

А. В. Блохин, ассистент; Ф. Ф. Царук, канд. техн. наук, доцент;
С. Е. Бельский, канд. техн. наук, доцент

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА И ТЕХНОЛОГИИ ВЫПЛАВКИ НА УСТАЛОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВТОРИЧНЫХ ЛИТЕЙНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

The article describes the equipment and technique for carrying out fatigue testing of secondary foundry aluminum alloy. The represented equipment made it possible to make testing under different frequency loading. Samples, small square beams of cross section, were tested. The samples produced by smelting followed by mechanical treatment. Ferrous contents varied. The results of this testing have shown that perfection of the smelting technology can greatly influence the increase of characteristics of examined alloys fatigue. The positive effect of thermo-cyclic treatment on fatigue characteristics is also possible. The investigations have been carried out with cast alloy АЛ4, under temperatures -130°C to $+230^{\circ}\text{C}$. The number of heating and cooling cycles varied. Simultaneously the samples were exposed to frequency of 18 kHz.

Введение. Сегодня все актуальнее становится использование конструкционных материалов, полученных из вторичного сырья, в том числе из лома сплавов цветных металлов. Так, в качестве конструкционных материалов алюминиевые сплавы на сегодняшний день занимают второе место после сплавов, полученных на основе железа. При этом получение первичного алюминия существенно дороже по сравнению с производством стали [1].

Лесовозные, трелевочные машины и другая специализированная техника, используемая в современном лесозаготовительном процессе, а также оборудование, работающее на стадии переработки лесоматериалов, содержит ряд деталей различных узлов, которые изготовлены из алюминиевых сплавов в том числе из литейных. Поэтому замещение первичных алюминиевых сплавов на сплавы, полученные из вторичного сырья (лом, отходы производства и др.), позволит снизить себестоимость производства отдельных узлов, а в конечном результате – издержки связанные с производством лесных машин и деревообрабатывающего оборудования.

Однако несовершенство существующей технологии переработки приводит к тому, что не обеспечивается необходимое качество вторичных сплавов. После переплавки они характеризуются широкими интервалами содержания основных компонентов, значительной загрязненностью неметаллическими включениями и газами, гетерогенностью структуры, а также наличием грубых включений железосодержащих фаз. В связи с этим остро стоит задача повышения качества, а следовательно, и конкурентоспособности вторичных сплавов по отношению к более дорогостоящим их первичным аналогам.

Одной из проблем использования вторичных сплавов такого рода является изучение факторов, влияющих на усталостные характеристики этих сплавов с целью выявления возможностей их повышения, что особенно акту-

ально для деталей и узлов, работающих в условиях разного рода динамических нагрузок.

С этой целью были проведены усталостные испытания различных партий образцов, изготовленных из вторичных алюминиевых сплавов на различных частотах нагружения и нагружаемых знакопеременным изгибом.

1. Оборудование и методика проведения усталостных испытаний. Для проведения испытаний на высокой (18,0 кГц) частоте использовалась магнитострикционная установка, работающая в автоколебательном режиме.

Активным элементом усталостной установки являлся магнитострикционный пакет, выполненный в виде замкнутого контура, набранного из тонких листов активного материала (никеля, пермендюра и т. п.). С целью увеличения амплитуды колебаний к пакету присоединялся стержень переменного сечения – концентратор, который, в свою очередь, 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 [2].

Для проведения усталостных испытаний на низкой частоте (0,3 кГц) использовалась испытательная установка на базе электродинамического вибростенда типа ВЭ, которая также работала в резонансном режиме.

Для испытания на усталость при изгибе изготавливались балочные, консольно закрепленные образцы прямоугольного поперечного сечения 2×6 мм, колеблющиеся на первой (частота 0,3 кГц) либо 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 (рис. 1). Длина и толщина образца выбиралась в зависимости от резонансной частоты и формы колебаний.

