



*The article describes the equipment and technique for carrying out fatigue testing of secondary foundry aluminum alloy. 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.*

А. В. БЛОХИН, УО БГТУ

УДК 621.185.532

## ПОВЫШЕНИЕ УСТАЛОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИТЕЙНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ МЕТОДОМ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Многие детали современных машин работают в сложных условиях при сочетании как статических, так и динамических нагрузок. Механические характеристики конструкционных материалов, из которых изготавливаются такие детали, должны обеспечивать надежную и бесперебойную работу как отдельных узлов, так и машины в целом в течение всего срока эксплуатации. Наряду с материалами, полученными на основе железа, широкое распространение получили сплавы из цветных металлов. Наиболее широко применяются различные алюминиевые сплавы [1]. Так, согласно последнему сообщению Алюминиевой ассоциации (Aluminum Association), автомобильные компании в течение последних 20 лет постоянно увеличивали степень использования сплавов на основе алюминия при производстве автотранспортных средств. Согласно этим данным, на сегодняшний день средний уровень применения алюминия в автомобилях составляет 8,6% от их массы. В настоящее время свыше 50% всех транспортных средств, произведенных в Северной Америке, содержат свыше 10% алюминия от массы машины. Из алюминиевых сплавов изготавливаются как кузовные детали и элементы отделки салона, так и детали, подверженные знакопеременным нагрузкам. Например, блок цилиндров, поршни, кронштейны передней растяжки, рычаги передней подвески, кронштейны крепления двигателя и др. Более широкое применение сплавов, полученных на основе алюминия, в настоящее время ограничивается их высокой стоимостью, обусловленной сложностью получения чистого алюминия электролизом. В первую очередь это связано со значительными затратами электроэнергии. Изготовление алюминиевых сплавов

с использованием вторичного сырья позволит существенно снизить удельные расходы электроэнергии (в некоторых случаях до 5% по сравнению с расходами, связанными с получением первичного алюминия). Поэтому замещение первичных алюминиевых сплавов на сплавы, полученные с использованием вторичного сырья, обеспечит снижение себестоимости производства как самих материалов, так и отдельных деталей, узлов и машин в целом.

Существенной проблемой, ограничивающей применение алюминиевых сплавов, полученных с использованием вторичного сырья, являются низкие механические характеристики, связанные с тем, что после переплавки сплавы 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.

Наиболее распространенные методы повышения механических характеристик алюминиевых сплавов, получаемых с использованием вторичного сырья, заключаются в использовании различных комплексных рафинирующе-модифицирующих добавок на стадии плавки. Так, авторы [2] добились повышения предела прочности до 260 МПа, относительного удлинения до 2,8% для сплава, полученного из низкосортных шихтовых материалов. В [3] показана возможность получения алюминиевого сплава АЛ25 из неподготовленной к плавке стружки, содержащей различно-

го рода загрязнения (СОЖ, железосодержащие и неметаллические примеси) с пределом прочности 161 МПа (в термообработанном состоянии). Авторами [4] показан рост циклической долговечности с применением рафинирующе-модифицирующих добавок при изготовлении таких сплавов. Однако в целом вопросы, связанные с повышением характеристик усталости таких материалов, изучены слабо.

В данной работе показана возможность использования термоциклической обработки литейных алюминиевых сплавов, полученных с использованием вторичного сырья для повышения усталостных характеристик этих сплавов, что особенно актуально для деталей и узлов, работающих в условиях разного рода динамических нагрузок.

**Оборудование и методика проведения эксперимента.** Химический состав испытуемого материала по содержанию основных компонентов был близок к сплаву АЛ25 (см. таблицу). Образцы партии 00 были получены плавкой по традиционной технологии под покрывным флюсом (33% KO, 67% NaCl) с продувкой расплава рафинирующим флюсом (45% NaCl, 15% KCl, 40% AlF<sub>3</sub>) с последующей термообработкой Т5. Остальные партии образцов были получены плавкой с добавлением модифицирующе-рафинирующих комплексов, разработанных в Запорожском национальном техническом университете. Образцы партии 10 подвергали термообработке по режиму Т1, образцы партии 20 – термообработке по режиму Т5, образцы партии 30 – термоциклической обработке [5].

**Химический состав и механические характеристики образцов**

Номер партии образцов	Содержание элементов, мас. %					Механические характеристики			
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	HRB	$N_u$
00	10,5	1,67	1,62	0,33	0,61	118,2	1,7	77,2	$4,3 \cdot 10^5$
10	10,5	1,52	1,70	0,33	0,58	144,5	1,9	81	$7,1 \cdot 10^5$
20	10,65	1,54	1,65	0,32	0,58	159,2	1,7	84,5	$7,8 \cdot 10^5$
30	10,63	1,52	1,68	0,35	0,56	172,8	1,8	85	$9,2 \cdot 10^5$

Термоциклическую обработку образцов партии 30 осуществляли по следующей схеме: термоциклирование до закалки, закалка и старение, которое проводили путем термоциклирования, причем нагрев в каждом цикле старения осуществляли с одновременным наложением ультразвуковых колебаний. Термоциклирование до закалки проводили в интервале температур 350–525 °С со скоростью нагрева 1–3 °С/с и охлаждения 3–5 °С/с

при количестве циклов 15, а старение путем термоциклирования проводили в интервале температур 20–220 °С со скоростью нагрева 1–3 °С/с и охлаждения 2,0–10,0 °С/с при количестве циклов 12.

