

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ УСТРОЙСТВ КРЕПЛЕНИЯ ОБРАЗЦОВ

The paper provides the fatigue tests procedure for flat beam-type specimens made of aluminium alloy that was produced using secondary materials (scrap, cheap etc.). The beam-type specimens were loaded by alternating bending with higher frequencies. The test results were statistically processed. The specimen durability distribution curves and fatigue curves were plotted. The statistical data, obtained from the test results, were used to investigate an effect of specimens fastening structure variation on the reliability of the high-frequency load fatigue tests results. As a result, it was demonstrated that application of the proposed fastening structure makes it possible to improve the tests reliability and to perform these tests easier.

Введение. Значительная часть деталей и узлов современных машин изготавливается из алюминиевых сплавов. Если в 1990 г. масса алюминиевых сплавов в легковом автомобиле составляла в среднем около 5%, то сегодня эти сплавы составляют 8–10% от массы автомобиля [1]. Замена сплавов на основе железа для ряда деталей лесовозных, трелевочных машин и другой специализированной техники, задействованной в современном технологическом процессе, позволит снизить их массу, а следовательно, затраты, связанные с эксплуатацией. Наряду с этим все чаще в качестве конструкционных материалов используют материалы, полученные с добавлением, а в некоторых случаях изготовленные полностью из вторичного сырья.

Замещение потребления первичного алюминия на сплавы, полученные с использованием вторичного сырья, позволит снизить стоимость изготовленной из них конечной продукции. Так, на производство 1 т алюминиевого сплава из вторичного сырья затрачивается всего 5% электроэнергии, необходимой для получения первичного алюминия [1].

Широкому применению алюминиевых сплавов, полученных с использованием вторичного сырья для изготовления ответственных деталей машин, препятствуют их низкие механические характеристики, что связано с несовершенством технологии переработки алюминиевого лома. После переплавки такие сплавы, как правило, характеризуются широкими интервалами содержания основных компонентов, загрязненностью газами и неметаллическими включениями, наличием грубых включений железосодержащих фаз [1]. Поэтому актуальной является задача повышения качества алюминиевых сплавов, полученных с использованием вторичного сырья, их механических характеристик, в частности характеристик усталости, т. к. большинство деталей машин работает в условиях сложного нагруженного состояния и подвергается в процессе работы значительным динамическим нагрузкам.

Для выявления факторов, влияющих на характеристики усталости алюминиевых сплавов,

полученных из вторичного сырья, требуется большой объем исследований. Для снижения затрат, связанных с определением характеристик усталости, можно воспользоваться высокочастотным нагружением [2]. Однако, как показали предварительные исследования, для всех уровней напряжений долговечность образцов, изготовленных из алюминиевых сплавов с использованием вторичного сырья, характеризовалась большим размахом. Задачей данного исследования было выявить, как скажется влияние усовершенствования устройства крепления образцов на достоверность результатов усталостных испытаний. Для этого был проведен статистический анализ сравнительных испытаний образцов, изготовленных из однотипных зон слитков из алюминиевого сплава, полученного в процессе одной плавки с использованием традиционного и усовершенствованного креплений (заявка на изобретение № 20070875 от 12.07.07, авторы: А. В. Блохин, С. Е. Бельский).

Основная часть. Для нагружения образцов знакопеременным изгибом на высокой (18,0 кГц) частоте использовалась магнитострикционная установка, работающая в автоколебательном режиме, активным элементом которой являлся магнитострикционный пакет, выполненный в виде замкнутого контура, набранного из тонких листов активного материала (пермендюр). С целью увеличения амплитуды колебаний к пакету присоединялся стержень переменного сечения – концентратор, который, в свою очередь, с помощью устройства крепления был связан с образцом. Все геометрические размеры элементов данной системы выбирались таким образом, чтобы достичь одинаковой собственной частоты, что позволяло при работе установки на данной резонансной частоте получать в образце максимальные значения амплитуды циклических напряжений [3].