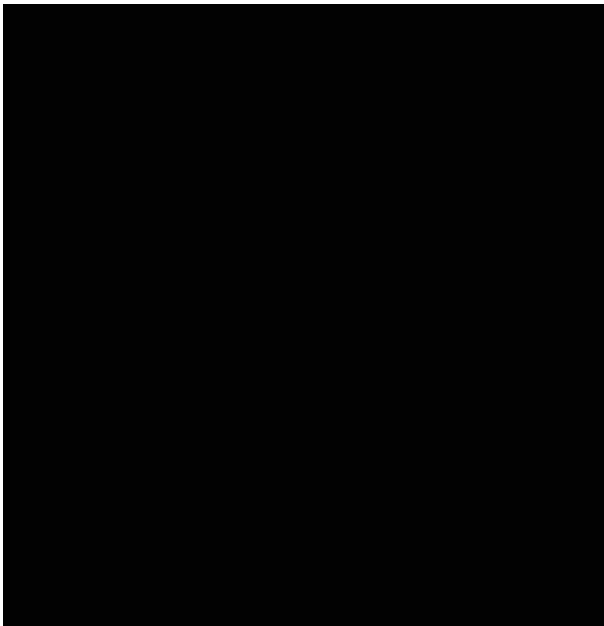


Рис. 1. Геометрические параметры образца при нагружении знакопеременным изгибом

Химический состав испытуемого материала был близок к составу сплава АК9 М [3] (табл. 1). Образцы партии «0» были получены плавкой по традиционной технологии под покрывным флюсом (33% KCl, 67% NaCl) с продувкой расплава рафинирующим флюсом (45% NaCl, 15% KCl, 40% AlF₃) с последующей термообработкой Т5. Остальные партии образцов были получены плавкой с различным содержанием модифицирующе-рафинирующих комплексов, разработанных в Запорожском национальном техническом университете (Украина) и последующей термообработкой Т5.

Таблица 1
Химический состав образцов

№ партии образцов	Содержание элементов, мас. %				
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg
0	10,6	1,54	1,60	0,30	0,60
1	10,5	1,68	1,70	0,33	0,50
2	10,65	1,64	1,60	0,34	0,50
3	11,2	1,57	1,80	0,35	0,40
4	10,55	1,72	1,68	0,34	0,40

Основные механические характеристики испытуемых материалов приведены в табл. 2 [3].

Таблица 2
Механические характеристики образцов

№ партии образцов	σ_b , МПа	δ , %	HRB	E, МПа
0	120,2	1,7	82,2	$0,74 \cdot 10^{11}$
1	127	1,7	86,1	$0,74 \cdot 10^{11}$
2	135,0	1,8	78,3	$0,74 \cdot 10^{11}$
3	152,3	1,9	85,2	$0,74 \cdot 10^{11}$
4	158,5	1,9	89,7	$0,74 \cdot 10^{11}$

2. Анализ результатов испытаний. Результаты усталостных испытаний образцов показали, что с ростом содержания в шихте вторичных материалов усталостные кривые существенно смещаются в область более низких напряжений [3].

Причем такое поведение кривых отмечается как при низких (0,3 кГц), так и при высоких частотах (18,0 кГц) испытаний, что свидетельствует о негативном влиянии лома в шихте, содержащего различные вредные примеси (например Fe 1,5 и более процентов).

На основании анализа микроструктуры и комплекса механических свойств было проведено совершенствование состава и технологии введения рафинирующе-модифицирующего комплекса, что позволило при плавке существенно улучшить усталостные характеристики алюминиевых сплавов, полученных из лома со значительным снижением содержания в нем первичного алюминия [3].

Еще одним способом повышения усталостных характеристик исследуемых материалов является развитие технологии их термической обработки.

Возможность повышения прочностных и усталостных свойств рассмотрена на примере литейного сплава Ал4, взятого в качестве модельного материала, в связи с тем, что для такого материала характерны крупные выделения фаз CuAl₂, в результате чего в микрообъемах материала аккумулируется энергия вибрационных нагрузок, образуются микротрещины в межзеренном пространстве, что приводит впоследствии к развитию магистральных трещин и разрушению.

Для повышения прочностных и усталостных характеристик алюминиевых сплавов старение проведено путем термоциклирования в интервале температур $-130^{\circ}\text{C} \dots +230^{\circ}\text{C}$ со скоростью нагрева $5,0^{\circ}\text{C}/\text{с}$ и скоростью охлаждения с различным количеством циклов (4–10). Операция нагрева в каждом цикле совмещалась с наложением колебаний частотой 18 кГц и интенсивностью $(0,3\text{--}0,4)\sigma_T$ сплава. Совместное воздействие в ходе такой обработки термонаклепа и наклепа под действием колебаний способствовало созданию определенного типа дислокационной структуры, блокирующей рост зародышей, выделяющихся при старении фаз и обеспечивающей их равномерное распределение в объеме материала.

Усталостная долговечность образцов (N_u) определялась на стенде при приложении циклической знакопеременной нагрузки величиной $\sigma = 0,6\sigma_T$ материала при частоте испытаний $f = 18$ кГц. Число циклов определялось до разрушения образца.

