

ФОРМИРОВАНИЕ ВКЛЮЧЕНИЙ СВИНЦА В СТРУКТУРЕ СЛИТКОВ АВТОМАТНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ЛИТЬЕ

Перфильева А.И.

Научный руководитель докт. техн. наук Бабкин В.Г.

Сибирский федеральный университет

Автоматные алюминиевые сплавы – это традиционные сплавы системы Al-Cu-Mg и Al-Mg-Si дополнительно легированные легкоплавкими элементами – свинцом или свинцом совместно с висмутом в количестве до 1.5%(масс.). Автоматные сплавы получили свое наименование в связи с их обработкой на станках-автоматах с повышенной скоростью резания (ЧПУ) для изготовления деталей массового спроса.

Получение слитков автоматных алюминиевых сплавов непрерывным литьем связано с неравномерным распределением свинца по сечению слитка.

В процессе кристаллизации при температуре монотектической реакции частицы легкоплавких фаз выделяются по границам дендритных ячеек в виде отдельных глобулярных включений размером от 2 до 10 мкм, либо в виде слившихся крупных включений размером более 50 мкм, которые в большом количестве оказываются в донных частях слитков. Установлено, что наиболее предпочтительным способом введения свинца в расплав, с точки зрения получения достаточно оптимальных размеров частиц, является присадка его в гранульном виде или в виде гранулированных свинецсодержащих лигатур. Однако поведение свинцово-висмутовых фаз, оказавшихся перед растущим дендритом затвердевающего металла, до сих пор не изучено, что не позволяет судить о закономерностях их распределения в твердом слитке, а следовательно и влиять на повышение эксплуатационных характеристик и потребительских свойств деформируемых полуфабрикатов.

Для уточнения механизма распределения включений свинца между жидкой и твердой фазами рассмотрели важнейшие усилия, действующие на частицы свинца перед растущим кристаллом.

При непрерывном литье и небольшом переохлаждении кристалл растет в форме скелета или дендрита в направлении температурного градиента вглубь слитка. Перед растущим кристаллом сплава системы Al-Pb появляются избыточные концентрации свинца, растворимость которого в твердой фазе незначительна. Обычно образовавшиеся частицы новой фазы, взвешенные в расплаве, имеют размер 10^{-9} м. Эти частицы представляют собой метастабильную, термодинамически неустойчивую фазу, поэтому испытывают естественное стремление к укрупнению. Процесс укрупнения сопровождается уменьшением поверхности раздела, чему способствуют высокие значения межфазного натяжения и соответственно малые величины вязкости расплава и частиц новой фазы.

С целью повышения обрабатываемости резанием пресованных полуфабрикатов из деформируемых алюминиевых сплавов в их состав вводят до 1,5% (масс.) свинца или свинца совместно с висмутом. В процессе кристаллизации при температуре монотектической реакции частицы легкоплавких фаз выделяются по границам дендритных ячеек в виде отдельных глобулярных включений размером от 2 до 10 мкм,

либо в виде слившихся крупных включений размером более 50 мкм, которые в большом количестве оказываются в донных частях слитков. Установлено, что наиболее предпочтительным способом введения свинца в расплав, с точки зрения получения достаточно оптимальных размеров частиц, является присадка его в гранульном виде или в виде гранулированных свинецсодержащих лигатур.

Для уточнения механизма распределения включений свинца между жидкой и твердой фазами рассмотрели важнейшие усилия, действующие на частицы свинца перед растущим кристаллом.

Частица свинца, прошедшая под действием капиллярных сил ликватную пленку на растущей грани кристалла (Рис. 1) и коснувшись кристаллического остова испытывает противодействие кристаллизационного давления, которое не зависит от символа отталкивающей грани и природы препятствия и связано с энергией фазового перехода.