Для испытания на усталость при изгибе изготавливались балочные, консольно-закрепленные образцы прямоугольного поперечного сечения 2×6 мм, колеблющиеся на второй (частота 18,0 кГц), собственной форме. С целью смещения

области разрушения от заделки на образцах был выполнен галтельный переход, несколько увеличивающий их поперечное сечение.

Длина и толщина образца определялись резонансной частотой и формой колебаний. Расчет напряженно-деформированного состояния образцов проводился методом конечных элементов

Сплав, из которого изготавливались образцы, выплавлялся под покровным флюсом (33% KCl, 67% NaCl) с последующим рафинированием (химический состав, предложенный специалистами ЗНТУ) и продувкой флюса через расплав с помощью азота. По химическому составу полученный сплав в большей мере соответствует сплаву типа АЛ4 (табл. 1). Анализ микроструктуры показал, что применение этой технологии обеспечило более тонкое строение эвтектики, состоящей из мелких кристаллов β (Si) и α -твердого раствора, что повысило механические свойства сплава. Введение в сплавы меди и магния обеспечило образование фаз CuAl_2 и $\text{Al}_4\text{Mg}_5\text{Cu}_4\text{Si}_4$, также способствующих протеканию упрочнения.

Таблица 1

Химический состав материала

Содержание элементов, мас. %					
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Al
10,24	0,852	1,634	0,2769	0,2433	85,60

Полученный сплав подвергался термической обработке по режиму Т5 (закалка с 525°C в воду и искусственное старение при 175°C в течение 8 ч с охлаждением на воздухе).

Образцы случайным образом были разделены на две серии [4]. Первая серия образцов испытывалась с использованием крепления винтом с прижимной планкой (рис. 1), вторая серия образцов подвергалась нагружению с использованием предлагаемого устройства крепления (заявка на изобретение № 20070875 от 12.07.07, авторы: А. В. Блохин, С. Е. Бельский). Достоинством устройства крепления, приведенного на рис. 2, является простота его конструкции и малые затраты времени на закрепление испытуемого образца на концентраторе. Недостатками такого крепления являются его слабая надежность, невысокая точность позиционирования образца относительно концентратора, что будет сказываться на напряженно-деформированном состоянии образца при усталостных испытаниях, а значит, и на их результатах, особенно при высоких частотах нагружения. Предлагаемая конструкция разрабатывалась с целью уменьшить влияние устройства крепления на напряженно-деформированное состояние образцов путем повышения жесткости заделки и точности позиционирования образцов относительно кон-

центратора. Это достигается тем, что в креплении предусмотрены пазы, позволяющие закреплять образцы однообразно относительно концентратора, внутренняя резьба на концентраторе заменена на наружную, что позволяет увеличить силу затяжки, предусмотрено дополнительное стопорение резьбы контргайкой.

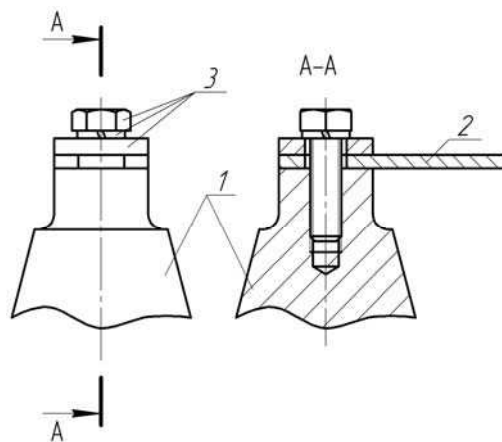


Рис. 1. Устройство крепления образца винтом с прижимной планкой:
1 – концентратор; 2 – образец;
3 – элементы устройства крепления

Для оценки средних значений и среднеквадратических отклонений логарифма долговечности, построения кривых распределения долговечности и семейства кривых усталости по параметру вероятности разрушения результаты испытаний подвергались статистической обработке по методике, изложенной в ГОСТ 25.502-79, необходимые для статистического анализа справочные данные принимались по [7, 8].

Результаты испытаний серии из n образцов при постоянном уровне напряжений располагались в вариационный ряд в порядке возрастания долговечности. На основании этих рядов были построены кривые распределения долговечности на вероятностной бумаге, соответствующей логарифмически нормальному закону распределения (рис. 2).

