

# ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ СПОСОБА ЦЕНТРОБЕЖНОГО ЛИТЬЯ В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЛЕГКИХ СПЛАВОВ

Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет):

**Анатолий Павлович Петров**, профессор, д.т.н.  
**Владимир Викторович Еремеев**, доцент, к.т.н.  
**Николай Владимирович Еремеев**, доцент, к.т.н.  
**Иван Олегович Краснобородько**, аспирант  
**Иван Михайлович Злыднев**, аспирант

*Российскими учеными выполнены весьма обстоятельные теоретические и практические разработки и обобщения в области центробежного литья. Намечены перспективные направления и подходы в решении задач создания новых материалов и изделий на основе легких сплавов с использованием способов центробежного литья.*

*Russian scientists performed a very thorough theoretical and practical developments and generalizations in the field of centrifugal casting. Perspective directions and approaches to solve the problems of creating new materials and products based on light alloys using the methods of centrifugal casting.*

**Ключевые слова:** сплав, структура, интерметаллид, центробежное литье, изложница.

**Keywords:** alloy, structure, intermetallic compound, centrifugal casting, mold.

В последнее время потребителями и конструкторами в металлургии все в большей степени предъявляются требования к коэффициенту использования металла (КИМ), повышению физико-механических характеристик сплавов, созданию новых типов сплавов с уникальными характеристиками. В этом отношении способ центробежного литья (ЦБЛ) в форму с вертикальной осью вращения (рис. 1) представляет значительный интерес, так как позволяет получать полые (кольцеобразные, фасонные) отливки, что исключает в ряде случаев операции прошивки при деформационной обработке (например, прессование труб, штамповка лопастных колес турбокомпрессоров и др.). Кроме того, способ ЦБЛ благодаря высокой скорости охлаждения расплава и действию значительных нестационарных полей обеспечивает формирование в отливках субмикроструктурных структур. Вращательное движение жидкого расплава освобождает металл от газовых пузырей и различных неметаллических включений, увеличивая плотность и однородность строения отливки, что является необходимым условием для последующей обработки металлов давлением (ОМД).

Становление способа ЦБЛ прошло длительный путь развития. Первый патент был получен в 1809 г. в Англии (А. Эккерт), но практического применения способ в те времена не нашел. Следующий патент получил спустя 40 лет Т. Лоугрои на литье труб, но опыт не дал положительного результата и работы были прекращены. Только в 1910 г. О. Борде окончательно отработал технологию отливки чугунных водопроводных труб.

В СССР работы по ЦБЛ были начаты во второй пятилетке, при этом не удалось воспользоваться накопленным зарубежным опытом, т.к. иностранные фирмы поставили неприемлемые условия для предоставления технической помощи. Первые центробежные машины для литья труб были построены в 1936 г., а освоение литья широко развернулось только в послевоенный период, начиная с 1948 г. По-видимому, первой книгой является "Центробежное литье

и трубо-литейное производство" С.Е. Розенфельда, 1946 г. Далее хронологически следуют "Основы центробежного литья" С.Е. Розенфельда и сотрудников, 1947 г., а также "Основы центробежного литья" П.Г. Новикова и др. в сборнике ВНИТОЛ "Центробежное литье", 1948 г. После большого перерыва выходит книга "Центробежное литье" С.Б. Юдина и М.М. Левина, 1972 г., которая неоднократно переиздавалась.

Российскими учеными выполнены весьма обстоятельные теоретические и практические разработки и обобщения в области центробежного литья легких сплавов.

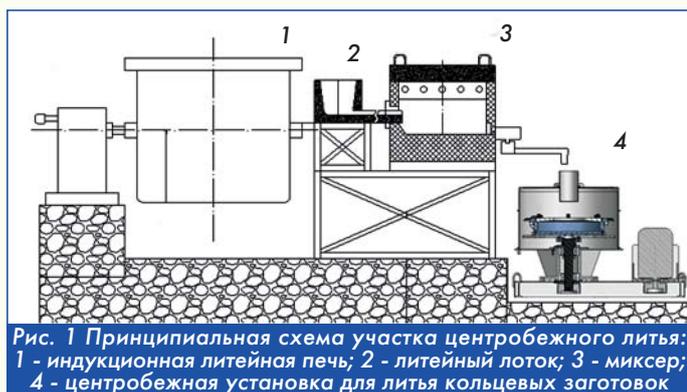
В 1950 г. вышла первая и единственная книга, посвященная теории и практике литья алюминиевых сплавов-силуминов: А.М. Байков "Центробежное литье алюминиевых сплавов и их литейные свойства".

