. – С. 263–266.
6. Усталостные испытания на высоких частотах нагружения / Под ред. В. А. Кузьменко. – Киев : Наукова думка, 1979. – 335 с.
7. Влияние амплитудно-частотных параметров циклического нагружения на кинетику физико-механических характеристик конструкционных материалов / С. Е. Бельский [и др.] // Трибофатика : сб. тр. IV Междунар. симп., Тернополь, 23–27 сент. 2002 г. : в 2 т. – Тернополь : Тернополь. гос. техн. ун-т им. Ивана Пулюя, 2002. – Т. 1. – С. 407–410.
8. **Довгялло, И. Г.** Разработка метода ускоренного определения характеристик усталости металлов и сплавов и его физическое обоснование / И. Г. Довгялло, С. Е. Бельский, Ф. Ф. Царук // Тр. БГТУ. – 1994. – Вып. II. – С. 80–85.



9. Качур, С. А. Альтернативные подходы по оцениванию неопределенности измерения (на основании технического отчета EUROLAB, № 1/2007) / С. А. Качур. – Минск : Белорус. гос. ин-т метрологии, 2011. – 70 с.

Статья сдана в редакцию 28 декабря 2017 года

Алексей Владимирович Блохин, канд. техн. наук, доц., Белорусский государственный технологический университет. E-mail: Blakhin@belstu.by.

Василий Антонович Симанович, канд. техн. наук, доц., Белорусский государственный технологический университет. E-mail: lmitlz@belstu.by.

Анатолий Иванович Сурус, канд. техн. наук, доц., Белорусский государственный технологический университет. E-mail: surus@belstu.by.

Александр Михайлович Лось, ассистент, Белорусский государственный технологический университет. E-mail: amlos@belstu.by.

Aleksey Vladimirovich Blakhin, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian State Technological University. E-mail: Blakhin@belstu.by.

Vasiliy Antonovich Simanovich, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian State Technological University. E-mail: lmitlz@belstu.by.

Anatoly Ivanovich Surus, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian State Technological University. E-mail: surus@belstu.by.

Aleksandr Mikhailovich Los, assistant lecturer, Belarusian State Technological University. E-mail: amlos@belstu.by.