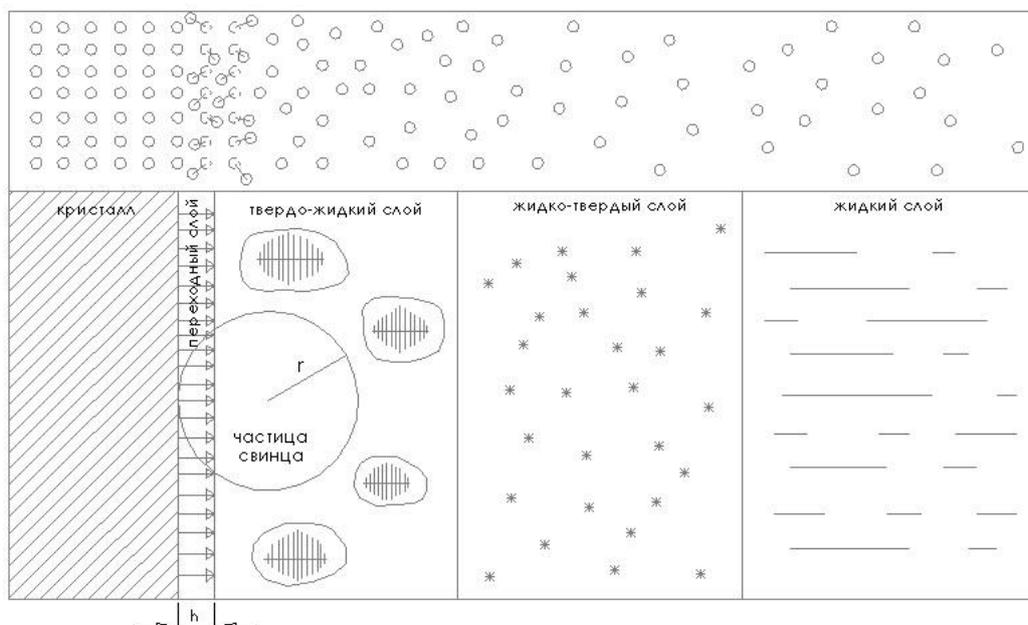


Рис. 1. Схема формирования включений свинца в структуре слитка

В таблице сопоставлены силы, действующие на частицы свинца размером 1-10 мкм у грани кристалла.

Значение сил, действующих на частицы свинца у грани растущего кристалла

Силы и расчетные уравнения	Капиллярные $f_k = \frac{8}{3} \pi r^2 \frac{\Delta\sigma}{\delta};$ $\Delta\sigma = 10 \text{ мДж/м}^2;$ $\delta = 10^{-5} \text{ м}$	Кристаллизационные $f_{кр} = 2\pi r h \frac{\Delta T \Delta H}{TV};$ $\Delta T = 10 \text{ К};$ $h = 10^{-9} \text{ м}; T = 934 \text{ К}$	Архимеда $f_A = \frac{4}{3} \pi r^3 \Delta\rho g;$ $\Delta\rho = 8,28 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$
$r = 0,5 \text{ мкм}$	$3,5 \cdot 10^{-8}$	$3,24 \cdot 10^{-8}$	$4,2 \cdot 10^{-14}$
$r = 1 \text{ мкм}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$	$6,5 \cdot 10^{-8}$	$3,4 \cdot 10^{-13}$
$r = 5 \text{ мкм}$	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$3,24 \cdot 10^{-7}$	$4,2 \cdot 10^{-11}$
$r = 10 \text{ мкм}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$6,5 \cdot 10^{-7}$	$3,4 \cdot 10^{-10}$

Возможность захвата жидких частиц свинца растущими дендритами зависит от соотношения капиллярных и кристаллизационных сил, действующих на частицу у фронта кристаллизации. При $f_k > f_{кр}$ усеченная сферическая частица входит в зону кристаллизационного давления, поэтому условие вращаения в кристалл запишется: $P_k > P_{кр}$. Учитывая, что $P_k = f_k/\omega_k$, где ω_k – площадь контакта, можно предположить, что успешнее внедряются мелкие жидкие частицы, поскольку для них больше P_k . Из равенства f_k и $f_{кр}$ можно определить критический размер частицы $r_{кр}$:

$$\frac{8}{3} \pi r^2 \frac{\Delta\sigma}{\delta} = 2\pi r h \frac{\Delta T \Delta H}{TV},$$

$$r_{кр} = \frac{3}{4} \cdot \frac{\delta h \Delta T \Delta H}{\Delta\sigma TV}.$$

Жидкие частицы размером $r < r_{кр}$ захватываются растущим кристаллом, а более крупные не способны преодолеть зону кристаллизационных давлений и остаются в ликватной пленке, окружающей растущий кристалл.