Меньшее число циклов нагрева-охлаждения (менее 10) при старении не приводит к существенному увеличению усталостной долговечности литейных алюминиевых сплавов, полученных из вторичного сырья (сказывается большое число примесей), повышение числа таких циклов свыше 20 приводит к снижению усталостной долговечности вследствие повышения внутренних напряжений в материале.

Снижение температуры нагрева менее 220 °С также существенно не влияет на характеристики усталости таких сплавов, а повышение температуры выше 250 °С приводит к значительному уменьшению усталостной долговечности из-за повышенной коагуляции выделенных фаз. Температура охлаждения 20 °С выбрана как температура окружающей среды по экономическим причинам.

После термической обработки определяли ряд механических характеристик: предел прочности  $\sigma_b$ , относительное удлинение  $\delta$ , циклическую долговечность  $N_u$  при частоте испытаний 18 кГц и нагрузке  $0,6\sigma_T$ . Циклическую долговечность определяли при нагружении знакопеременным изгибом до разрушения образцов или достижения усталостной трещины заданного размера.

Для проведения усталостных испытаний на высоких частотах нагружения (18 кГц) использовали магнитострикционную установку, работающую 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 присоединяли стержень переменного сечения – концентратор, который в свою очередь был связан с образцом. Все геометрические параметры 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 [6].

Для проведения усталостных испытаний на низкой частоте (0,3 кГц) использовали испытательную установку на базе электродинамического вибростенда типа ВЭ [6], которая также работала в резонансном режиме.

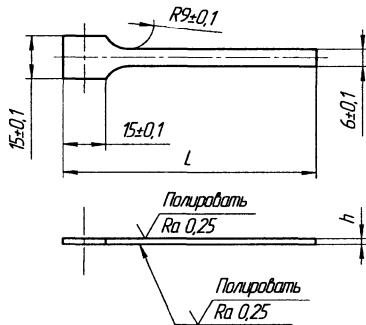


Рис. 1. Геометрические параметры образца для усталостных испытаний

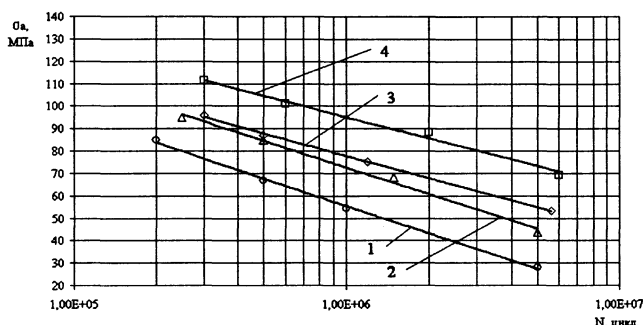


Рис. 2. Результаты усталостных испытаний (нагружение знакопеременным изгибом на частоте 18 кГц) различных партий образцов из сплава, полученного с использованием вторичного сырья: 1 – образцы партии 00; 2 – 10; 3 – 20; 4 – образцы партии 30

Образцы представляли собой балочки прямоугольного сечения 2×6 мм с хвостовой частью для консольного закрепления. С целью смещения области разрушения от заделки на образцах был выполнен галтельный переход, несколько увеличивающий их поперечное сечение (рис. 1). Длину и толщину образца выбирали в зависимости от резонансной частоты и формы колебаний.

**Анализ результатов испытаний.** Результаты усталостных испытаний показали, что введение рафинирующе-модифицирующих комплексов, разработанных в Запорожском национальном техническом университете, приводит к повышению целого ряда механических характеристик (см. таблицу), а предлагаемая термоциклическая обработка существенно повышает усталостную долговечность при сохранении пластичности и прочности материала (рис. 2).

Для изломов, полученных при усталостных испытаниях, был проведен фрактографический анализ снимков, выполненных при помощи сканирующего микроскопа JEOL.

Для образцов из сплава, полученного без использования в качестве добавки рафинирующе-модифицирующего комплекса, в очаге разрушения можно наблюдать зону сдвига, ориентированную под некоторым углом к плоскости излома

(рис. 3), при этом обращает на себя внимание большое количество микротрещин. В зоне роста трещины участки циклического скола становятся все более крупными. Это связано с тем, что вблизи очага разрушения из-за малого уровня напряжений в устье трещины скольжение происходит по одной из кристаллографических плоскостей. Изменение технологии выплавки сплавов в значительной мере меняет картину усталостного разрушения (рис. 4). Из рисунка видно, что на всех стадиях разрушения развитие трещины сопровождается определенной пластической деформацией, о чем свидетельствует преобладание ямочного микрорельефа и большое количество полос скольжения. В зоне усталостного разрушения участки циклического скола почти не встречаются. Это свидетельствует о большей циклической деформации на поверхности излома сплава, полученного с использованием рафинирующе-модифицирующего комплекса, а следовательно, о лучшем сопротивлении данного материала развитию трещины, что и подтверждается результатами усталостных испытаний.

