

## ВЛИЯНИЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ ФАЗ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ РАЗРУШЕНИЮ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Було проведено дослідження впливу інтерметалідних фаз на механізм руйнування вторинних силумінів.

Было проведено исследование влияния интерметаллидных фаз на механизм усталостного разрушения вторичных алюминиевых сплавов.

Investigation of the influence of intermetallic phases on the mechanism of fatigue fracture of the secondary aluminum alloys was made.

### Вступление

Силумины – литейные алюминиевые сплавы, обладающие хорошим комплексом механических и технологических свойств. В последние годы область их применения значительно расширилась, так что в современном машиностроении детали из силуминов в процессе эксплуатации поддаются влиянию не только статических, но и циклических нагрузок.

Поведение силуминов при циклических нагрузках частично изучено в работах Луговского Ю. Ф. [1] и Митяева А. А. [2, 3]. Однако все ещё мало изучены усталостные процессы во вторичных силуминах с высоким содержанием железа.

*Целью данной работы* было изучение влияния интерметаллидных фаз на усталостное разрушение вторичных силуминов.

### Материалы и методика исследований

В работе исследовался вторичный силумин АК8МЗ. Плавки проводились в электрической печи сопротивления в чугунном тигле. При температуре 710 °С было проведено модифицирование комплексным модификатором [4]. Отливки были термообработаны по схеме: закалка с температуры 500 ± 10 °С и старение при 180 ± 10 °С.

Металлографический количественный и качественный анализ сплава проводился на оптическом микроскопе МИМ-8, испытания на малоцикловую усталость на установке ИП-2 на плоских образцах повторно-переменным изгибом (деформация образцов  $\varepsilon = 0,3\%$ ).

Фрактографические исследования изломов образцов после усталостных испытаний проводились на электронном микроскопе.

### Результаты испытаний

Согласно металлографическим исследованиям сплава АК8МЗ было выделено три типа включений в его структуре:

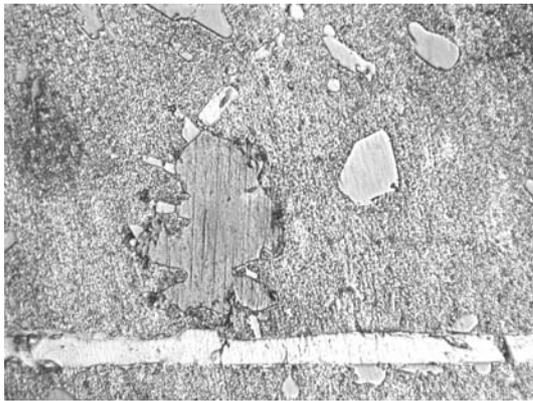
1-й тип – пластинчатые включения светлосерого цвета – фаза  $\beta$  ( $Al_5SiFe$ );

2-й тип – включения формы правильных многогранников коричневого цвета – фаза  $\alpha$  ( $Al_{15}(FeMn)_3Si_2$ ); 0

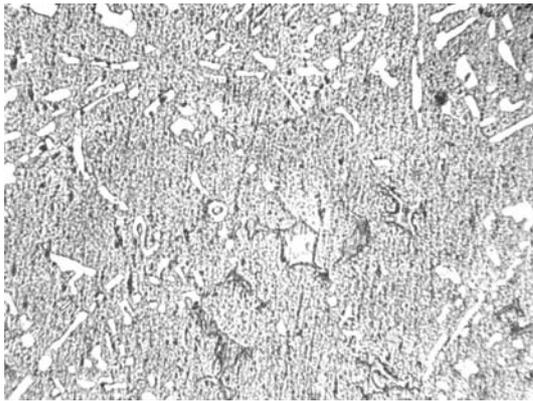
3-й тип – включения серого цвета овальной формы – частички Si или  $\theta$ -фаза ( $CuAl_2$ ).

Изменения морфологии включений в зависимости от содержания железа и присадки модификатора М представлены на рис. 1.

