

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УСТАЛОСТИ ВТОРИЧНЫХ ЛИТЕЙНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

The article considers the influence of different factors on fatigue characteristics of foundry aluminium alloys, obtained from aluminium scrap and production wastes. The analysis of fatigue breakdown fractography is given, and the way of increasing of mechanical characteristics of such materials is shown here.

Введение. Алюминиевые сплавы по объемам производства занимают второе место после сплавов, полученных на основе железа. При этом следует отметить, что получение первичного алюминия требует примерно на порядок выше затрат по сравнению с производством стали [1]. Применение вторичного алюминия, наряду с возможностью снижения энергетических затрат до 20 раз [2], позволяет эффективно использовать алюминиевый лом и отходы, получаемые как в процессе производства различных изделий, так и после окончания срока их эксплуатации. Так, парк автотранспорта, насчитывающий 1 млн. автомобилей, при скорости их рециркуляции 5% и содержании около 120 кг алюминиевых сплавов на одну единицу ежегодно дает прирост лома данных материалов около 6 тыс. т онн. Серьезными источниками вторичных алюминиевых сплавов являются также авиационная промышленность, сельскохозяйственная и бытовая техника, пищевая промышленность и др. Это особенно актуально для Республики Беларусь, т. к. запасами алюминиевых руд она не обладает. По последним данным [3], в Европе около 200 заводов занимаются переработкой вторичного алюминия, при этом производство вторичных алюминиевых сплавов растет быстрее, чем производство первичных.

В современном лесозаготовительном процессе используется широкий спектр автотранспорта и других специализированных машин, осуществляющих валку деревьев, трелевку древесины, выполняющих другие работы, ряд деталей узлов которых изготавливается из литейных алюминиевых сплавов. Причем многие из них работают в условиях сложного нагруженного состояния и испытывают в процессе эксплуатации значительные динамические нагрузки. Замещение первичных алюминиевых сплавов на сплавы, полученные из вторичного сырья, позволило бы получить значительный экономический эффект при изготовлении такого рода машин.

Однако несовершенство технологии переработки приводит к тому, что не обеспечивается необходимое качество вторичных сплавов. После переплавки они характеризуются широкими интервалами содержания основных ком-

понентов, 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. Для решения данной задачи необходимо создание эффективных и экономичных технологий переработки вторичного сырья, обеспечивающих необходимую чистоту металла по неметаллическим включениям, формирование однородных структур, высоких механических и служебных свойств. Обеспечение высокого качества вторичных алюминиевых сплавов возможно в результате тщательной сортировки алюминиевого лома и применения эффективных технологий плавки, рафинирования и модифицирования. 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 актуально для деталей и узлов, работающих в условиях разного рода динамических нагрузок.

С этой целью были проведены усталостные испытания при изгибе различных партий образцов, изготовленных из вторичных алюминиевых сплавов на разных частотах нагружения.

1. Методика проведения усталостных испытаний. Для проведения испытаний на высокой (18,0 кГц) частоте использовалась магнито-стрикционная установка, работающая в автоколебательном режиме [4].

Активным элементом усталостной установки являлся магнито-стрикционный пакет, выполненный в виде замкнутого контура, набранного из тонких листов активного материала (никеля, пермендюра и т. п.). Механические колебания пакета возникают под воздействием переменного магнитного поля, возбуждаемого высокочастотным генератором. Эффективная работа магнито-стрикционного преобразователя обеспечивалась оптимальным уровнем подмагничивания постоянным полем.

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.

Для повышения достоверности результатов испытаний появляется необходимость в стабилизации амплитуды колебаний в процессе нагружения. Особенно остро этот вопрос стоит при использовании резонансного режима, так как изменение амплитуды колебаний может быть вызвано как изменением акустической мощности, подводимой к образцу, так и несовпадением частоты механического резонанса колебательной системы, обладающей острой характеристикой, с частотой тока генератора применяемого в схеме с независимым возбуждением. В связи с этим используются установки с автоколебательным режимом работы, позволяющие по изменению резонансной частоты отслеживать кинетику поврежденности образца [5, 6].

Для проведения усталостных испытаний на низкой частоте (0,3 кГц) использовалась испытательная установка на базе электродинамического вибростенда типа ВЭ [4], 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.

Химический состав испытуемого материала был близок к составу сплава АК9М2 (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) и последующей термообработкой Т5. Остальные партии образцов были получены плавкой с различным содержанием модифицирующе-рафинирующих комплексов, разработанных в Запорожском национальном техническом университете (ЗНТУ, Украина), и последующей термообработкой Т5. После термообработки с целью снятия верхнего дефектного слоя и получения необходимой величины шероховатости (Ra ~ 0.32 мкм) рабочие поверхности образцов подвергали электролитическому полированию.