Проведенные усталостные испытания показали, что обработка образцов по способу термоциклирования существенно повышает усталостную долговечность при сохранении пластичности и прочности материала (табл. 3).

Влияние термообработки на свойства алюминиевого сплава

№ сплава	Режимы обработки					Результаты испытаний		
	Число циклов	Температура, °С		Скорость, °С/с		σ_b , кгс/мм ²	δ , %	N_u , ($\cdot 10^5$)
		Нагрев	Охлаждение	Нагрев	Охлаждение			
1	7	230	-130	5,0	50	29,5	16,6	15,5
2	4	230	-130	5,0	50	28,2	16,3	15,2
3	10	230	-130	5,0	50	28,0	16,2	14,9
4	2	230	-130	5,0	50	28,2	16,3	14,7
5	12	230	-130	5,0	50	28,1	6,0	14,5
6	7	230	-130	0,2	50	28,0	15,7	12,4
7	7	230	-130	5,0	140	27,4	5,8	12,7
8	7	190	-130	5,0	50	27,6	15,6	13,2
9	7	240	-130	5,0	50	27,2	15,5	13,4
10	7	230	-80	5,0	50	27,2	5,5	12,9
11	7	230	-150	5,0	70	28,1	5,4	12,9
12	7	230	-130	5,0	50	28,2	5,6	13,4

Электронно-микроскопические исследования показали, что предлагаемая обработка препятствует образованию скоплений дислокаций и возникновению полос скольжения, субмикро- и микротрещин на ранних стадиях нагружения в условиях воздействия циклических

знакопеременных колебаний. Кроме того, усталостная долговечность повышается в результате дробления участков железосодержащих фаз, прежде всего Al_3Fe , что особенно важно при термической обработке вторичных алюминиевых сплавов, содержащих до 1,5–1,7% Fe.

