

обеспечивают повышение технологичности сплава. Акустическое воздействие вызывает в процессе кристаллизации повышение вязкости расплава и изменение коэффициента теплопереноса за счёт изменения физических свойств расплава. Кроме того, указанное воздействие уменьшает в сплаве содержание окисных и неметаллических включений. Это происходит в результате выталкивания окисных и неметаллических включений в процессе кристаллизации изделия к поверхности расплава. При этом увеличивается скорость теплоотвода, зарождаются новые центры кристаллизации и наблюдается эффект измельчения структуры. К этому выводу приводит анализ зависимостей Таммана Г.Г. (рис.1). Видно, что переохлаждение расплава на величину ΔT_{opt}^n однозначно приведёт к получению литой заготовки с максимально измельчённой структурой за счёт роста количества зародышей при ограниченном объёме расплава – без дополнительных модификаторов.

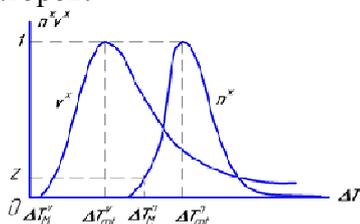


Рис. 1. Нормированные зависимости Таммана Г.Г.

i^* - скорость образования количества зёрен в единице объёма; V^* - скорость роста зёрен

Таким образом, имеется возможность по управлению размеров зерна литой заготовки, когда управляющим параметром является переохлаждение. В этом случае зависимость величины зерна литой заготовки (произведённой любым способом) от значения величины переохлаждения имеет вид, приведённый на рис. 2.

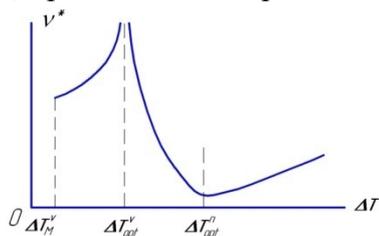


Рис.2. Зависимость величины зерна литой заготовки от создаваемого переохлаждения

Получение равноосной мелкозернистой структуры позволяет существенно снизить или исключить последующий гомогенизирующий отжиг. Исключение гомогенизации позволяет сохранить пересыщенный магнием и кремнием твёрдый раствор \square -алюминия, полученный при литье, уменьшить вторичную пористость в сплаве и снизить энергетические затраты при отжиге.

Эффект использования акустического воздействия заключается в дополнительном измельчении зёрен твёрдого раствора \square -алюминия и растворении в нём тугоплавких легирующих составляющих сплава.

Поставленная задача решается созданием сплава, полученного на основе алюминия описанным выше способом и дополнительно содержащего кремний, магний, цирконий, бериллий, титан при следующем соотношении компонентов, масс. %:

Кремний	4,0 – 20,0
Магний	2,0 – 13,5
Цирконий	0,05 – 0,2
Бериллий	0,03 – 0,15
Титан	0,02 – 0,1
Алюминий	остальное.

Введение магния в указанных пределах обеспечивает повышение предела прочности и предела текучести сплава, снижает его удельный вес с повышением удельной прочности и улучшением коррозионной стойкости. Магний в указанных пределах в технологии литья полуфабрикатов обеспечивает хорошие литейные свойства, что позволяет получать фасонные отливки, а также из литых заготовок полуфабрикаты способами обработки давлением. Магний с кремнием образует интерметаллическое соединение Mg_2Si с высокой микротвёрдостью и повышает износостойкость. Цирконий в указанных пределах стабилизирует и упрочняет твёрдый раствор \square -алюминия. Введение циркония ниже 0,05 масс.% недостаточно для стабилизации и упрочнения твёрдого раствора \square -алюминия. Содержание циркония выше 0,2 масс.% ведёт к грубым выделениям игольчатой интерметаллидной фазы $ZrAl_3$, снижающей пластичность и эффективность данного