Только в немногочисленных статьях освещаются вопросы литья алюминиевых сплавов-силуминов (АЛ2, АЛ9 и т.д.), размер отливок не превышает 400 мм с толщиной стенки до 30 мм. Сложилось мнение, что вследствие малой плотности алюминиевых, магниевых и титановых сплавов и склонности их к окислению, получение из них качественных отливок затруднительно. Безусловно, центробежное литье алюминиевых сплавов - это прогрессивный способ производства фасонных изделий с формой тел вращения при крупносерийном их изготовлении.

В формах с вертикальной осью вращения получают отливки тонкостенные с извилистыми очертаниями, а также с тонким и сложным рельефом. Хотя и считается, что наиболее технологичны сплавы эвтектического состава, а также типа твердых растворов с узким температурным интервалом затвердевания, все же перечень сплавов можно расширить при использовании различных технологических приемов, направленных на повышение качества отливок: интенсификация направленного теплоотвода, вакуумирование формы и литье в защитной атмосфере, литье под легкоплавким защитным флюсом (например, карналлитом), динамическое воздействие на кристаллизующийся металл, автоматическое регулирование скорости подачи (литья) металла и др.

Центробежное литье применяют при изготовлении сложных фасонных отливок из литейных титановых сплавов типа ВТ5Л, ВТ9Л и др., толщина стенки отливок обычно не превышает 8 мм (чаще 4...6 мм) при диаметре в широком интервале от 100 до 400 мм и более. В 2016 г. работниками МИСИС для крупногабаритных отливок сложной формы из жаропрочных и химически активных сплавов предложена литейная форма и литниковая система диаметром более 1000 мм для отливок с толщиной стенки 2,5...3,5 мм.

Считается, что вращение вокруг вертикальной оси рациональнее для мелких фасонных отливок из алюминиевых и магниевых сплавов. При литье заготовок небольшой массы способ занимает



**Рис. 1** Принципиальная схема участка центробежного литья: 1 - индукционная литейная печь; 2 - литейный лоток; 3 - миксер; 4 - центробежная установка для литья кольцевых заготовок

промежуточное место (по механическим свойствам) между литьем в кокиль и полунепрерывным литьем в кристаллизатор. По характеру кристаллизации толстостенные кольцевые заготовки (стенка 250...300 мм) приближаются к крупному слитку (диаметром более 600 мм). Умение лить крупногабаритные заготовки центробежным способом на сегодняшний день крайне важно, об этом мы скажем далее, а пока рассмотрим подробнее преимущества способа ЦБЛ сплавов, типа твердого раствора и некоторых других "экзотических" сплавов с толщиной стенки ≤50 мм.

Скорость охлаждения кольцеобразных отливок при литье в холодную металлическую форму составляет от 50 до 150...200 °С/с, что значительно выше, чем при литье в слиток. Появляется возможность повысить уровень содержания в сплаве легирующих металлов, особенно переходной группы (циркония, гафния и др.). Высокая скорость охлаждения сплава в совокупности с модификаторами зародышевого действия, позволяет получить очень мелкое зерно в отливке (рис. 2), по-видимому, близкое субдендритному, что резко увеличивает пластичность материала. Обращает на себя внимание факт измельчения первичной фазы  $ZrAl_3$  (при 0,5%Zr).

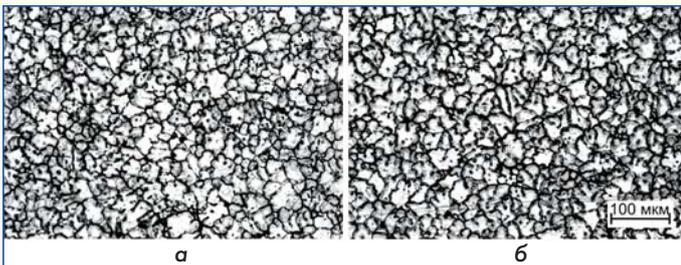


Рис. 2 Зернистая структура сплава 1960: а - внешняя поверхность; б - внутренняя поверхность

Зерно измельчается еще в результате перемешивания расплава при формировании отливки из-за наличия большого количества обломков дендритов. Сочетание повышенной скорости охлаждения и наличие модификаторов зародышевого действия (частицы  $TiAl_3$  и др.) приводит к предельному измельчению, фактором ограничения которого является переохлаждение на фронте кристаллизации. Механизм формирования такой специфической структуры считается таким: при большом числе активных центров кристаллизации в единице объема начинающие расти дендриты не успевают выбросить ветви второго порядка до соприкосновения с соседними (такими же) дендритами. Процесс кристаллизации отливки завершится на начальной стадии роста каждого дендрита. Наряду с измельчением зерна диспергируются и другие элементы среды, в частности частицы вторых фаз, микропоры и т.д.