Электронно-микроскопические исследования образцов, обработанных по предлагаемой методике термоциклирования, показали, что полученная микроструктура препятствует образованию скоплений дислокаций и возникновению полос скольжения, субмикро- и микротрещин на ран-

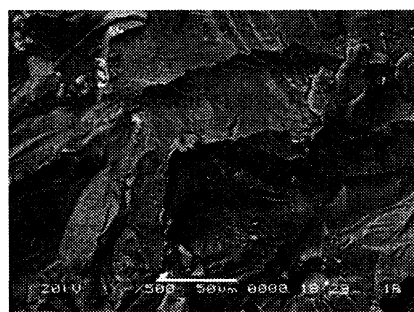


Рис. 3. Усталостный излом сплава, полученного без обработки рафинирующе-модифицирующим комплексом при частоте испытаний 0,3 кГц. ×500

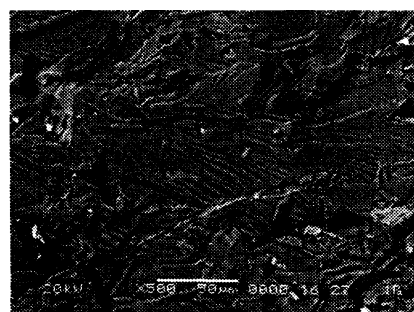


Рис. 4. Усталостный излом сплава, полученного с использованием рафинирующе-модифицирующего комплекса при частоте испытаний 0,3 кГц. ×500

### Выводы

них 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, загрязненных включениями железа. Исследования подобных сплавов с различным содержанием железа показали, что такой вид обработки эффективен при содержании до 1,5–1,7% Fe. При содержании железа 2% и более эффективность термоциклической обработки существенно снижается.

Применение термоциклической обработки на вторичных сплавах оказалось весьма эффективным, поскольку она обеспечивает более равномерное распределение интерметаллидных фаз по объему исследуемого материала, а также благоприятное распределение внутренних напряжений.

Предлагаемая термоциклическая обработка была опробована и на других литейных сплавах, полученных с использованием вторичного сырья. Во всех случаях отмечался существенный рост усталостных характеристик.

На основании комплексного анализа микроструктуры и механических свойств, в первую очередь усталостных характеристик, совместно со специалистами ЗНТУ было проведено не только совершенствование состава и технологии использования рафинирующе-модифицирующих комплексов, позволяющих получить сплавы с высокими механическими характеристиками и литейными свойствами. Предложено совершенствование технологии термической обработки, что обеспечивает стабильное повышение усталостных характеристик литейных алюминиевых сплавов, полученных с применением вторичного сырья, содержащего значительное количество железа. Тем самым, существенно расширяется номенклатура изделий, изготавливаемых из таких сплавов, что подтверждается результатами опытно-промышленных плавов, проведенных на РУП «МТЗ» и ПРУП «ММЗ». В ОАО «БЕЛНИИЛИТ» изготовлена из алюминиевых сплавов, полученных с использованием вторичного сырья, и поставлена в эксплуатацию партия поршней и радиаторов, работающих в условиях статического и динамического нагружения, а также при повышенных температурах.

### Литература

1. Ефименко Г. Г., Михеева И. Г., Павлышин Т. Н. Сталь и альтернативные материалы. Проблемы экономики и экологии // *Металл и литье Украины*. 1997. № 8–9. С. 3–8.
2. Рязанов С. Г., Митяев А. А., Волчок И. П. Повышение качества вторичных силуминов // *Литье и металлургия*. 2003. № 3. С. 90–92.
3. Митяев А. А., Волчок И. П., Лоза К. Н. Повышение качества переплава загрязненной алюминиевой стружки // *Литье и металлургия*. 2009. № 3. С. 122–126.
4. Блохин А. В., Вельский С. Е., Царук Ф. Ф. Исследование характеристик усталости вторичных литейных алюминиевых сплавов // *Тр. БГТУ. Сер. П. Лесная и деревообаб. пром-сть*. Мн., 2007. Вып. XV. С. 200–205.
5. Пат. 12582 Республика Беларусь: МПК 2006 С 22 F 1/04.
6. Блохин А. В., Царук Ф. Ф., Гайдук Н. А. Комплекс оборудования для усталостных испытаний элементов технологического оборудования // *Тр. БГТУ. Сер. П. Лесная и деревообаб. пром-сть*. Мн., 2002. Вып. X. С. 213–215.