компонента в сплаве. Бериллий введён в сплав для защиты магния от окисления в процессе приготовления сплава. В указанных пределах бериллий выполняет функцию защиты магния. При уменьшении его количества не будет обеспечена надлежащая защита от окисления, а увеличение его содержания выше указанного предела затруднит процесс непрерывного литья заготовок. Титан в указанных пределах введён как модификатор для улучшения технологичности сплава при деформации. Одновременно он является барьером для образования хрупкой интерметаллидной фазы Mg_2Al_3 . Введение титана ниже 0,02 масс.% недостаточно для модифицирования сплава, а введение его выше 0,1 масс.% приводит к выделению нежелательных алюминидов. Увеличение степени дисперсности выделяющихся частиц наблюдается при введении в сплав 0,005 – 0,04 масс.% Вe, 0,005 – 0,02 масс.% Ti, 0,005 – 0,02 масс.% Zr. Эти добавки повышают концентрацию вакансий при закалке и интенсифицируют процессы диффузии магния и кремния при старении, облегчая образование зародышей метастабильной фазы \square . Целесообразно, чтобы алюминиевый сплав дополнительно содержал 0,01 – 0,05 масс.% кобальта. Кобальт, являющийся элементом с меньшим атомным радиусом по сравнению с магнием и цирконием, уменьшает параметр кристаллической решётки алюминия, повышает стабильность твёрдого раствора \square -алюминия и технологичность сплава при прокатке. Совместно с цирконием кобальт благоприятно влияет на прочностные и пластические свойства предложенного сплава. Введение кобальта ниже 0,01 масс.% недостаточно для достижения указанного положительного эффекта, а введение его выше 0,05 масс.% ведёт к выделению алюминидов кобальта и снижению его положительного влияния. Так как растворимость кобальта при комнатной температуре соответствует 0,02 масс.%, наибольшее его влияние будет тогда, когда он находится в твёрдом растворе \square -алюминия в виде атомов, равномерно внедрённых в кристаллическую решётку

алюминия. Благоприятное влияние на алюминиевый сплав оказывает бор при содержании 0,004 – 0,02 масс.%. Бор в указанных пределах введён в сплав для усиления модифицирующего воздействия титана на зёрна \square -алюминия. Предпочтительно вводить бор в соотношении к титану как 1 : 5. В этом случае их совместное влияние наиболее эффективно. Поэтому нижний предел ограничен 0,004 масс.%, а верхний – 0,02 масс.%. Дальнейшее его повышение может вызвать выделение при кристаллизации сплава большого количества алюминидов бора и ухудшение технологических свойств, особенно при деформации. Желательно, чтобы алюминиевый сплав дополнительно содержал 0,01 – 0,3 масс.% хрома. Хром введён в состав сплава как элемент – антирекристаллизатор, который совместно с цирконием повышает устойчивость твёрдого раствора \square -алюминия и улучшает прочностные свойства сплава. Уменьшение содержания хрома менее 0,01 масс.% не обеспечивает повышение температуры рекристаллизации сплава, что снижает его прочностные свойства. Увеличение содержания хрома выше 0,3 масс.% ведёт к образованию в структуре сплава тугоплавких интерметаллидов Cr_2Al_3 , которые ухудшают его технологичность.

Таким образом, предложенный сплав в сочетании с выбранным способом литья позволяет получить мелкозернистую плотную структуру литой заготовки с повышенными прочностными и пластическими свойствами, обеспечивающими требуемые технологические свойства, как при литье, так и при пластической деформации литой заготовки. Изготовление промежуточных изделий из предложенного сплава с высокими концентрациями магния и кремния с применением разработанной технологии позволяет исключить из технологической схемы весьма неблагоприятные высокотемпературные нагревы перед деформацией, значительно уменьшая внутريدендритную и междендритную ликвацию, измельчая дендритные ячейки зёрен твёрдого раствора

□-алюминия, увеличивая число эвтектических колоний; измельчить и уменьшить количество интерметаллических включений; повысить плотность и чистоту металла. При этом промежуточные изделия имеют предел прочности на растяжение выше 370 Мпа с одновременной деформируемостью в холодном состоянии по Эриксону более 8,5 мм и плотную однородную кристаллическую структуру с равномерно распределёнными в матрице частицами дисперсностью от 5000 до 20000□. Для промышленного использования предлагается алюминиевый сплав, содержащий следующие компоненты, масс. %:

Магний – 2,0 – 13,5%

Кремний – 4,0 – 20,0

Цирконий – 0,05 – 0,2

Бериллий – 0,03 – 0,15

Титан – 0,02 – 0,1

Алюминий – остальное.

При этом сплав может содержать:

Кобальт – 0,01 – 0,05

Хром - 0,01 – 0,3

Бор - 0,004 – 0,02

взятые порознь или в сочетании.

