

С.Е. Бельский, доц., канд. техн. наук;  
А.В. Блохин, доц., канд. техн. наук;  
М.Н. Пищов, доц., канд. техн. наук;  
А.И. Сурус, доц., канд. техн. наук  
(БГТУ, г. Минск)

## **ВЛИЯНИЕ ФИНИШНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ОБРАЗЦОВ ИЗ ВТОРИЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ НА ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТАЛОСТИ**

Некоторые детали машин, работающие в условиях циклического нагружения изготавливаются из алюминиевых сплавов. В настоящее время значительная часть деталей, особенно изготавливаемая методом литья, производится из сплавов, содержащих вторичное сырье (сплавы типа АК9М2, АК8М3 и др.). Такие материалы имеют большое количество интерметаллидных фаз, неметаллических включений, растворимых газов; для них характерна гетерогенность структуры. Усталостные характеристики таких материалов значительно уступают свойствам первичных алюминиевых сплавов, что существенно ограничивает возможность использования вторичных сплавов для изготовления деталей машин, работающих в условиях циклического нагружения.

Проведенные нами исследования и анализ литературы [1–4] показали, что усталостные характеристики многих конструкционных материалов могут быть повышены с помощью 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  $CuAl_2$ , 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  $-130^{\circ}\text{C}$ -  $+230^{\circ}\text{C}$  со скоростью нагрева  $5,0^{\circ}\text{C}/\text{сек}$  и скоростью охлаждения с различным количеством циклов (4-10). Операция нагрева в каждом цикле совмещалась с наложением колебаний частотой 18 кГц и интенсивностью  $(0,3-0,4)\sigma_T$  сплава. Совместное воздействие в ходе такой обработки термонаклепа и наклепа под действием колебаний способствовало созданию определенного типа дислокационной структуры, блокирующей рост зародышей вы-

деляющихся 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  $f = 18\text{кГц}$ . Число циклов определялось до разрушения образца.

Проведенные усталостные испытания показали, что обработка образцов по способу термоциклирования существенно повышает усталостную долговечность [5] при сохранении пластичности и прочности материала. Предложенная циклическая обработка при старении способствует образованию большого количества зон Гинье-Престона и выделению мелкодисперсной  $\text{CuAl}_2$  - фазы. Количество крупных выделений при этом уменьшается.

Проведение нагрева с использованием высокочастотных знакопеременных колебаний способствует как измельчению выделений, равномерному распределению термических напряжений по сечению, так и фазовому наклепу, что благоприятно влияет на прочность и твердость материала. Использование низкой температуры препятствует коагуляции выделяющихся при старении фаз.

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, для вторичных литейных алюминиевых сплавов усталостная долговечность может повышаться в результате дробления участков железосодержащих фаз, прежде всего  $\text{Al}_3\text{Fe}$ , что особенно важно при термической обработке сплавов содержащих до 1,5-1,7 % Fe.

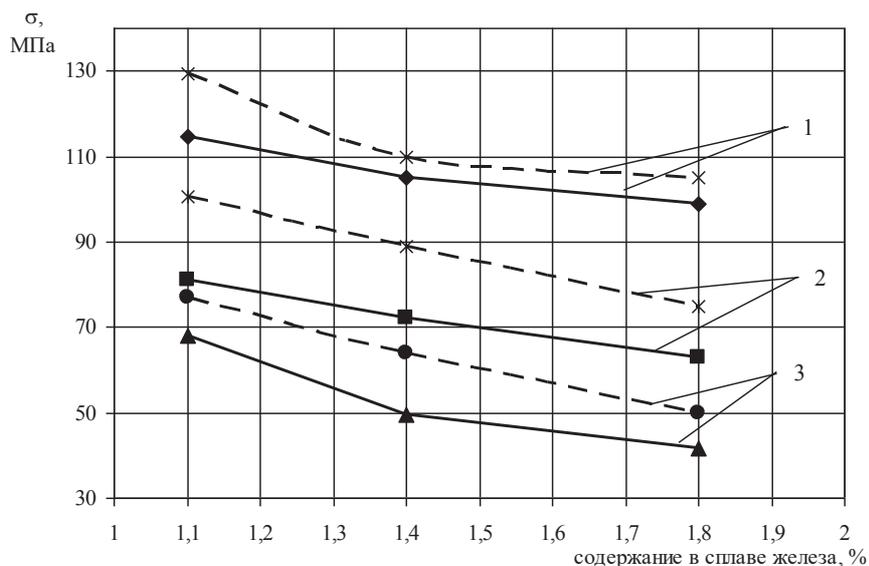
Полученные результаты показали, что уменьшение числа циклов в интервале температур  $-130^\circ\text{C} \pm 230^\circ\text{C}$  (менее 4) приводит к недостаточной степени измельчения выделяющихся при старении фаз; повышение числа таких циклов (свыше 10) приводит к образованию повышенных внутренних напряжений 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).