Причиной интенсивного измельчения структуры является также особенность ЦБЛ, связанная с возникновением центробежной силы и, как следствие, давление на каждый элементный объем жидкого сплава. Известно, что температура плавления металлов, входящих в состав алюминиевого сплава, изменяется прямо пропорционально величине давления:  $\Delta t = k \times P$ , °С; где k для алюминия, меди, магния, марганца равен, соответственно: 0,7; 0,37; 0,77; 0,37. Можно предположить, что рост температуры конца плавления сплава, например, АМгб, будет близким и по величине, и по знаку к приросту для чистого алюминия, иначе говоря, изотермически сдвигается интервал кристаллизации сплава. Затвердевание наступит тогда, когда прирост температуры плавления от давления перекроет повышение температуры сплава от выделения скрытой теплоты плавления. Переход из жидкого состояния в твердое произойдет без отвода тепла, скорость отвода тепла заменяется скоростью приложения давления [1-2]. Чтобы в полной мере реализовать описанное явление, нужно очень высокое давление: интервал кристаллизации сплава АМгб порядка 90 °С, значит  $P = 90/0,7 = 130$  атм.

Давление при ЦБЛ невысокое, например, по расчету при отливке заготовки  $\varnothing 1000 \times 500$  мм оно изменяется от 10 до 1,5 атм при скорости вращения 600 об/мин. В реальных условиях оно еще меньше, так как расчеты проводились для идеальной жидкости (т.е. без учета изменения агрегатного состояния). И, тем не ме-

нее, даже давление в 1...2 атм повлияет на структуру отливки, в первую очередь на уменьшение размера зерна, особенно в толстостенных отливках.

Мелкое зерно в кольцевых отливках небольшой толщины подводит нас к мысли использовать такой материал для изготовления некоторых полуфабрикатов из сплавов, проявляющих эффект сверхпластичности. Многие исследователи считают, что для этого (сверхпластичности) необходимо, чтобы исходная мелкозернистая структура сохранилась в процессе пластического деформирования при высоких температурах (рис. 3). В табл. 1 приведены показатели сверхпластического состояния ряда сплавов [3-4], отметим, что большинство алюминиевых сплавов сверхпластичны, даже самый прочный высоколегированный сплав 1960, имеющий в обычном состоянии очень низкую технологическую пластичность - после деформационно-термической обработки (горячепрессованный пруткок подвергали тепловой прокатке на  $\epsilon = 90\%$ ) при нагреве 470 °С проявляет сверхпластичность.

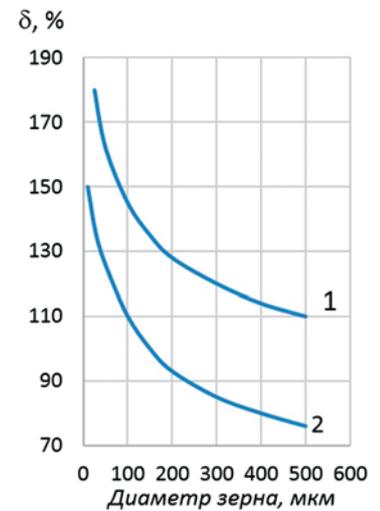


Рис. 3 Влияние размеров зерна в слитке сплава 1960 на пластичность при температурах горячей деформации: 1 - температура испытания 400 °С; 2 - температура испытания 350 °С

Таблица 1

Показатели сверхпластического состояния алюминиевых сплавов					
Сплав	1960	АМг6	АКЧ-1	1420	1993
Размер зерна, мкм	5...6	9...10	9...10	5...6	15
t, °С	470	420	530	450	520
E, с <sup>-1</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>
δ, %	230...850	410	230	700	520

Низкая технологическая пластичность высокопрочных сплавов системы Al-Cu-Mg-Zn (существенно) ограничивает их использование в производстве тонкостенных изделий. Например, традиционная технология изготовления профиля окантовки иллюминаторов воздушного судна сейчас основана на применении методов листовой штамповки и последующей механической обработки, что характеризуется очень низким КИМ (17 %) и требует сложного оборудования, большого количества комплектующих единиц и крепежных элементов. Использование эффекта структурной сверхпластичности при объемной штамповке сплава 1993 позволит за одну операцию получить деталь сложной формы, которая к тому же будет близка к чистовой.

Проведенные исследования убедили нас в перспективности ЦБЛ при создании слоистых композиционных материалов, а именно, последовательной заливкой различных сплавов во вращающуюся форму. Литье представляет собой заливку металлов с временным перерывом между ними. По требованию заказчика мы отливали двух и трехслойные заготовки из сплавов АМгб, АД1 и 1960 с толщиной слоя из АД1 от 5 до 20 мм и сплава от 30 до 60 мм. Обычно выдержка перед заливкой второго слоя составляла 5-10 с. Средний размер зерна в слое 1960 и АМгб был не более 0,3 мм. Из заготовок прессовали трубы и раскатывали листы. На рис. 4 приведена структура композиции 1960-АД1-1960. Изучение структуры соединения слоистых компонентов показывает присутствие в зоне соединения общих зерен, подвергнутых рекристаллизации, что свидетельствует о хорошем их соединении.