Вероятность разрушения образцов определялась по формуле [4]

$$P = \frac{i - 0,5}{n},$$

где i – номер образца в вариационном ряду; n – число испытанных образцов.

На основании кривых распределения долговечности с помощью метода горизонтальных сечений [4] были построены семейства кривых усталости равной вероятности, соответствующие вероятностям разрушения $P = 0,05; 0,1; 0,5$ (рис. 3, 4). Для их построения образцы подвергались нагружению на четырех уровнях напряжений (50, 60, 70, 90 МПа).

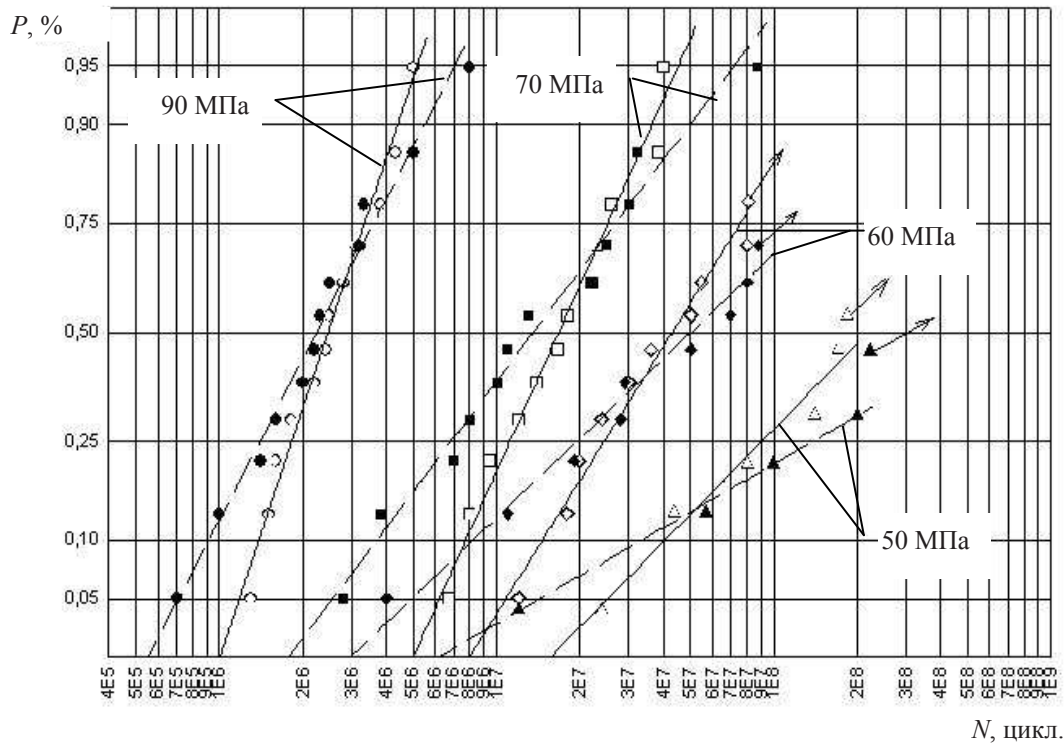


Рис. 2. Влияние конструкции устройства крепления на распределение долговечности образцов из алюминиевого сплава: прерывающиеся линии – 1-я серия образцов; сплошные линии – 2-я серия образцов

