

---

# Модифицирование первичного кремния в сплавах алюминий-кремний

Низовский Артем Алексеевич  
Магистрант СФУ, Россия, г. Красноярск  
E-mail: [nizart82@gmail.com](mailto:nizart82@gmail.com)

Фазовая диаграмма Al-Si является базовой при описании способов обработки расплава. Основное применение заэвтектических сплавов Al-Si изготовление поршней двигателей.

Аналогично процедуре измельчения зерна, позволяющей уменьшить зерно в фазе первичного алюминия, ввод незначительных добавок фосфора способствует измельчению зерна в фазе первичного кремния, который формируется первым при отверждении заэвтектических силуминов. При этом зародышеобразование происходит на фосфидах алюминия. При использовании добавок фосфида образуются в расплаве, но при вводе лигатуры Al-Cu-P эти соединения уже присутствуют, что дает ряд преимуществ, и прежде всего — позволяет снизить расход лигатуры и исключить необходимость перегрева расплава для формирования фосфидов алюминия.

## Модифицирование эвтектики

Кремний затвердевает, формируя хорошо упорядоченную кристаллическую структуру. Если изменить условия кристаллизации, то кремниевые структуры растут только в нескольких заданных направлениях. По этой причине немодифицированный кремний в эвтектической фазе сплавов выглядит как пластинки с острыми углами. На этом этапе возможно естественное модифицирование (нарушение структуры) кремниевых структур, но это происходит очень редко. Некоторые элементы инициируют более частое образование дефектов в регулярной структуре кремния, способствуя образованию эвтектики с лучшей, более волокнистой, структурой. При этом следует отметить, что модифицированная структура имеет ряд преимуществ, основное из которых — повышение пластичности.

Многие элементы способны модифицировать эвтектику, но чаще других для этих целей используют стронций, который добавляют при производстве литейных сплавов либо при изготовлении отливок. В основном используют лигатуру, содержащую 3,5 — 15% стронция. Существуют добавки с 90 % стронция, хотя при наличии в лигатуре выше 45% Sr он становится реактивным на воздухе и при растворении образует интерметаллид  $\text{SrAl}_2\text{Si}_2$ . При введении 90%-ного стронция процесс может быть сильно экзотермичным, поэтому для предотвращения окисления необходим тщательный контроль ввода лигатуры. Стронциевые лигатуры с 3,5-15% стронция содержат соединение  $\text{Al}_4\text{Sr}$ , которое растворяется после ввода в расплав.

Для модифицирования также используют натрий, но он быстрее испаряется из раствора и вреден для окружающей среды. Сурьму используют для модифицирования довольно редко из-за несовместимости с другими модификаторами и возможности образования ядовитого сурьмяного газа.

Традиционно считал, что модифицирование необходимо только для медленно остывающих отливок (при литье в изложницы), так как при литье с быстрым остыванием (при непрерывном литье и литье под давлением) модифицирование можно обеспечить и без добавок. Однако появились доказательства, что модификаторы дают преимущества и при высокой скорости остывания. В исследованиях, посвященных литью под высоким давлением сплава A380 и литью в кокиль сплава A319, показано, что применение стронция позволяет перераспределить пористость

---

и увеличить плотность отливок.

### **Измельчение зерна**

Измельчители зерна добавляют в Al-Si сплавы для увеличения жидко текучести, улучшения распределения пористости, снижения риска образования горячих трещин, а также для оптимизации механических свойств готовой продукции. Можно использовать добавки в форме таблеток на основе солей или в виде лигатуры Al-Ti-B, особенно при стремлении к достижению наилучшего качества, так как эта лигатура содержит уже сформированные частицы  $TiB_2$  и  $TiAl_3$ . В последние годы механизм измельчения зерна широко исследовали. Считается, что зародышеобразование обусловлено образованием частиц  $TiB_2$  в тонком слое  $TiAl_3$ . Другим важным механизмом является ограничение роста зерна путем добавления титана, эффективно сдерживающим рост.

Чтобы оценить влияние измельчения зерна на процесс литья, можно рассмотреть образующиеся дендриты, которые могут соединяться и, таким образом, упрочнять расплав в различных направлениях. При отсутствии измельчителя такой эффект наблюдается при затвердевании примерно 20% объема расплава, а при использовании измельчителя эта доля существенно увеличивается.

Крупные дендриты реже пересекаются друг с другом, образуя твердую фракцию, чем мелкие, что влияет на поведение расплава при заполнении мульты и затвердевании. При заполнении мульты расплав остывает и образуются дендриты, которые затем сохраняются в готовом продукте. Если дендриты имеют большой размер, то это может затруднить заполнение узких участков формы.

При затвердевании необходимо противодействовать объемной усадке, подавая в форму жидкий металл. Если дендриты крупные, сопротивление поступлению расплава наступит раньше (так как расплав перемещается по длинным, но открытым меж дендритным каналам), что может привести к образованию больших областей пористости в частях отливки, расположенных на значительном расстоянии от источника подачи расплава и в случае перекрытия каналов подачи расплава. При более мелком размере дендритов подача расплава происходит дольше, поскольку легче упаковать вместе много мелких дендритов, чем несколько крупных. Поэтому меж дендритная подача становится критической на более поздней стадии процесса затвердевания. Количество областей усадки сокращается, и они лучше распределены по отливке.

Таким образом, при правильно организованной технологии литья пористость обычно ниже и лучше распределена, если обеспечен мелкий размер зерна. Al-Si-сплавы имеют отличающийся от сплавов других систем механизм измельчения зерна. Так, при наличии в сплавах 0 — 3% кремния при увеличении его содержания в указанном интервале эффективность процесса измельчения зерна повышается. Однако при содержании кремния выше 3% процесс измельчения зерна становится сложным, и этот факт пока не нашел объяснения.

В последнее время было выполнено значительное количество исследований, в которых определяли, какие зародыше образующие частицы лучше использовать для измельчения зерна в Al-Si-сплавах. Из литературных источников известно, что потенциально многие материалы могут выполнять роль измельчителей зерна в этих сплавах. Некоторые из них вообще не включают титан, однако они не нашли широкого применения в промышленности.

### **Современные тенденции в области применения измельчителей зерна при литье**

При литье в основном используют такой же измельчитель зерна, как и в производстве деформируемых сплавов, а именно: Al-5%Ti-1%B или

---

Al-3%Ti-1%B. Однако в последние годы широко применяют модификатор TiBloy (Al-1,6%Ti-1,4%B), особенно при производстве дисков колес. Промышленный опыт показывает, что этот субстехиометрический измельчитель зерна позволяет решить ряд проблем, стоящих перед литейщиками.

Смесь боридов (Al-Ti) $B_2$  имеет меньшую плотность, чем частицы  $TiB_2$ , присутствующие в измельчителях Al-5%Ti-1%B, что приводит к замедлению процесса, увеличению времени выдержки сплава в печи или тигле и достижению при этом хорошего измельчения. Все это делает измельчитель Al-1,6%Ti-1,4%B идеальным при производстве вторичных сплавов. При использовании сплавов, модифицированных TiBloy, производители дисков колес сообщают о снижении брака, связанного с усадкой, уменьшении отбраковки после рентгеновской дефектоскопии, а также о снижении брака после механообработки.

Таким образом, в литейном производстве применяют различные виды обработки расплава. Подтверждение на практике преимуществ присадок, улучшающих качество отливок, создает положительные тенденции для увеличения потребления эффективных стронциевых лигатур, а также все более популярного измельчителя зерна TiBloy, разработанного специально для литейных сплавов.