Температура нагрева (ниже  $190^\circ\text{C}$ ) приводит к недостаточно полному протеканию процесса старения, в связи с чем снижаются

прочность, твердость и усталостная долговечность. Повышение температуры свыше 230°C приводит к некоторому снижению прочности сплава. Понижение температуры охлаждения затрудняет протекание процесса старения, а ее повышение способствует коагуляции выделяющихся фаз, что также снижает усталостную долговечность.

На приведенный режим ТЦО получен патент Республики Беларусь № 12562 [5].

Применение термоциклической обработки на вторичных сплавах, как и предполагалось, оказалось еще более эффективным чем на первичных (см. рисунки 1–3), поскольку она обеспечивает более равномерное распределение интерметаллидных фаз по объему исследуемого материала. Термоциклическая обработка вторичных сплавов способствует более равномерному распределению термических напряжений и дроблению железосодержащих фаз, прежде всего  $Al_3Fe$  (снижение среднего значения параметра формы интерметаллидов  $\lambda$  с 3,94-4,21 до 2,73-3,21). В результате усталостные характеристики сплавов АК9М2 и АК8М3 повышаются в 1,4-1,5 раза.



1 –  $1 \cdot 10^6$  цикл.; 2 –  $1 \cdot 10^7$  цикл.; 3 –  $1 \cdot 10^8$  цикл.

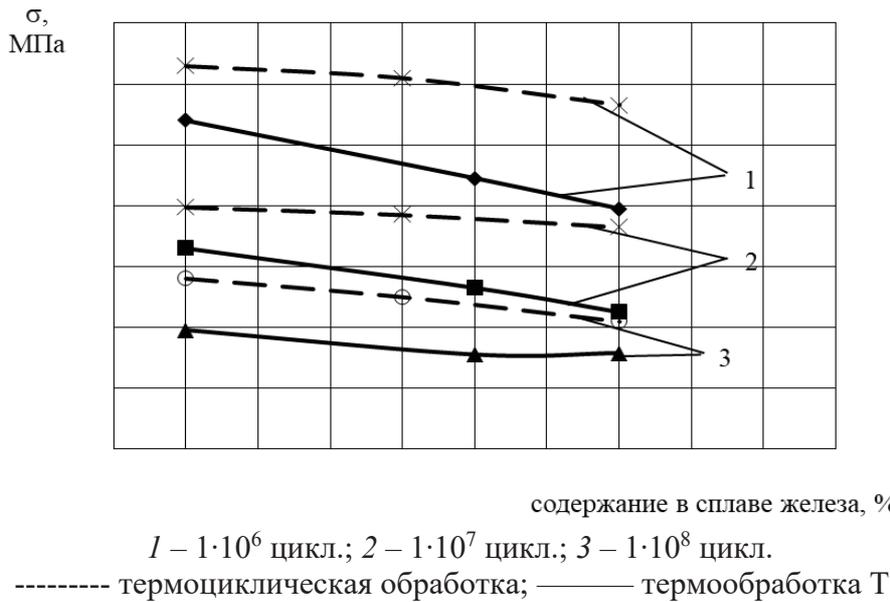
----- термоциклическая обработка; ——— термообработка Т5

**Рисунок 1 – Пределы ограниченной выносливости образцов для испытаний из сплава АК5М4 с различным содержанием Fe и термообработкой, частота испытаний – 18 кГц**