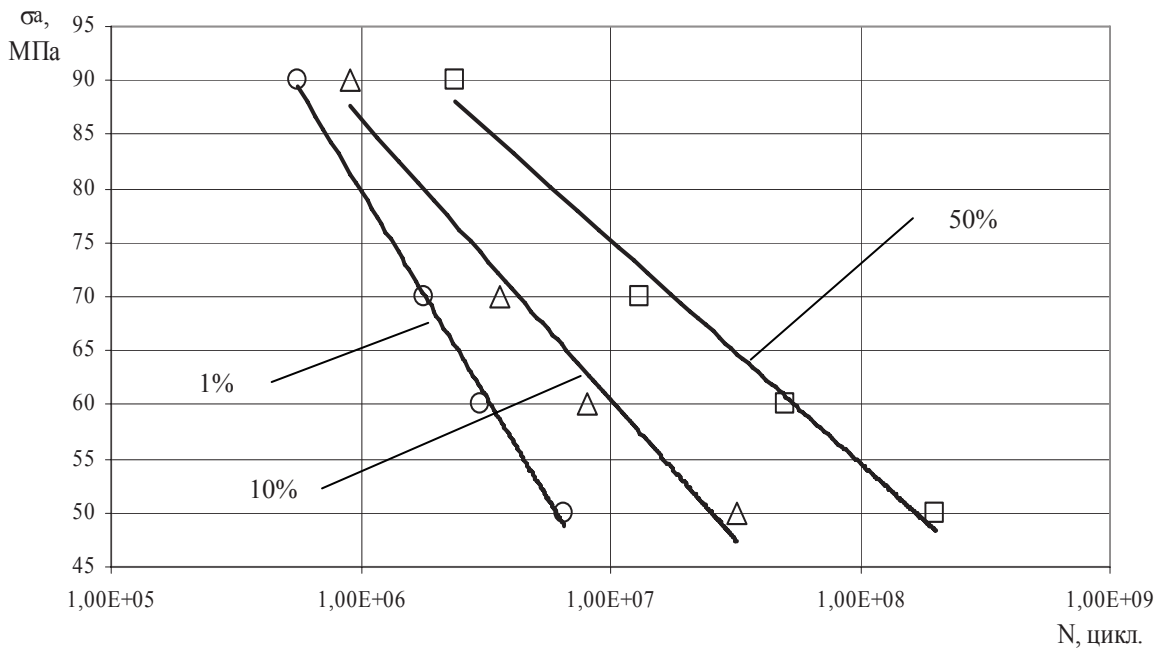


Рис. 3. Кривые усталости образцов из алюминиевого сплава по параметру вероятности разрушения, полученные при использовании крепления винтом с прижимной планкой.

Оценка среднего значения логарифма долговечности и среднеквадратического отклонения логарифма долговечности производилась только для уровней напряжений, для которых разрушились все образцы серии.

Выборочное среднее значение логарифма долговечности и среднеквадратическое отклонение логарифма долговечности образцов определялись по следующим зависимостям:

$$\overline{\lg N} = \frac{\sum_{i=1}^n \lg N_i}{n};$$

$$S_{\lg N} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^n (\lg N_i)^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \lg N_i \right)^2 \right)}.$$