Так же была опробована технология центробежного литья сплава типа Al-Mg с содержанием магния до 12 %, листы из кото-

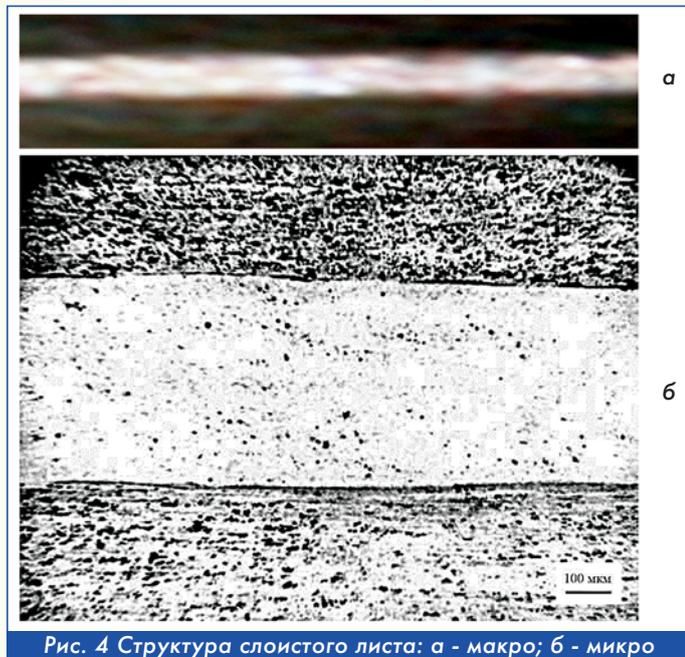


Рис. 4 Структура слоистого листа: а - макро; б - микро

рого предполагали использовать для кузовов легковых автомобилей. Никаких серьезных затруднений при литье не было, раскатка также на лист толщиной до 2 мм прошла успешно.

В работе [5] приведены результаты исследования деформируемого высокопрочного сплава с содержанием 10 % Mg с добавками Zr, Ti, В, Со. Стандартные механические свойства листового материала различных плавок (партий) приближаются к свойствам низкоуглеродистой стали 08ГСЮТ(Ф), используемой для деталей машиностроения:  $\sigma_b = 385...400$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 195...210$  МПа,  $\delta_5 = 36...40$  % и  $\delta_p = 28...30$  %. Эти показатели превосходят как отечественные, так и зарубежные характеристики алюминиевых сплавов системы Al-Mg, причем показатель деформационного упрочнения n - степень увеличения истинного предела текучести при определенной степени деформации для стали 08ГСЮТ(Ф), 08ЮОСВ и АМг10, соответственно 0,35, 0,33 и 0,33.

Не вызвало трудностей литье кольцевых заготовок ( $\varnothing 300 \times 270$ ) из сплава системы Al-PЗМ, с последующей прокаткой до толщин от 2 до 0,12 мм. Полученная фольга использовалась заказчиком для контроля качества точечной и роликовой сварки листов из сплавов АМг, так называемый сплав-свидетель взамен сплава Al-Ag.

В последнее время интерес к ЦБЛ вырос в связи с необходимостью изготовления раскаткой крупногабаритных кольцевых изделий из алюминиевых деформационных сплавов типа твердого раствора (АМг6, 1201). Нужно отметить, что литье заготовок из этих сплавов имеет ряд существенных отличий от сплавов эвтектического типа.

В настоящее время крупногабаритные кольцевые изделия получают двумя способами:

1. Из прессованной полосы, которую сворачивают в кольцо и сваривают, затем раскатывают.
2. Из слитка, заготовки из которого обтачивают, осаживают на прессе, оковывают, прошивают в центре отверстие, придают точные размеры заготовке и раскатывают. Процессы эти весьма трудоемки, многократные технологические нагревы не способствуют получению высокого качества продукции, к тому же КИМ невысокий, а сварка толстых полос (100...150 мм) затруднена.

Мы считаем, что названные полуфабрикаты целесообразнее получать из кольцевой заготовки, отлитой способом центробежного литья и аналогично раскатанной [6-7]. С этой целью в МАИ (лаборатория УНПЛ "ТОМД") были проведены исследования и ряд экспериментов по отработке технологической схемы получения из алюминиевых сплавов различного назначения кольцевых заготовок способом центробежного литья с последующей их деформационной обработкой. В лабораторных условиях отлили кольцевые заготовки диаметром 300x200 мм высотой 50 мм, из сплава АМг6, ко-

торые гомогенизировали, обточили и раскатали при температуре 380...400 °С; механические свойства кольца в долевом направлении приведены в табл. 2.