Частицы жидкого свинца, оказавшиеся между растущими кристаллами в двухфазной зоне склонны к слиянию (коалесценции). Укрупнению частиц до размеров нескольких микрон способствуют не только высокие значения межфазного натяжения, но и малые значения величин вязкости маточного расплава. Жидкий свинец тяжелее исходного расплава, поэтому он перемещается вдоль фронта растущих кристаллов до тех пор, пока не происходит срастание дендритных осей и скачкообразное повышение вязкости суспензии.

Для подтверждения основных положений по формированию включений свинца автоматного алюминиевого сплава 2007 провели производственные исследования. Расплав готовили по серийной технологии ООО «Крамз». Присадку свинца в расплав осуществляли в два приема – в тигельной печи ИАТ-6, путем плавки чушки, и дополнительно в раздаточном лотке перед кристаллизатором, с применением свинецсодержащей гранулированной лигатуры. Модифицирование расплава прутковой лигатурой системы Al-Ti-B проводили в кристаллизаторе, расплав разливали в слитки диаметром 320 мм со скоростью 45 мм/мин. Характерная микроструктура различных зон полученного слитка приведена на Рис. 2.

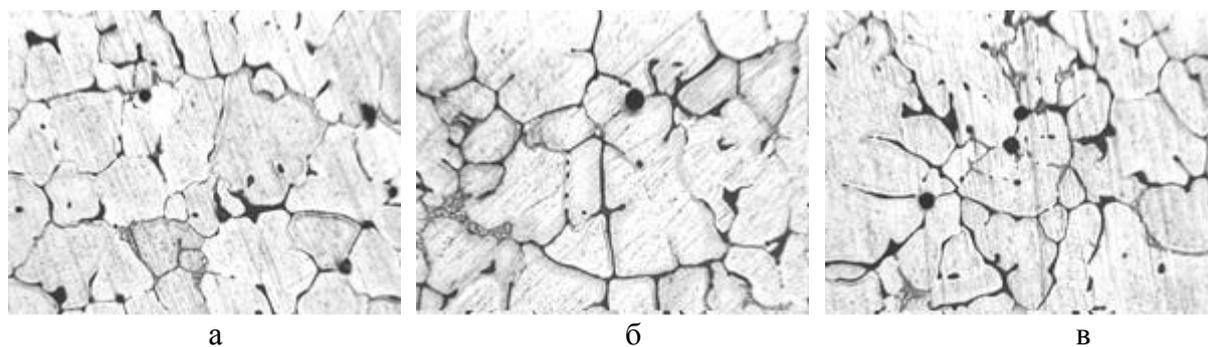


Рис. 2. Микроструктура слитка из сплава 2007, x100:

а – периферийная зона, б – средняя зона, в – центральная зона.

Результаты исследований показали, что в периферийной зоне слитка частицы свинца размером менее 0,10-0,25 мкм располагаются преимущественно в теле зерна, а более крупные включения по границам зерен. По мере приближения к центральной зоне слитка количество и размер свинцовых включений несколько увеличиваются, достигая 20-30 мкм, что не оказывает отрицательного влияния на структуру и параметры производства слитков и полуфабрикатов.

Таким образом, модифицирование расплава прутковыми лигатурами Al-Ti-V или таблетированными лигатурами Al-Ti-C позволяет существенно повысить скорость разлива, не опасаясь чрезмерного возрастания степени зональной ликвации в слитке и возникновения горячих трещин. Для предотвращения возможного образования грубых интерметаллидных включений желательно применять комплексные лигатуры, например Al-Ti-C-Sr.

Уменьшение гравитационной ликвации достигается также перемешиванием расплава и повышением скорости охлаждения. В частности, положительный результат можно достичь, применяя короткий кристаллизатор и интенсивное охлаждение слитка водой после его выхода из кристаллизатора.

Заключение

Распределение включений свинца относительно дендритной структуры слитка определяется на начальной стадии кристаллизации соотношением сил кристаллизационного давления и капиллярной, которые действуют на включение, коснувшееся грани кристалла. При степени переохлаждения на фронте кристаллизации 2-5 К растущим кристаллом захватываются частицы менее 0,1-0,25 мкм, а более крупные отгесняются в междендритное пространство. В двухфазной зоне происходит укрупнение жидких частиц свинца и их перемещение вдоль фронта растущих кристаллов. Чем меньше переохлаждение, тем более крупными образуются частицы жидкого свинца и их распределение по высоте слитка требует учета архимедовой силы. Для уменьшения гравитационной ликвации предлагается повышение скорости литья, модифицирование расплава, а также увеличение скорости охлаждения слитка.