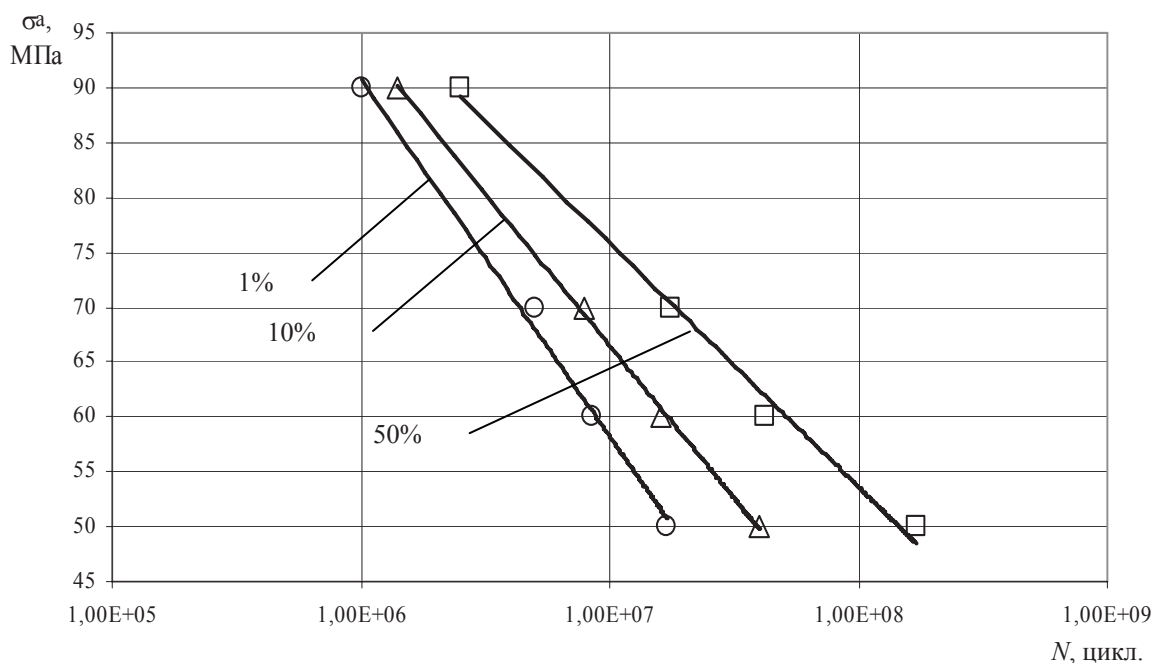


Рис. 4. Кривые усталости образцов из алюминиевого сплава по параметру вероятности разрушения, полученные при использовании предлагаемой конструкции крепления.

Объем серии образцов, необходимый для проведения испытаний на заданном уровне напряжений:

$$n \geq \frac{v_{\lg N}^2}{\Delta_\alpha^2} z_{1-\frac{\alpha}{2}}^2,$$

где $v_{\lg N}$ – коэффициент вариации выборочного среднего значения логарифма долговечности; $z_{1-\frac{\alpha}{2}}$ – квантиль нормированного нормального

распределения соответствующая доверительной вероятности $P = 1 - \alpha$, α – вероятность ошибки первого рода, при $\alpha = 0,05$ $z_{1-\frac{\alpha}{2}} = 1,96$ [5], Δ_α –

предельная относительная ошибка соответствующая доверительной вероятности $P = 1 - \alpha$, принимаем $\Delta_\alpha = 0,04$ [5].

Т.к. объем выборки ограничен, определялись доверительные интервалы для выборочного среднего значения логарифма долговечности и среднеквадратического отклонения логарифма долговечности по следующим соотношениям:

$$\overline{\lg N} - \frac{S_{\lg N}}{\sqrt{n}} t_{\alpha,k} < \lg N < \overline{\lg N} + \frac{S_{\lg N}}{\sqrt{n}} t_{\alpha,k};$$

$$S_{\lg N} z_1 \sqrt{\frac{n-1}{n}} < S_{\lg N} < S_{\lg N} z_2 \sqrt{\frac{n-1}{n}},$$

где $t_{\alpha,k}$ – критерий Стьюдента, для $\alpha = 0,05$ и числа степеней свободы $k = n - 1 = 11$ $t_{\alpha,k} = 2,20$ [5], z_1 и z_2 – коэффициенты, зависящие от уровня доверительной вероятности и числа степеней свободы $k = 11$.

Основные статистические характеристики вариационных рядов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Статистические характеристики вариационных рядов

Обозначение параметра	1-я серия образцов		2-я серия образцов		
	90 МПа	70 МПа	90 МПа	70 МПа	
$\overline{\lg N}$	6,34	7,13	6,39	7,23	
R	1,17	1,49	0,59	0,77	
$S_{\lg N}$	0,321	0,422	0,186	0,250	
$v_{\lg N}$	0,051	0,059	0,029	0,035	
Доверительные интервалы	$\overline{\lg N}$				
	min	6,55	7,40	6,51	7,38
	max	6,14	6,86	6,28	7,07
	$S_{\lg N}^2$				
	min	0,06	0,10	0,02	0,04
	max	0,25	0,43	0,08	0,15
Минимальное число образцов n	7	9	2	3	

Из графиков (рис. 2) видно, что аппроксимирующие прямые, соответствующие одному уровню напряжений, группируются попарно,

где место каждой из них определяется амплитудой нагружения. Для всех серий образцов угол наклона линий, а следовательно, размах характеристик рассеивания увеличивается для меньших амплитуд колебаний. Так, например, при $\sigma_a = 90$ МПа для первой серии образцов рассеяние предела долговечности составляло от $N = 7 \cdot 10^5$ до $N = 8 \cdot 10^6$ циклов, при $\sigma_a = 70$ МПа этот показатель увеличился почти в 3 раза. При этом можно отметить, что для всех уровней напряжений наклон прямых для образцов первой серии существенно больше.