Приобретая определенный опыт, отлили (сплав АМг6) заготовку  $\varnothing 1000 \times 500$  мм высотой 200 мм. К сожалению, обстоятельства не позволили провести комплекс мероприятий по очистке сплава от неметаллических включений. В литературе нет сведений по особенностям формирования структуры таких массивных отливок из алюминиевых сплавов, поэтому параметры литья выбрали произвольно. Тем не менее, механические свойства раскатанных колец оказались достаточными, на уровне нижнего предела по ОСТ 90073 (см. табл. 2).

Таблица 2

Механические свойства раскатанных колец						
№ обр.	Размер заготовки, мм					
	$\varnothing 300 \times 200$			$\varnothing 1200 \times 700$		
	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
1	371	213	10,7	325	175	13,0
2	378	202	10,7	350	180	17,5
3	354*	201*	11,7*	335	175	17,0
4	352*	194*	11,0*	345	175	19,5

\*-поперечное направление

Отметим еще небрежно приготовленную плавку из-за отсутствия должного опыта: содержание магния в плавке было на нижнем пределе (6,23 %) при явном превышении титана (0,18...0,19 % при требуемых 0,03...0,09 по ГОСТУ).

Между прочим, на немецкой фирме Metallgiesserei Hundtund Weber еще в 2000 г. отлили толстостенные кольца из алюминиевых сплавов диаметром до 1800 мм высотой 200 мм на машине с вертикальной осью вращения, а также диаметром до 1000 мм длиной до 1000 мм на машине с горизонтальной осью вращения (параметры литья и назначение не сообщаются).

В мире широко развиваются композиционные, градиентные материалы, в том числе на алюминиевой основе. Композиционными принято называть материалы, состоящие как минимум из двух разнородных компонентов, имеющих четкую границу раздела. Армирующими компонентами могут быть металлы, их окислы, карбиды бора и др. Технологии получения КМ основаны:

- либо на объемном сочетании готовых компонентов, например, Al+ZrO<sub>2</sub> и др.;
- либо на формировании армирующего наполнителя непосредственно в матрице (Al-Si).

За последние несколько лет композиты с алюминиевой матрицей используют в автомобильной и аэрокосмической промышленности. Сочетание легкого веса, прочности и физических свойств, способствует их широкому применению. Наиболее широко в качестве армирующего материала применяются карбид кремния, карбид бора, оксид алюминия и графит, особенно в аэрокосмической промышленности. Этому способствует в первую очередь, поведение этих материалов при термическом расширении (КТР), тогда как алюминиевый сплав имеет  $\alpha = 24 \times 10^{-6}$  1/град. В случае использования КМ имеется возможность значительно снизить величину КТР. Например, введение в алюминиевую матрицу 20 % частиц SiC позволяет получить  $\alpha \approx 15 \times 10^{-6}$  1/град. Это свойство КМ имеет особое значение для конструкций спутников, на которые воздействуют большие разницы температур (от -150 до +200 °С).

В 1983 г. фирма "Тойота" разработала поршень из КМ для дизельных двигателей, а в СССР уже в 1955 г. изготавливали поршневые заготовки способом центробежного литья. К преимуществам поршней из КМ относятся контролируемое термическое расширение и повышенная износостойкость, в том числе к абразивному износу.

Центробежный способ литья КМ на алюминиевой основе рассмотрен в нескольких работах, опубликованных за последние годы.

В работах А.В. Попова теоретически рассмотрена зависи-

мость влияния температуры расплава, давления в расплаве и действующего на расплав гравитационного коэффициента (GK), варьирующие по модулю, знаку и основным производным на кинетику кристаллизационных процессов металлов и сплавов при ЦБЛ. Направленная кристаллизация при воздействии наложенного силового поля центрифуги позволяет активно влиять на качество твердых растворов при форсировании процессов диффузии, организации преимущественной кристаллографической ориентации, формировании заданной величины зерна отливок от монокристаллической до субдендритной. Таким образом, результатом применения неравномерных и нестационарных искусственных силовых полей является возникновение в расплавах избыточных давлений, что приводит к повышению температуры затвердевания. Чтобы реализовать полностью данные положения необходимы очень высокие давления, которые в настоящее время достичь невозможно, что было продемонстрировано выше на примере сплава  $AMg6$ . Однако теоретические и экспериментальные исследования, проведенные А.В. Поповым, послужили большим заделом в области создания сплавов с заданной структурой и свойствами в условиях искусственных, нестационарных силовых полей, а также способствовали разработке новых технологических подходов в развитии ЦБЛ.