Перед проведением усталостных испытаний для этой партии образцов были определены

основные механические характеристики (табл. 2).

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
5	10,5	1,62	1,68	0,33	0,40

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	$0,74 \cdot 10^{11}$
5	160,5	1,8	92,3	$0,74 \cdot 10^{11}$

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 (рис. 1, 2). 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).

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 (рис. 3). Сравнивая расположение кривых на рис. 3 с расположением кривых на рис. 1 и 2, можно отметить, что применение рафинирующе-модифицирующего комплекса позволяет значительно снизить содержание первичного алюминия без ухудшения усталостных характеристик.

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

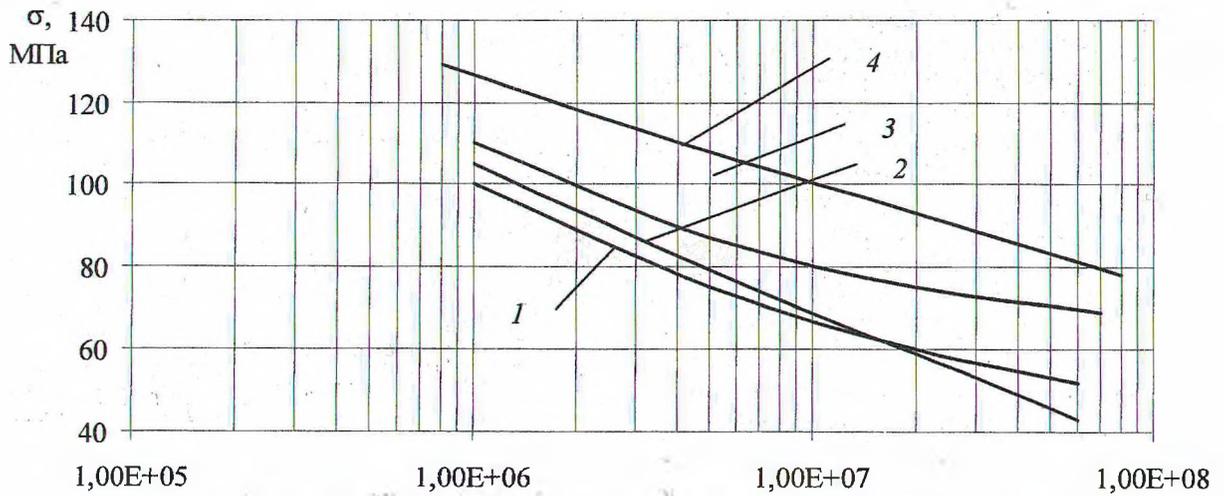


Рис. 1. Результаты усталостных испытаний на частоте 0,3 кГц сплава АК9М2, выплавленного с различным содержанием в шихте вторичных материалов: 1 – 100%; 2 – 80%; 3 – 60%; 4 – 40%