Сравнивая статистические характеристики (табл. 2), можно говорить об уменьшении размаха логарифма долговечности, об уменьшении среднеквадратического отклонения и коэффициента вариации на одинаковых амплитудах нагружения, а также о сужении доверительных интервалов для выборочного среднего значения логарифма долговечности и среднеквадратического отклонения логарифма долговечности образцов второй серии.

Анализируя графики, представленные на рис. 3 и 4, можно отметить, что кривые усталости равной вероятности, полученные при испытании образцов второй серии, располагаются более плотно по сравнению с кривыми, полученными на основании результатов испытаний образцов первой серии. Для образцов первой серии кривая, соответствующая 50%-ной вероятности разрушения, смещена в область большей долговечности по сравнению с аналогичной кривой, полученной при испытании образцов второй серии.

При одинаковых режимах технологии изготовления образцов обеих серий и равенстве их геометрических параметров на основании вышеотмеченных наблюдений была выдвинута гипотеза, что несовершенство конструкции крепления образцов (винт с прижимной планкой) влияет на результаты усталостных испытаний. Для подтверждения этой гипотезы было проверено равенство дисперсий [4]. Для этого сравнивались дисперсии логарифма долговечности двух серий испытаний для уровней нагружения 90 и 70 МПа по F -критерию. Табличное значение при доверительной вероятности $P = 0,95$ и количестве испытанных образцов $n = 12$ в каждой серии на каждом уровне нагружения $F_{0,95} = 2,87$ [5]. Результаты расчетов в обоих случаях показали превышение табличного значе-

ния, т. е. здесь можно говорить о разных нормально распределенных совокупностях.

Выводы. На основании результатов испытаний двух серий образцов, изготовленных из алюминиевого сплава, полученного с использованием вторичного сырья, были построены кривые распределения долговечности образцов и кривые усталости по параметру вероятности разрушения. Была выдвинута гипотеза о влиянии устройства крепления винтом с прижимной планкой на результаты усталостных испытаний, что подтвердилось при проверке по F -критерию. Анализ статистических характеристик позволяет сказать, что применение предлагаемой конструкции крепления образцов позволит достичь более высокой достоверности результатов усталостных испытаний плоских балочных образцов при нагружении знакопеременным изгибом при испытании меньшего числа образцов. Это дает возможность более широко проанализировать факторы, влияющие на характеристики усталости алюминиевых сплавов, полученных с использованием вторичного сырья при меньшем объеме исследований, что создает предпосылки более широко использовать такие сплавы для изготовления деталей машин, работающих при динамических и вибрационных нагрузках.

Литература

1. Немененок, Б. М. Теория и практика комплексного модифицирования силуминов / Б. М. Немененок. – Минск: Технопринт, 1999. – 272 с.
2. Высокочастотные колебания как метод ускорения усталостных испытаний элементов конструкций / Ф. Ф. Царук [и др.] // Повышение технического уровня и надежности машин: тез. докл. науч.-техн. конф., Минск, 28–29 октября 1993 г. – Минск: ИНДМАШ, 1993. – С. 47–48.
3. Блохин, А. В. Комплекс оборудования для усталостных испытаний элементов технологического оборудования / А. В. Блохин, Ф. Ф. Царук, Н. А. Гайдук // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообработ. пром-сть. – 2002. Вып. X. – С. 213–215.
4. Степнов, М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: справочник / М. Н. Степнов, А. В. Шаврин. – М.: Машиностроение, 2005. – 400 с.
5. Оуэн, Д. Б. Сборник статистических таблиц / Д. Б. Оуэн. – М.: ВЦ АН СССР, 1973. – 586 с.