В 2012 году вышла работа Анисимова О.В. по технологии получения композиционных материалов на основе алюминия, упрочненных дисперсными наночастицами  $ZrO_2$  и  $SiC$  в поле центробежных сил центрифуги [8]. Исследования механических свойств композиционного материала, на основе алюминия, упрочненного нанодисперсными частицами и полученного в поле центрифуги, показали, что максимальные прочностные свойства были получены при введении упрочняющих частиц при содержании 0,01...0,3 масс.%. При содержании  $ZrO_2$  в количестве 0,3 масс.% прочность на растяжении составляет 210 МПа, а при содержании  $SiC$  в количестве 1 масс.% прочность на растяжение составляет 175 МПа. Испытания на сухое трение скольжения исследуемых композиционных материалов против контртела из закаленной стали ( $HRC > 45$ ) в диапазоне трибонагружения 5...10 показали, что введение армирующих частиц в матричные сплавы стабилизирует процесс трения, расширяет допустимый диапазон трибонагружения, снижает коэффициент трения и повышает износостойкость.

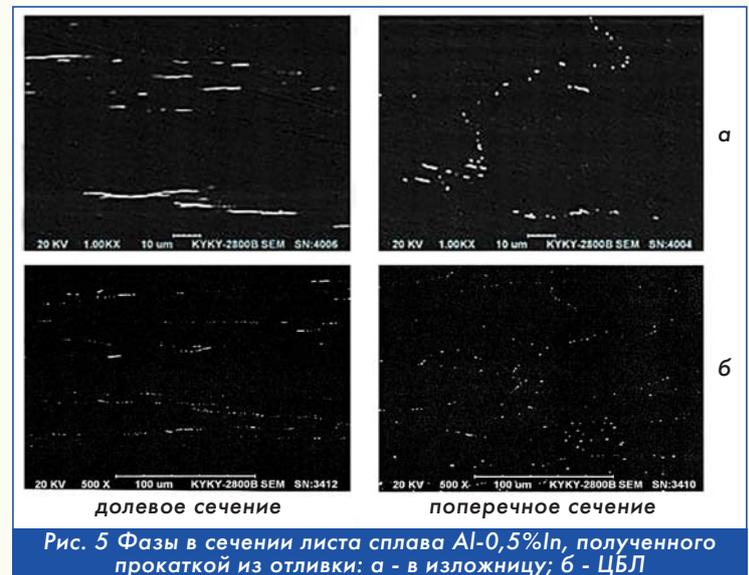
В 2016 году А. Трапезников (ВИАМ) и Е. Гончаренко (МГТУ) изучили возможность получения КМ способом ЦБЛ с целью формирования градиентной структуры [9-11]. На основе сплава АК8М был приготовлен сплав с 22 % Si и 10 % SiC (40 мкм) и отлит в форму, вращающуюся со скоростью 1500 об/мин. Хотя отливка имела много пор с внутренней стороны, по мнению исследователей, это можно трактовать как полезный момент, т.к. при использовании заэвтектических силуминов в трущихся механизмах смазочный материал, попадая в поры, может служить тем резервом, благодаря которому продлевается срок службы механизма. В деталях типа "зубчатое колесо" или "штулка подшипника" требуется высокая твердость поверхности. Центробежные силы влияют на ликвацию включений: могут оттеснить тяжелые частицы на наружную поверхность отливки, а легкие - на внутреннюю. Таким образом, ЦБЛ как нельзя лучше подходит для получения деталей с градиентной структурой.

Получение лигатуры Al-B пока является камнем преткновения для наших технологов, между тем за рубежом давно налажен выпуск лигатур с 3...5 % бора. Малые добавки ( $\leq 0,03$  %) бора в плавке электротехнического алюминия повышают на 15 % электропроводность проводов благодаря удалению вредных примесей Ti, Zr, V, Cr из сплава - образующиеся бориды ликвидируют на подину печи. В настоящее время лигатуры Al-(1...1,5)%B получают в лабораторном масштабе из соли  $KBF_4$ , в которой содержится всего 8,9 % B. Процесс экологически весьма грязный, из-за высокой летучести соли, к тому же разрушается футеровка печи. Мы опробовали технологию получения лигатуры путем введения во вращающуюся форму одновременно жидкого алюминия и порошка карбида бора ( $B_4C$ ), в котором содержание бора до 78 %. Известно, что порошкообразные материалы, в том числе металлические, чрезвычайно трудно

замешивать в жидкий алюминий, но центробежным литьем мы ввели в него 22 % порошка карбида. Полученную композит-лигатуру переплавили в высокочастотной печи, в первой плавке получили 3 % бора (расчет был на 3,5 %), во второй - 4 % (расчет на 4,3 %).