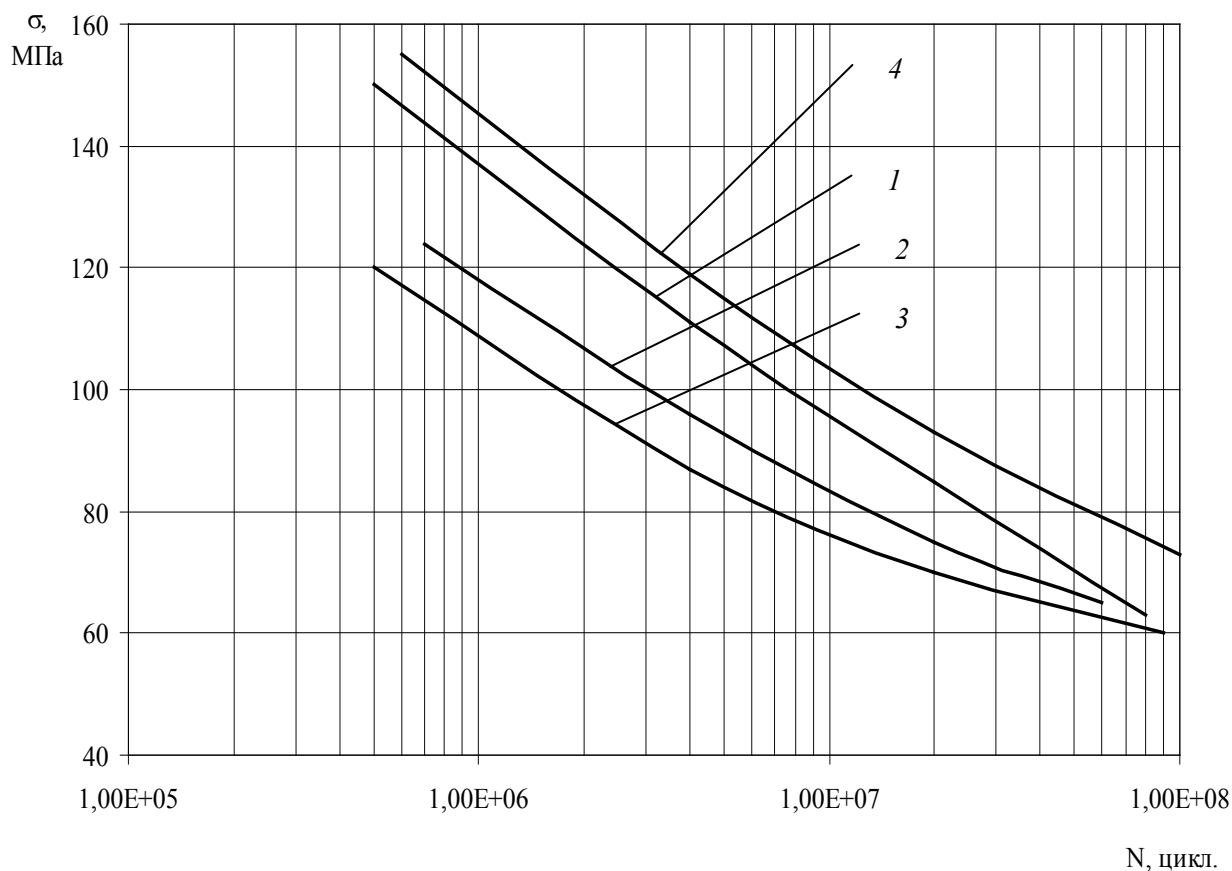


Рис. 2. Результаты усталостных испытаний на частоте 18 кГц сплава АК9 с различным содержанием железа и различной термообработкой:
 1 – 1,1% Fe+T5; 2 – 1,5% Fe+T5; 3 – 1,7% Fe+T5; 4 – 1,7% Fe + термоциклическая термообработка

Уменьшение числа циклов в интервале температур $-130^{\circ}\text{C} \dots +230^{\circ}\text{C}$ (менее 4) приводит к недостаточной степени измельчения выделяющихся при старении фаз; повышение числа таких циклов (более 10) приводит к образованию повышенных внутренних напряжений в материале, что снижает усталостную долговечность.

Проведение операций нагрева и охлаждения с пониженной скоростью приводит к нежелательной коагуляции выделившихся фаз, а также увеличивает общее время обработки. Повышение скоростей как нагрева, так и охлаждения вызывает значительные внутренние напряжения деталей, что снижает их усталостную выносливость, а также приводит к повышенному короблению (поводке).

Термоциклическая обработка на вторичных сплавах оказалась весьма эффективной (рис. 2), поскольку она обеспечивает равномерное распределение интерметаллидных фаз по объему исследуемого материала, а также более благоприятное распределение внутренних напряжений.

Проведенные фрактографические исследования образцов сплава АК8МЗ, содержащего различное количество железа, показали, что при использовании РМК в рекомендованных количествах характер изломов при различном содержании железа существенно не изменяется, а разрушение сопровождается определенной пластической деформацией, свидетельствующей о повышении вязкости материала. Отмечается наличие ямочного микрорельефа и большое количество полос скольжения. Первичные поры, связанные с неметаллическими включениями, не провоцируют зарождения трещин и тем самым не способствуют ускоренному разрушению материала.

Выводы. На основании комплексного анализа микроструктуры и механических свойств, в первую очередь усталостных характеристик, совместно со специалистами Запорожского

национального технического университета были не только совершенствованы состав и технологии использования рафинирующе-модифицирующих комплексов, но и внесены предложения по совершенствованию технологии термической обработки, которая обеспечивает стабильное повышение усталостных характеристик широкой номенклатуры вторичных литейных алюминиевых сплавов (АК9, АК5М4, АК8МЗ, АК9М2), содержащих значительное количество железа. Кроме того, улучшена их жидкотекучесть и существенно снижена пористость отливок. Тем самым расширяется номенклатура изделий, изготавливаемых из вторичных литейных алюминиевых сплавов, что подтверждается результатами опытно-промышленных плавов, проведенных на Минском тракторном и Минском моторном заводах. В УП «БЕЛНИИЛИТ» изготовлена из вторичных алюминиевых сплавов и введена в эксплуатацию партия поршней и радиаторов, работающих в условиях статического и динамического нагружения, а также при повышенных температурах.

Литература

1. Ефименко, Г. Г. Сталь и альтернативные материалы. Проблемы экономики и экологии / Г. Г. Ефименко, И. Г. Михеева, Т. Н. Павлышин // *Металл и литье Украины*. – 1997. – № 8, 9. – С. 3–8.
2. 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 деревообраб. пром-сть*. – Минск, 2002. – Вып. X. – С. 213–215.
3. Блохин, А. В. Исследование характеристик усталости вторичных литейных алюминиевых сплавов / А. В. Блохин, С. Е. Бельский, Ф. Ф. Царук // *Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть*. – Минск, 2007. – Вып. XV. – С. 200–205.