

НОВЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ ЭВТЕКТИЧЕСКОГО ТИПА С ПОВЫШЕННОЙ ПЛАСТИЧНОСТЬЮ

Наумова Е.А.
НИТУ «МИСус»,
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН, г. Москва, Россия
jan73@mail.ru

Алюминиевые сплавы, сегодня используемые в промышленности, делятся на две большие группы: деформируемые и литейные [1]. Деформируемые сплавы в литом состоянии имеют структуру, состоящую из зерен алюминиевого твердого раствора и небольшого количества избыточных фаз по границам зерен. Литейные свойства таких сплавов невысоки из-за широкого интервала кристаллизации. Из литейных сплавов наиболее широко используются силумины, которые обладают невысокими характеристиками пластичности из-за содержащихся в их структуре хрупких кристаллов кремния [1].

В книге [2] собрана информация об исследованных нами системах (Al-Ni, Al-Ce, Al-Cu, Al-Ni-Ce, Al-Ni-Fe и др.), на основе которых можно создавать сплавы эвтектического типа, высокотехнологичные не только при литье, но и при пластической деформации (горячей и холодной прокатке, штамповке, волочении и др.). Все эти системы эвтектические, а поэтому, имеются сплавы с минимальным интервалом кристаллизации (эвтектические), обладающие наилучшими литейными свойствами. Общим для сплавов всех этих систем является то, что их структура в литом состоянии намного более тонкая, чем у силуминов поэтому, при выплавке, нет необходимости использовать компоненты-модификаторы структуры. Кроме того, объемная доля эвтектических интерметаллидов в эвтектических сплавах намного выше, чем кремния в силуминовой эвтектике. Чтобы эти интерметаллиды не снижали пластичность, сплавы подвергают специальному сфероидизирующему отжигу. После отжига структура сплава напоминает композит – округлые частицы интерметаллидных фаз сравнительно равномерно распределенные в пластичной алюминиевой матрице (алюминиевом твердом растворе (Al)) [2]. Отожженные таким образом слитки можно прокатывать в горячую, а затем, после непродолжительного отжига, и в холодную. Например, сплавы на основе алюминивно-никелевой эвтектики (никалины) можно деформировать с общими обжатиями более 90%. Поскольку никель является дорогостоящим компонентом, весьма актуальной задачей является поиск подобных, но более дешевых композиций.

За последние пять лет интерес исследователей сосредоточился на сплавах систем Al-Ca и Al-Ca-X (где X – это Fe, Si, Mg, Zn, Mn, Zr, Sc и др.).

В системе **Al-Ca** эвтектическая точка соответствует 7,6%Ca при 617°C [2,3]. В доэвтектических сплавах структура состоит из первичных дендритов алюминиевого твердого раствора (Al) и эвтектики [(Al)+Al₄Ca]. Размер частиц фазы Al₄Ca в эвтектике в литом состоянии порядка 0,5-2,5 мкм, дендриты (Al) – порядка 0,5-1,5 мкм. В процессе нагрева от 450 до 600°C каркас из Al₄Ca дробится на округлые фрагменты, размер которых при температурах 550-600°C увеличивается примерно до 3-5 мкм. Такой нагрев (отжиг) необходим для повышения пластичности сплавов, поскольку в литом состоянии в эвтектическом сплаве содержится около 30 масс.% хрупкого соединения Al₄Ca. Технологические свойства доэвтектических и эвтектического сплавов при литье не уступают свойствам силуминов, а в отожженном состоянии эти сплавы также высокотехнологичны при горячей и холодной обработке давлением [4].