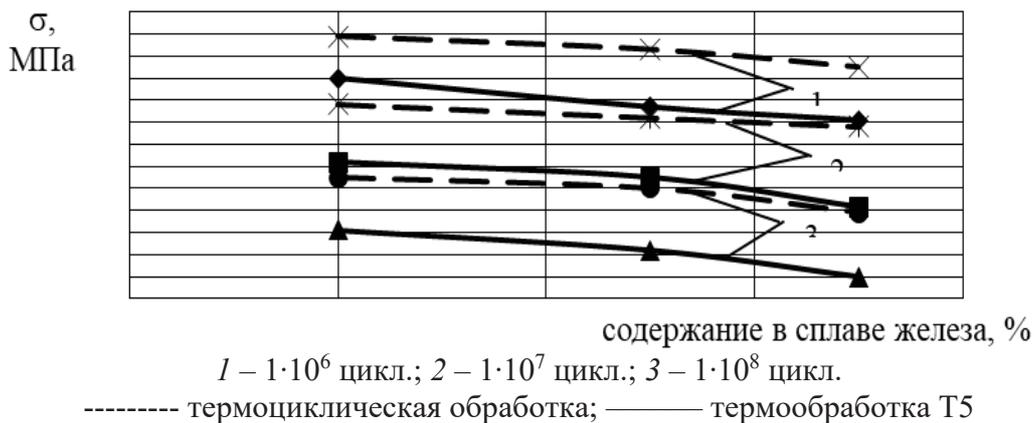
Проведенные фрактографические исследования образцов сплава АК8М3, содержащего различное количество железа показали, что при использовании РМК в рекомендованных количествах характер изломов при различном содержании железа существенно не изменяется (рис. 4) сопровождалось определенной пластической деформацией,

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.

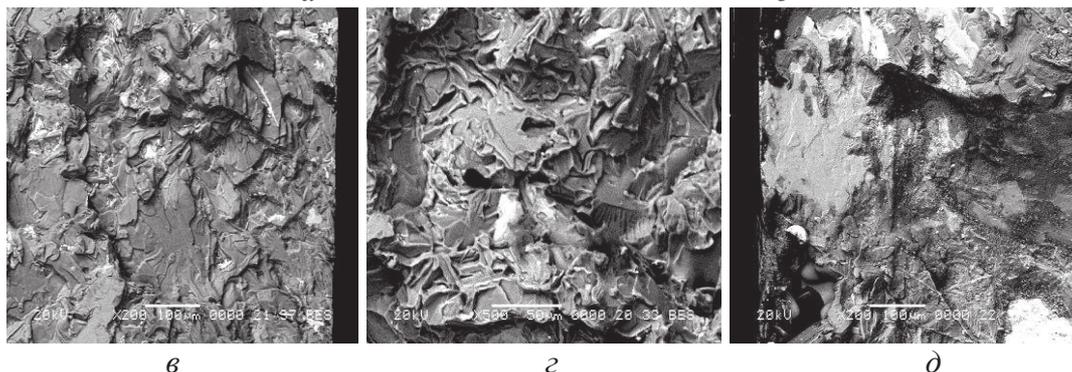
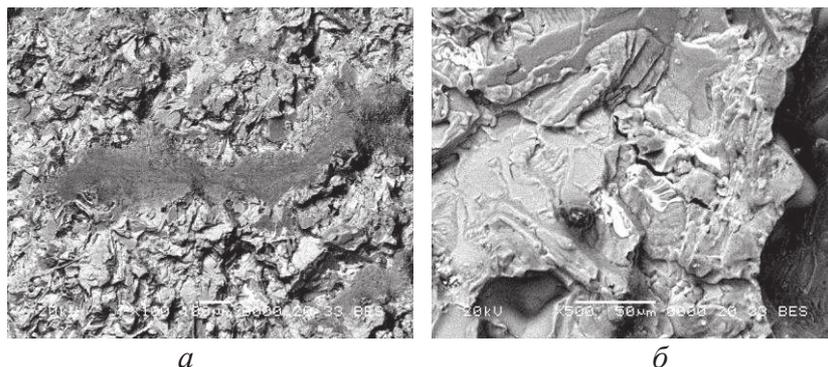
Таким образом, предлагаемая технология обеспечивает достаточно стабильные усталостные характеристики материала при различном количестве железа, что подтверждается и результатами испытаний сплавов АК5М5, АК9М2 и АК9.