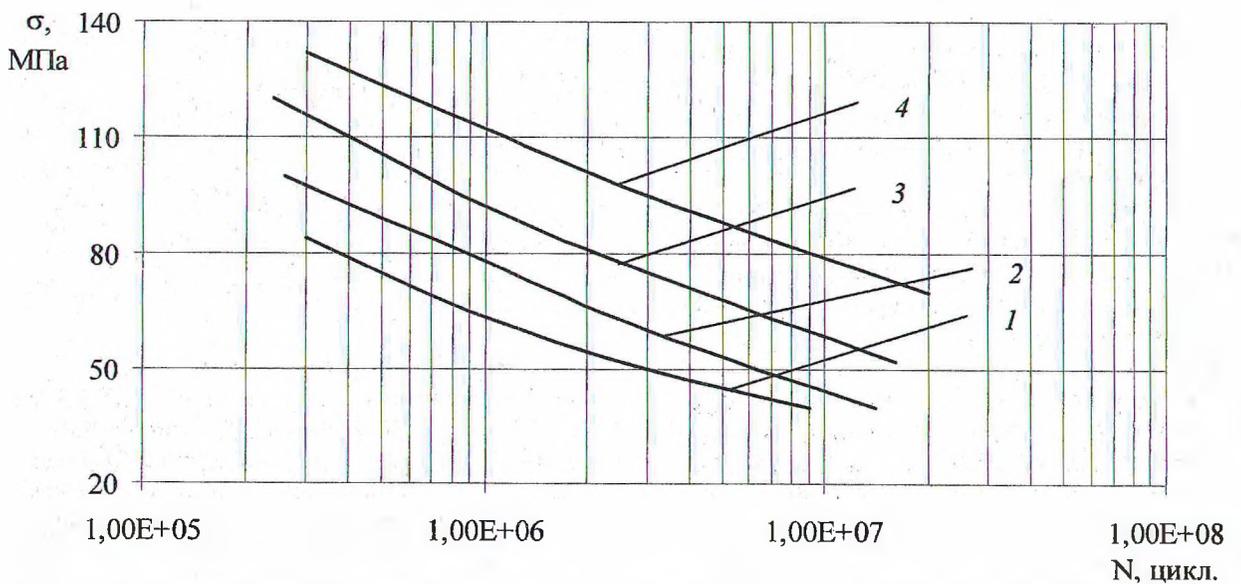


Рис. 2. Результаты усталостных испытаний на частоте 18 кГц сплава АК9М2, выплавленного с различным содержанием в шихте вторичных материалов: 1 – 80%; 2 – 60%; 3 – 40%; 4 – 20%

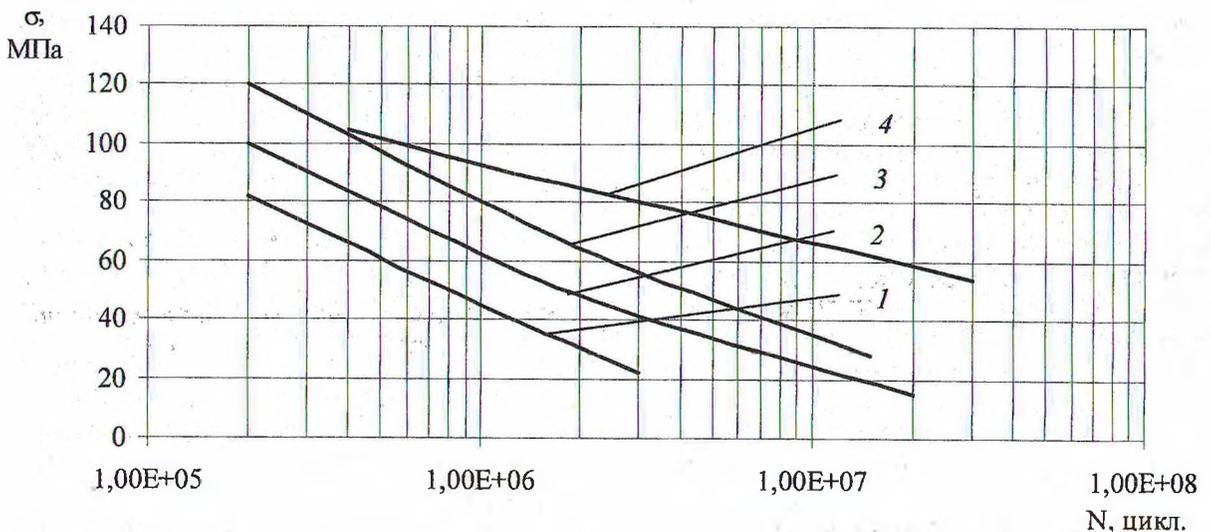


Рис. 3. Результаты усталостных испытаний на частоте 0,3 кГц (1, 2) и 18 кГц (3, 4) сплава АЛ25 (АК9), выплавленного из лома (алюминиевая стружка): 1, 3 – без обработки рафинирующее-модифицирующим комплексом; 2, 4 – с обработкой

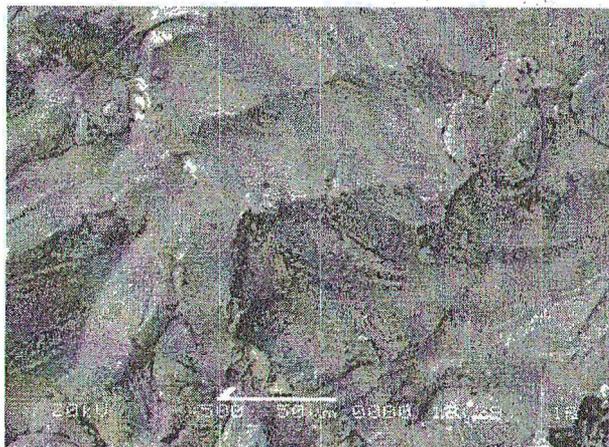
На образцах видны поры и неметаллические включения (рис. 4, 5), несомненно являющиеся концентраторами напряжений и снижающие усталостные характеристики материалов. Следует отметить, что у образцов, полученных из сплава с добавлением рафинирующе-модифицирующего комплекса, размер пор существенно меньше.