Прочностные свойства двойных алюминивно-кальциевых сплавов не высоки: предел прочности порядка 200-220 МПа, при относительном удлинении от 12 до 15%. Поэтому всегда стоит вопрос о том, чем легировать алюминиевый твердый раствор с целью увеличения прочности сплавов. Известно, что весьма эффективно упрочняют твердый раствор алюминия Zr и Sc, которые при дисперсионном твердении образуют наноразмерные частицы фазы типа L₁₂(Al₃Zr, Al₃Sc, Al₃(Zr,Sc)). Также добавка марганца может вносить вклад в упрочнение при выделении частиц фазы Al₆Mn. И хотя марганец не столь эффективно упрочняет твердый раствор, как цирконий и

скандий, но применительно к сплавам системы Al-Ca нами был установлен факт, что он повышает дисперсность эвтектики. Цирконий и скандий входят в алюминиевый твердый раствор в процессе кристаллизации и не оказывают какого-либо влияния на вид литой структуры. При дальнейших технологических нагревах алюминиевый твердый раствор распадается с выделением наноразмерных соединений циркония и скандия, что и приводит к упрочнению. При этом отсутствует необходимость проводить закалку, что сокращает технологический процесс [5]. Сплавы системы Al-Ca-Mn-Zr-Sc имеют литейные свойства (горячеломкость и жидкотекучесть) не хуже, чем двойные Al-Ca сплавы (Рис.1а). Кроме того, слитки возможно подвергать горячей пластической деформации без предварительного сфероидизирующего отжига из-за высокой дисперсности эвтектических кристаллов фазы Al_4Ca . Предел прочности образцов горячего листового проката сплава Al-3Ca-1Mn-Zr-0.3Sc 230-270 МПа, относительное удлинение 11-14%. Холодная пластическая деформация также возможна.

Известно, что железо в алюминиевых сплавах является вредной примесью из-за образования грубых иголок фазы Al_3Fe [1]. Однако, при исследовании сплавов системы Al-Ca-Fe, было выявлено тройное соединение $Al_{10}CaFe$. В структуре кальцийсодержащих сплавов эта фаза входит в состав тройной эвтектики, имеет компактную форму и ее частицы после сфероидизирующего отжига не отличаются от частиц фазы Al_4Ca . Из сплава Al6Ca1Fe методом литья под давлением получены стандартные плоские разрывные образцы. Их механические свойства характеризуются высокой стабильностью, при этом временное сопротивление превышает 200 МПа. Сплав имеет высокие литейные свойства и его можно прокатывать при температуре 500°C (Рис.1б) [6].

Легирование алюминиево-кальциевых сплавов традиционными упрочнителями, цинком и магнием, позволяет получить в горячекатаных листах в состоянии Т6 (закалка и искусственное старение) механические свойства не хуже, чем у стандартных сплавов 7xxx серии (предел прочности 450-550 МПа, относительное удлинение 1-3%). Но, в отличие от высокопрочных деформируемых сплавов, сплавы с кальцием настолько же технологичны при литье, как и широко применяемые силумины типа А356 (Рис.2) [7,8].