Сплав предварительно разогревают до температуры 720°C при акустическом воздействии на расплав частотой 500 КГц. Затем его дегазируют, подвергают фильтрации, переливают в раздаточную печь установки непрерывного литья и вытягивают заготовку из формирующего устройства, где осуществляют непрерывный отвод тепла, например подачей охлаждённого воздуха. В процессе кристаллизации сплав подвергают постоянному акустическому воздействию, например с частотой 1000 КГц. Указанную акустическую обработку проводят с применением формирователя одноканального Ф-1К, который генерирует акустические волны радиочастотного диапазона. Использование такого типа воздействия способствует лучшему усвоению в жидком алюминии плохо растворимых легирующих компонентов, например, кремния, при кристаллизации измельчает дендритные ячейки твёрдого

раствора □-алюминия и первичные кристаллы кремния, повышает их однородность. Для достижения наилучшего эффекта целесообразно акустическое воздействие производить с области вершины изотермы ликвидус и до окончания кристаллизации. Экспериментально определено, что наилучший эффект от акустического воздействия обеспечивается при частоте от 200 до 1000 КГц. В переходной зоне (жидко-твёрдой фазе) позволяя создать синхронные колебательно-вращательные движения надмолекулярных структур сплава в протяжённые цепочки – бесконечные кластеры перколяции и изменять механизм теплопередачи, что приводит к упорядочению структуры и изменению твёрдости. При этом происходит кажущееся изменение диаграммы состояния (псевдодиаграмма) и повышается растворимость кремния и магния в алюминии. Кремний и магний равномерно растворяются в алюминии, а легирующие добавки и образующиеся дисперсные интерметаллические соединения будут делать атомы кремния и магния менее подвижными, закреплять их в матрице твёрдого раствора □-алюминия. Если требуется, для деформирования литых заготовок проводят их гомогенизацию (при 420°C в печи, в течение 4 часов). Полученные литые заготовки и листы подвергают закалке при 380 – 435°C с последующим охлаждением, например, в воде при 20 – 100°C, в масле при 20°C или на воздухе. Таким образом, предлагаемый способ литья, основанный на воздействии акустических волн, имеет научно-обоснованные предпосылки для получения уникального по своим характеристикам сплава, обладающего как высокими литейными, так и деформируемыми свойствами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании постановления Правительства РФ №218 от 09.04.2010г.

RESEARCH OF POSSIBILITIES TO OBTAIN HIGH- ALLOY ALUMINUM- MAGNESIUM ALLOYS

© 2012 F. V. Grechnikov, I. P. Popov, A. M. Bibikov, E. G. Demyanenko

Samara State Aerospace University
named after Academician S.P. Korolyov (National Research University)

It is suggested the new alloy and casting method, which allows to obtain the compact and fine-grained structure of cast billet with increased mechanical and plastic properties, which provide the required technological properties as during casting, as during plastic forming of cast billet.

Alloy, method, crystallization, microstructure, grain, casting, billet.

Информация об авторах

Гречников Федор Васильевич, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой обработки металлов давлением, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: gretch@ssau.ru. Область научных интересов: деформирование анизотропных материалов.

Попов Игорь Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры обработки металлов давлением, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: igr_popov@mail.ru. Область научных интересов: формообразование деталей сложной формы из листовых заготовок, полученных в процессах металлургического производства с использованием слабых импульсных токов.

Бибиков Алексей Михайлович, инженер кафедры обработки металлов давлением, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: igr_@mail.ru. Область научных интересов: процессы литья и кристаллизации с воздействием слабых импульсных токов.

Демьяненко Елена Геннадьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры обработки металлов давлением, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: e-dem@mail.ru. Область научных интересов: формообразование тонкостенных деталей сложной формы.

Grechnikov Fedor Vasilievich, Corresponding member of RAS, Doctor of Engineering, Professor, Head of Metal Forming Department, Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: gretch@ssau.ru. Area of research: anisotropic materials deforming.

Popov Igor Petrovich, Doctor of Engineering, Professor of Metal Forming Department, Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: igr_popov@mail.ru. Area of research: forming of complex shape parts from sheets, produced with influence of weak pulse currents.

Bibikov Aleksey Michailovich, Engineer of Metal Forming Department, Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: igr_@mail.ru. Area of research: processes of casting and crystallization with influence of weak pulse currents.

Demyanenko Elena Gennadievna, Ph.D., Docent of Metal Forming Department, Samara State Aerospace University named after Academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: e-dem@mail.ru. Area of research: forming of thin-walled complex shape parts.