Для всех рассматриваемых образцов в связи с повышенной хрупкостью литейного сплава характерны участки циклического скола. Долом в большинстве случаев происходит по механизму межзеренного хрупкого разрушения.

Для образцов из сплава, полученного без использования в качестве добавки рафинирующе-модифицирующего комплекса, испытанных на низкой частоте, в очаге разрушения можно наблюдать зону сдвига, ориентированную под некоторым углом к плоскости излома (рис. 4).



a



б

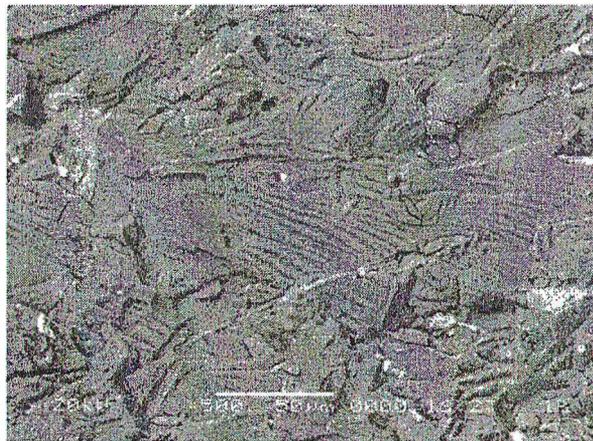
Рис. 4. Усталостный излом сплава, полученного по традиционной технологии при частоте испытаний 0,3 кГц: *a* – $\times 50$; *б* – $\times 500$

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 скользящее происходит по одной из кристаллографических плоскостей.

При дальнейшем росте трещины скольжение охватывает все новые и новые плоскости и происходит по всему зерну. На участках циклического скола можно наблюдать усталостные бороздки. На рис. 6 показано, как по крупным иглам железосодержащих фаз проходит усталостная трещина.

Изменение технологии выплавки сплавов в значительной мере меняет картину усталостного разрушения (рис. 5).



a



б

Рис. 5. Усталостный излом сплава, полученного с использованием рафинирующе-модифицирующего комплекса при частоте испытаний 0,3 кГц: *a* – $\times 50$; *б* – $\times 500$

На данных сканограммах показано, что на всех стадиях разрушения развитие трещины сопровождается определенной пластической деформацией, о чем свидетельствуют 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 подтверждается результатами усталостных испытаний. Применение рафинирующе-модифицирующих комплексов обеспечило не только дробление фаз Al_3Fe , но и лучшую связь игл железосодержащей фазы с матрицей. Как следствие, усталостная трещина в большей степени проходит по основной матрице, пересекает железосодержащие иглы под большими углами (рис. 7).



Рис. 6. Усталостная трещина на поверхности образца, полученного по традиционной технологии (x500)



Рис. 7. Усталостная трещина на поверхности образца, полученного с использованием рафинирующе-модифицирующего комплекса (x500)

Выводы. Таким образом, на основании комплексного анализа микроструктуры и механиче-

ских свойств, в первую очередь усталостных характеристик, совместно со специалистами ЗНТУ проведено совершенствование состава и технологии использования рафинирующе-модифицирующих комплексов. Усталостные свойства сплавов типа АК9М2, АК9, АК8М3, выплавляемых полностью из лома и стружки, близки к сплавам аналогичного состава, содержащим до 40–60% первичного алюминия; кроме того, улучшена их жидкотекучесть и существенно снижена пористость отливок. Тем самым существенно 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 поставлена в эксплуатацию партия поршней и радиаторов, работающих в условиях статического и динамического нагружения, а также при повышенных температурах.

Литература

1. Беликов, С. Б. Современные конструкционные материалы – основа высоких технологий / С. Б. Беликов, И. П. Волчок // Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Харків: НТУ «ХПІ», 2001. – С. 16–20.
2. 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.
3. Broad A. Short straw for secondary smelters? // Metal Bull. – 1997. – № 8187. – P. 64–65.
4. 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 деревообаб. пром-сть. – 2002. – Вып. X. – С. 213–215.
5. Блохин, А. В. Развитие комплекса оборудования для усталостных испытаний конструкционных материалов / А. В. Блохин // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообаб. пром-сть. – 2004. – Вып. XII. – С. 263–266.
6. Блохин, А. В. Определение степени циклической поврежденности алюминиевых сплавов по изменению резонансной частоты колебаний системы / А. В. Блохин, С. Е. Бельский, Ф. Ф. Царук // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообаб. пром-сть. – 2005. Вып. XIII. – С. 213–215.