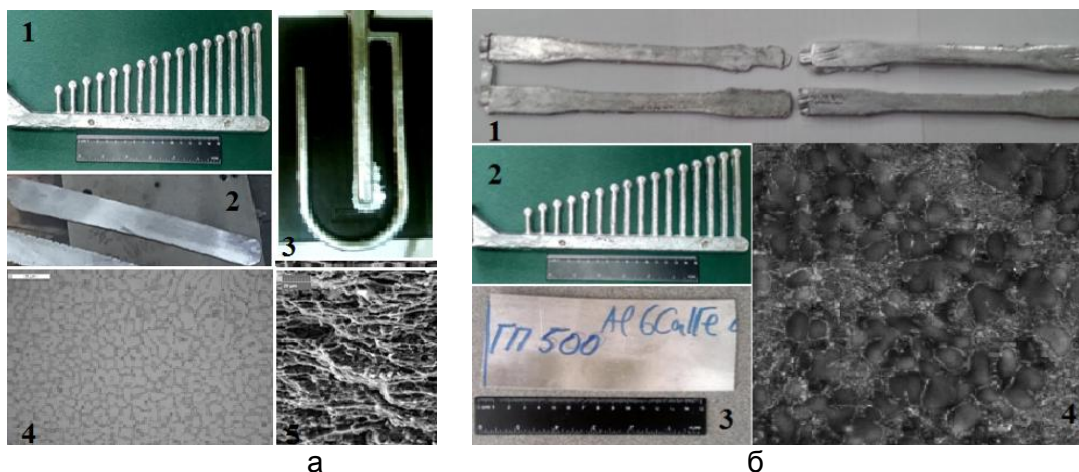


Рисунок 1 - Литые и деформированные полуфабрикаты из алюминиево-кальциевых сплавов: а) сплав Al-4Ca-1Mn-0,3Sc: 1- проба на горячеломкость «арфа»; 2 - горячий прокат; 3 – U-образная проба на жидкотекучесть; 4- микроструктура сплава после литья и сфероидизирующего отжига; 5 - структура излома после горячей прокатки (T=450°C); б) сплав Al-6Ca-1Fe: 1- разрывные образцы, полученные литьем под давлением; 2- проба на горячеломкость «арфа»; 3 – горячий прокат; 4- микроструктура (литье под давлением)

В целом, основными преимуществами алюминиево-кальциевых сплавов являются низкая плотность, высокая коррозионная стойкость и высокая технологичность при литье и обработке давлением. Невысокая стоимость и возможность сократить технологический цикл за счет отсутствия операции закалки, привлекательны с экономической точки зрения. Поэтому на базе описанных выше

систем могут быть созданы как литейные, так и деформируемые сплавы. Для группы литейных сплавов потенциальный запас пластичности может обеспечить высокое сопротивление ударным нагрузкам. При конструировании эвтектических сплавов можно варьировать объемные содержания алюминиевого твердого раствора и эвтектических интерметаллидов, получая литейные или деформируемые композиции с заданным уровнем физико-механических свойств.



Рисунок 2 - Структура и свойства высокопрочного сплава Al-10%Zn-3%Mg-3,5%Ca: 1- микроструктура после литья и отжига при 500°C в течение 3-х часов; 2- вид листового проката; 3- проба на горячеломкость «карфа»; 4 - отливка «педаля ножного насоса»

Список литературы

1. Золоторевский В.С., Белов Н.А. *Металловедение литейных алюминиевых сплавов* М.: МИСиС, 2005. — 376 с.
2. Белов Н.А., Наумова Е.А., Акопян Т.К. *Эвтектические сплавы на основе алюминия: новые системы легирования*, М.: Руда и металлы, 2016. — 256 с.
3. Mondolfo L.F. *Aluminum alloys: structure and properties*, London/Boston: Butterworths, 1976.
4. Наумова Е. А., Белов Н. А., Никитин Б. К., Громов А. В. Исследование технологических свойств литейных эвтектических сплавов на основе системы Al-Ca-Mn. *Материаловедение*, №6, 2017г., с.9-13.
5. N.A.Belov, E.A.Naumova, A.N.Alabin, I.A.Matveeva “Effect of Scandium on Structure and Hardening of Al–Ca Eutectic Alloys”, *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, vol.646, P.741-747.
6. Белов Н. А., Наумова Е. А., Илюхин В. Д., Дорошенко В. В. Структура и механические свойства отливок сплава Al – 6 % Ca – 1 % Fe, полученных литьем под давлением, «Цветные металлы». 2017. № 3, с. 69-76.
7. E. A. Naumova, N. A. Belov, T. A. Bazlova. “Effect of Heat Treatment on Structure and Strengthening of Cast Eutectic Aluminum Alloy Al9Zn4Ca3Mg” *Metal Science and Heat Treatment*”, 2015, Vol.57, pp 1-7.
8. N.A.Belov, E.A.Naumova, T.K.Akopyan “Effect of calcium on structure, phase composition and hardening of Al-Zn-Mg alloys containing up to 12 wt.%Zn” *Materials research*, 2015, vol.18 no.6, P.1384-1391.