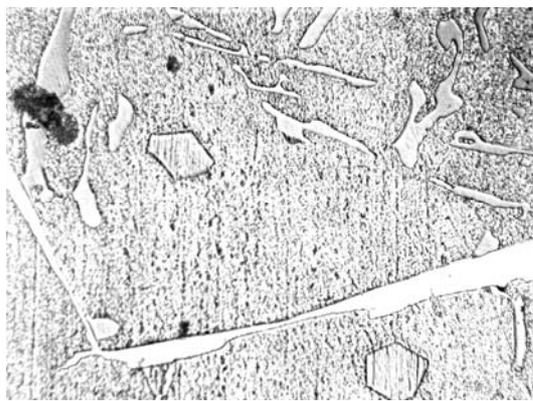
При максимальном содержании железа и минимальной присадке модификатора были получены интерметаллидные фазы наибольшего размера и наиболее неблагоприятной формы. Интерметаллиды  $Al_5SiFe$  ( $\beta$ -фаза) имели форму длинных пластин, средний параметр формы  $\lambda_\beta$  которых составлял 62,3. Включения  $\alpha$ -фазы имели форму многоугольников. Общий параметр формы  $\lambda_{общ}$  включений равнялся 12,6. При минимальном содержании железа и максимальной присадке модификатора размер  $\beta$ -фазы значительно уменьшается и параметр формы  $\lambda_\beta$  составлял 6,98. Форма  $\alpha$ -фазы изменяется на иероглифоподобную. Общий параметр формы включений  $\lambda_{общ}$  снизился до 2,28. При средних значениях содержания железа и присадки модификатора микроструктура сплава находилась в переходном состоянии – встречались как крупные, так и мелкие включения  $\beta$ -фазы, форма включений  $\alpha$ -фазы варьировалась от крупных многогранников до «китайских иероглифов». Параметр формы  $\beta$ -фазы  $\lambda_\beta$  занимал промежуточное значение 7,87, общий параметр формы включений  $\lambda_{общ}$  составлял 2,79.



*a*



*б*



*в*



*г*

Рис. 1. Микроструктура сплава АК8МЗ ( $\times 500$ ):  
*a* – 2,0 % Fe, 0,06%М; *б* – 1,0 % Fe, 0,18 % М;  
*в, г* – 1,5 % Fe, 0,12 % М

Результаты испытаний на малоцикловую усталость показали наличие четкой связи между морфологией интерметаллидных фаз и сопротивлением усталости сплава АК8МЗ. Были рассчитаны коэффициенты корреляции для общего параметра формы  $\lambda_{\text{общ}}$  и параметра формы  $\beta$ -фазы  $\lambda_{\beta}$ . Максимальный коэффициент корреляции ( $-0,97$ ) получен между параметром формы  $\beta$ -фазы  $\lambda_{\beta}$  и числом циклов до разрушения  $N$ . Это говорит о том, что среди микроструктурных составляющих сплава АК8МЗ максимальное влияние на усталостные характеристики сплава имеет интерметаллидная железосодержащая  $\beta$ -фаза. На рис. 2 графически представлена зависимость сопротивления усталости от параметра формы  $\beta$ -фазы  $\lambda_{\beta}$ .

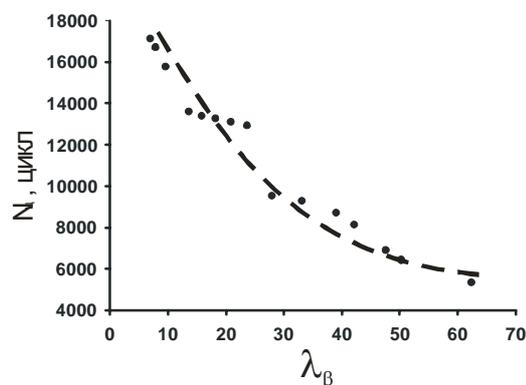


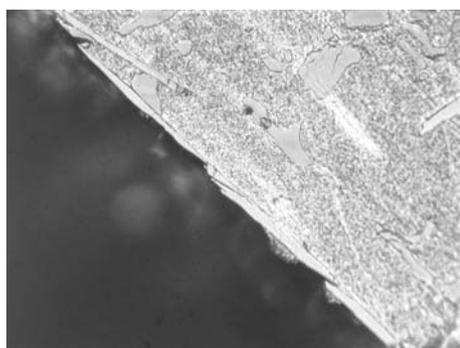
Рис. 2. Зависимость сопротивления усталости сплава АК8МЗ от параметра формы  $\beta$ -фазы  $\lambda_{\beta}$

Из рис. 2 видно, что полученная кривая зависимости имеет асимптотический характер. Это означает, что при увеличении параметра формы  $\beta$ -фазы сопротивление усталости  $N_{\text{ц}}$  снижается до определенного минимального значения и при дальнейшем изменении параметра формы  $\beta$ -фазы изменялось незначительно.