Способ ЦБЛ весьма перспективен в области разработки сплавов для пайки алюминиевых конструкций. Очень важно, чтобы изделия из них (проволока, листы, фольга) имели мелкокристаллическое строение, особенно в отношении включений вторых фаз и первичных интерметаллидов. Этого можно добиться, если использовать в шихте высококачественные лигатуры.

Способ центробежного литья сплавов системы Al-In и сплавов с добавками Pb имеет преимущество перед всеми другими способами, исключая гранулирование в воду, но последний чрезвычайно затратный. Пластины сплавов Al-In применяют в альтернативных источниках тока. Основная трудность при литье - организовать равномерное распределение частиц индия (в твердом алюминии он не растворяется) по объему твердой заготовки (пластины). Причиной трудности является слишком значительная разница в температуре плавления алюминия и индия (659 °C и 150 °C), а также высокая плотность последнего (6,5 г/см<sup>3</sup>). Введение традиционных модификаторов в сплав не допускается, так как они (Ti, Zr, B) ухудшают электрохимические показатели. Единственный способ - повысить скорость кристаллизации сплава, что и позволяет способ ЦБЛ (рис. 5).



Известно наследственное влияние структуры шихтовых материалов (лигатур и отходов) на качество отливок и слитков. Фундаментальные работы в этом направлении проведены В.И. Никитиным [12]. Он отливал лигатуры, в частности Al-(3...4)%Ti, на центробежной машине, размер отливок:  $\varnothing$  300 мм, толщина стенки до 10 мм, при этом ликвация частиц Ti-Al<sub>3</sub> была незначительной благодаря высокой скорости охлаждения, хотя плотность частиц существенно отличается от плотности жидкого алюминия (4,6 и 2,45 г/см<sup>3</sup>). Размер частиц колеблется по сечению отливки от 31x2,9 мм. до 86x7,1 мм. В результате модифицирования такой лигатуры сплава АК12М значительно улучшились механические свойства изделия:  $\sigma_b = 240$  МПа и  $\delta = 1,5...2,5$  % против  $\sigma_b = 180$  МПа и  $\delta = 1$  % для немодифицированного сплава. Причем расчетное содержание добавки титана было весьма небольшим ( $\leq 0,02$  %), что важно, так как шихтовые материалы могут содержать 0,09...0,012 % Ti, т.е. уже на пределе допустимой примеси, не проявляющей модифицирующей способности. ЦБЛ позволяет поднять температуру литья, что способствует увеличению содержания тугоплавкого компонента в лигатуре и получению дисперсных кристаллов интерметаллидов. Можно отливать более "богатые" лигатуры: мы отливали лигатуры с содержанием 10 % Ti, 10 % Cr, 25 % Ni и др. типичные структуры. Лигатуры Al-24%Mn, полученные способом ЦБЛ и отлитые в изложницу, приведены на рис. 6. Сейчас стоят задачи

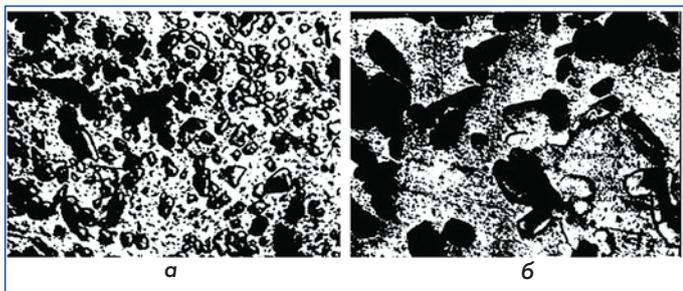


Рис. 6 Структура лигатуры Al-24%Mn (x100):  
а - ЦБЛ; б - в изложницу

создания технологии и производства новых качественных сплавов из низкосортных отходов алюминиевого производства и перспективных экономно-легированных сплавов для отливок ответственного назначения. В решении этих задач важное значение имеет получение модифицирующих и легирующих лигатур с мелко-, микро- и нано-кристаллической структурой.

Для индивидуальной и локальной защиты от воздействия высокоскоростных элементов используют широкий круг защитных броневых структур. Противопульная и противоснарядная стойкость брони на основе алюминиевых сплавов, как и других видов катанной гомогенной брони, определяется совокупностью ее прочностных, пластических и вязкостных характеристик, а не только абсолютным уровнем твердости. Поэтому постоянно идет совершенствование технологий изготовления новых материалов. Повышение легирования при сохранении дисперсной структуры позволило бы в ряде случаев существенно улучшить те или иные свойства сплавов. При высоких скоростях охлаждения в сплавах алюминия с переходными металлами образуются пересыщенные твердые растворы, содержание легирующих компонентов в которых значительно превышает их предельную растворимость по диаграмме состояния. Как показывает опыт проведенных работ, технология центробежного литья слитков обеспечивает достаточную скорость кристаллизации для диспергирования интерметаллидной фазы сплавов с перенасыщенным твердым раствором. Технологические схемы деформации, способствующие интенсивному измельчению литой зеренной структуры и равномерному распределению интерметаллидных фаз по объему заготовки, позволяют получать полуфабрикаты с высоким комплексом механических свойств, мелкодисперсной изотропной структурой.