**Рисунок 2 – Пределы ограниченной выносливости образцов для испытаний из сплава АК9 с различным содержанием Fe и термообработкой, частота испытаний – 18 кГц**



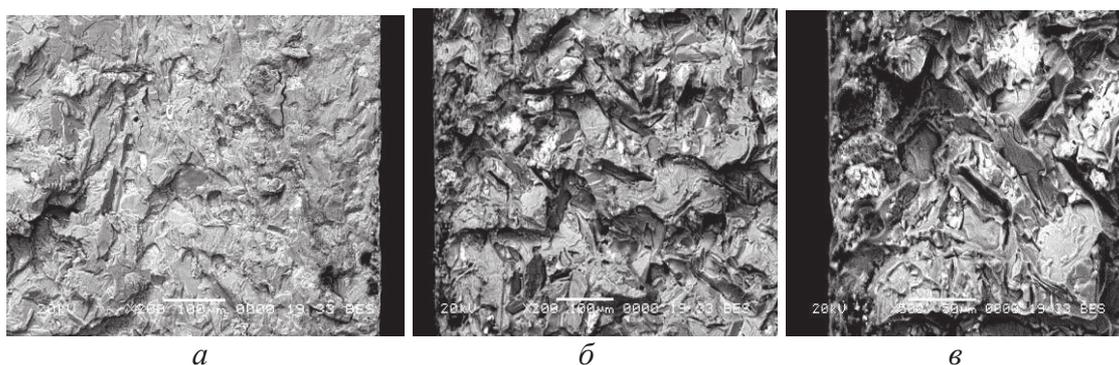
**Рисунок 3 – Пределы ограниченной выносливости образцов для испытаний из сплава АК9М2 с различным содержанием Fe и термообработкой, частота испытаний – 18 кГц**



*a* – 0,40 % Fe; *б* – 0,64 % Fe; *в* – 0,92 % Fe; *г* – 1,15 % Fe; *д* – 1,45 % Fe

**Рисунок 4 – Усталостные изломы сплава АК8М3, изготовленного с использованием рафинирующее-модифицирующего состава прошедшего ТЦО и содержащего различное количество железа**

Стабильность усталостных характеристик полученных материалов подтверждается усталостными испытаниями с различным уровнем напряжений. Как видно из сканограмм с повышением  $\sigma$  от 60,5 до 115 МПа характер разрушения материала не изменяется. Элементов межзеренного хрупкого разрушения и участком циклического скола практически не наблюдалось.



*a* –  $\sigma_N = 60,5$  МПа; *б* –  $\sigma_a = 80,5$  МПа; *в* –  $\sigma_a = 115$  МПа

**Рисунок 5 – Усталостные изломы сплава АК9М2, изготовленного с использованием рафинирующее-модифицирующего состава прошедшего ТЦО и полученные при испытаниях с различным уровнем напряжений**

Таким образом, предложенная технология введения РМС (0,06-0,08 %) с ТЦО обеспечивает стабильное повышение усталостных характеристик широкой номенклатуры вторичных литейных алюминиевых сплавов (АК9, АК5М4, АК8М3, АК9М2), содержащих значительное количество железа (в том числе и выплавленных из стружки) при испытаниях с различным уровнем напряжений (Рисунок 5).

Для установления возможности изготовления из таких материалов изделий, работающих при сочетании статических и циклических нагрузок широкого амплитудно-частотного диапазона, необходимо изготовление в условиях действующего производства опытной партии деталей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Федюкин В.К., Смагоринский М.Е. Термоциклическая обработка металлов и деталей машин. Л.: Машиностроение, 1989. – 255 С.
2. Тофпенец Р.Л., Шиманский И.И., Анисович А.Г., Грешилов А.Д. Физические основы термоциклической обработки стареющих сплавов. – Мн.: Навука і тэхніка, 1992. – 190 С.
3. Васильева Л.А., Малашенко Л.М., Мусохринов Ю.М. и др. Термоциклическая обработка сплава АМг6.//Металловедение и термическая обработка металлов, 1983, – № 12, – С. 19–22.
4. Падзоров Б.Н., Смагоринский М.Е. Термоциклическая обработка алюминиевых сплавов //Новое в металловедении с термической обработкой металлов: тез. докл. всесоюзной научно-технической конференции. – М., 1979, ч.2. – С. 253.
5. Способ термической обработки литейных алюминиевых сплавов из вторичного сырья: пат. 12582 Респ. Беларусь, МПК С 22 F 1 / 04 / А. В. Блохин, С. Е. Бельский; заявитель Белорус. гос. технол. ун-т. – № а 20081099; заявл. 21.08.2008; опубл. 06.08.2009 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуальн. уласнасці. – 2009. – № 5. – С. 93.