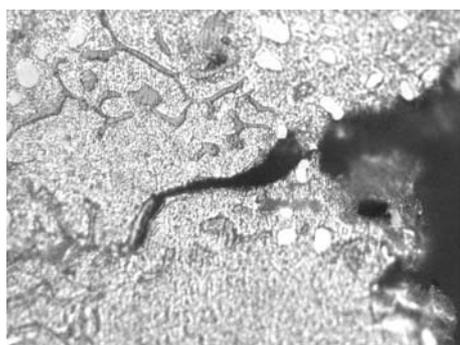
На рис. 3 представлен микродеформационный рельеф сплава АК8МЗ после усталостного разрушения. Как видно из рис. 5 (*a, б*), при наличии в микроструктуре крупных пластин включений  $\beta$ -фазы первые усталостные трещины появлялись именно в них уже через 200...300 циклов нагружения. Это объясняется тем, что  $\beta$ -фаза очень хрупкая. При дальнейшем нагружении трещины из включений переходили в матрицу сплава и, сливаясь в магистральную трещину, разрушали образец. При отсутствии в структуре сплава крупных пластин  $\beta$ -фазы трещина проходила через включения  $\alpha$ -фазы, кремния и  $\theta$ -фазы. Однако в этом случае, т.к. эти включения имеют меньшие размеры и более компактную форму, разрушение образцов происходило значительно позже.



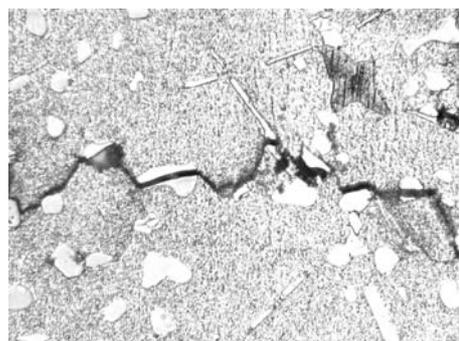
*a*



*б*



*в*

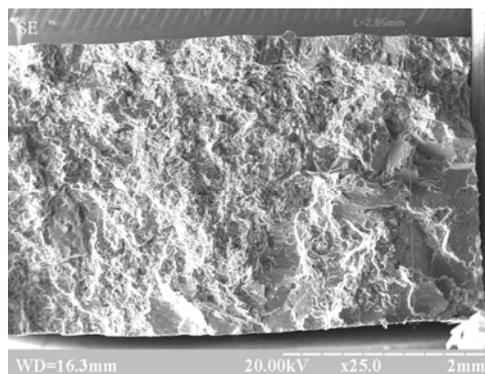


*г*

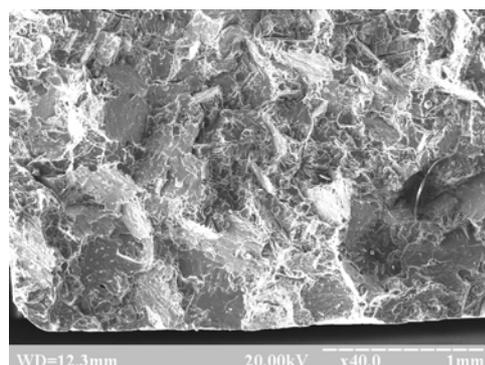
Рис. 3. Микродеформационный рельеф сплава АК8М3 после усталостного разрушения ( $\times 500$ ):  
*a, б* – 2,0 % Fe, 0,06 % M; *в, г* – 1,0 % Fe, 0,18 % M

На рис. 4 представлены фрактограммы изломов разрушенных образцов сплава АК8М3. С повышением присадки модификатора и снижением содержания железа характер излома изменялся с хрупкого на смешанный с преобладанием хрупкой, а затем вязкой составляю-

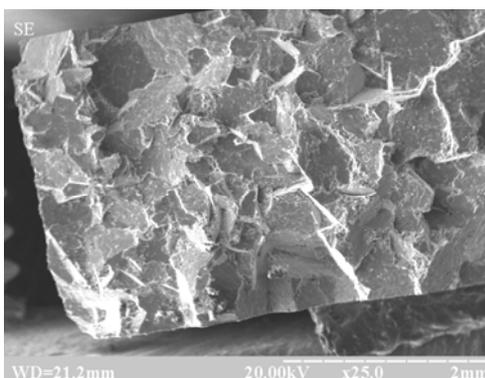
щей. Очевидно, что такие изменения связаны с изменением микроструктуры.



*a*  $\times 25$



*б*  $\times 40$



*в*  $\times 25$

Рис. 4. Фрактограммы изломов сплава АК8М3 после усталостного разрушения:

*a* – 1,0 % Fe, 0,18 % M; *б* – 1,5 % Fe, 0,12 % M;  
*в* – 2,0 % Fe, 0,06 % M

На рис. 5 представлены интерметаллидные включения на поверхности усталостных изломов сплава АК8М3. В центре на рис. 5*a* находится пластинчатое включение  $\beta$ -фазы, которое расслоилось под действием циклических нагрузок. Возле некоторых крупных включений наблюдались ступеньки материала матрицы (рис. 5*б*). Анализ изломов образцов позволил сделать заключение о низкой пластичности  $\beta$ -фазы, что подтверждается растрескиванием пластин её включений (рис. 5*в*). Крупные пла-

стины включений  $\beta$ -фазы также способствовали образованию вторичных трещин (рис. 5з).