### Заключение

Процесс кристаллизации алюминиевых деформируемых сплавов в поле действия центробежных сил практически не изучен. Условия литья в защитной среде превращают литейную машину в своеобразный "черный ящик" - так трудно изучать формирование отливки по сравнению с непрерывным литьем. Литейное производство вообще одно из наиболее тяжелых и сложных в машиностроении, и до сегодняшнего дня во многом основано на опыте практической работы технологов, которые постоянно сталкиваются с необходимостью принятия решений в условиях недостатка информации о физико-химической картине процесса. Но без знания закономерностей гидродинамики, теплопередачи, фазовых превращений, протекающих в реальных условиях производства, точно спроектировать технологический процесс, позволяющий в итоге получить продукцию высокого качества, вряд ли удастся.

## ИНФОРМАЦИЯ

Компания EcoMotors International сообщила, что её специалисты разработали ДВС, способный обеспечить 100-км пробег, расходуя при этом 2,5 л топлива.

В этом двигателе камера сгорания образуются двумя подвижными поршнями, двигающимися в противоположных направлениях. Масса этого двигателя, благодаря отсутствию головки блока цилиндров, на 30

%, а размеры в четыре раза меньше, чем у дизельного двигателя с турбонаддувом такой же мощности.

В камере сгорания такой конструкции, по утверждению специалистов компании, обеспечивается более полное сгорание топлива, что, в свою очередь, привело к снижению расхода топлива почти в два раза и значительно уменьшить выбросы.



Первоочередными задачами являются:

- детальное изучение отечественного и зарубежного опыта по доступным информационным материалам;
- детальное изучение процесса кристаллизации при литье крупногабаритных массивных заготовок для варианта вертикального вращения формы;
- компьютерное моделирование на ЭВМ процесса направленного затвердевания отливки без усадочных дефектов, с однородной по сечению структурой с использованием прогрессивных программ моделирования;
- перспективные решения по автоматизации процесса литья, обеспечивающие стабильность механических свойств полуфабрикатов;
- создание литейных машин с вертикальной осью вращения изложницы для литья крупных заготовок из деформируемых алюминиевых сплавов в инертной среде;
- оптимизация режимов плавки и литья алюминиевых сплавов применительно к штучному производству заготовок массой 400 кг и выше.

### Литература

1. В.А. Ливанов "Способ увеличения прочностных и пластических свойств слитков из алюминиевых сплавов" М: Технология легких сплавов, 1995, №3 с. 37-42.
2. Е.Ю. Тонков "Фазовые диаграммы элементов при высоком давлении". М. Наука, 1979, с.192 с илл.
3. П.Г. Микляев "Механические свойства легких сплавов при температурах и скоростях обработки давлением": - М. Металлургия, 1994, с. 279 с илл.
4. Д.Е. Педун, В.П. Пойда и др. "Высокотемпературная сверхпластичность сплава 1933" Вестник Х.Н.У. № 1019, серия физика, вып. 16, 2012, 68-74.
5. Ф.В. Греченков, В.В. Уваров, Е.А. Носова "Перспективы производства и применения в машиностроении высокомагниевого алюминиевого сплава" М: Технология легких сплавов. ВИЛС, 1999, № 1, с. 100-105.
6. Патент РФ № 2487776 "Способ получения крупногабаритных кольцевых полуфабрикатов", 2013 г.
7. А.П. Петров, В.В. Еремеев, Н.В. Еремеев "Аспекты технологии получения кольцевых полуфабрикатов из алюминиевых сплавов". М: Технология легких сплавов. ВИЛС, 2013, №3 с. 7-11.
8. О.В. Анисимов "Технология получения композиционных материалов упрочненных дисперсными наночастицами ZrO<sub>2</sub> и SiC в поле центробежных сил центрифуги" Автореферат диссертации, 2012.
9. А.В. Трапезников, Е.С. Гончаренко. "Центробежное литье армированного заэвтектического силумина". М: Металлы, № 6, 2015, с. 42-45.
10. А.В. Трапезников "Моделирование получения композитов механическим замешиванием". М: Литейное производство, 2012, № 9, с. 3-7.
11. А.В. Трапезников. "Центробежное литье полиармированного композиционного материала". М: Литейное производство, 2013, № 10, с. 52-54.
12. В.И. Никитин, Н.В. Никитин. "Наследственность в литых сплавах". Издание 2-е. М: Машиностроение, 2005, с. 476 с илл.

Связь с автором: labomd@mail.ru