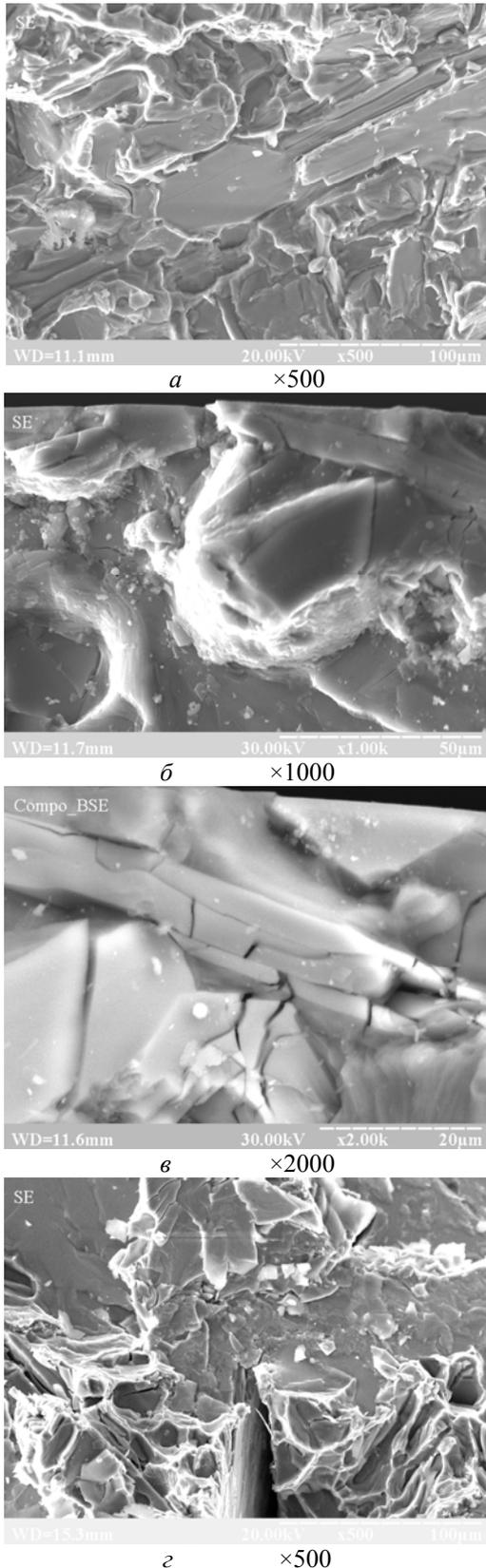


Рис. 5. Изломы сплава АК8МЗ после усталостного разрушения:  
 а, б – 1,0 % Fe, 0,18 % М; в – 1,5 % Fe, 0,12 % М;  
 з – 2,0 % Fe, 0,06 % М

## Выводы

Установлена обратно пропорциональная связь между морфологией интерметаллидных фаз (в частности,  $\beta$ -фазы ( $\text{FeSiAl}_5$ )) и сопротивлением усталости. Исследования показали, что уменьшение параметра формы  $\beta$ -фазы  $\lambda_\beta$  в 8,9 раза привело к росту сопротивления усталости в 3,2 раза. Уменьшение размеров интерметаллидных включений было достигнуто благодаря модифицированию специально разработанным комплексом, позволившим нейтрализовать вредное влияние железосодержащих интерметаллидов и повысить усталостные свойства вторичных силуминов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Луговской, Ю. Ф. Прогнозирование влияния структуры на малоцикловую усталость сплавов на основе алюминия [Текст] / Ю. Ф. Луговской // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 2002. – С. 423-430.
2. Мітяєв, О. А. Підвищення малоциклової втоми вторинних силумінів [Текст] / О. А. Мітяєв, І. П. Волчок // *Стратегія якості у промисловості та освіті: зб. наук. пр.* – Д., 2005. – С. 112-116.
3. Мітяєв, О. А. Малоциклова втома вторинних алюмінієвих сплавів [Текст] / О. А. Мітяєв, І. П. Волчок, С. Г. Рязанов // *Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій / ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України*. – Львів, 2004. – С. 629-632.
4. Пат. 42653 Україна, МКВ С22С 1/00. Модифікатор для алюмінієвих сплавів [Текст] / Волчок І. П., Мітяєв О. А., Островська А. С., Скуйбіда О. Л.; заявник і патентоутримувач Запорізький нац. техн. ун-т. – № 200902454; заявл. 19.03.2009; опубл. 10.07.2009, Бюл. № 13.

Надійшла до редколегії 12.05.2010.  
 Прийнята до друку 23.05.2010.