

Ученому секретарю  
диссертационного совета Д.212.165.07  
Г.В. Пачурину  
603950, г. Нижний Новгород,  
ул. Минина, д.24  
НГТУ им.Р.Е. Алексеева

#### Отзыв

официального оппонента на диссертационную работу Д.С. Кривопалова  
«Применение микрокристаллических модификаторов при подготовке алюминиевых  
расплавов к литью с целью повышения качества литых изделий»,  
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.16.04 – Литейное производство

Повышение качества литых изделий из алюминиевых сплавов, снижение их себестоимости и повышение конкурентоспособности на внутреннем и мировом рынках является одной из приоритетных задач, стоящих перед отечественным литейным производством. Поэтому тема диссертационной работы, посвященная существенному вкладу в решение этой задачи, является актуальной, представляет значительный научный и практический интерес.

**Во введении** достаточно убедительно обоснованы актуальность, научная новизна и практическая ценность работы, сформулированы ее цель и задачи, личный вклад автора, приведены форумы различного уровня, на которых была апробирована работа, дана количественная характеристика публикаций, перечислены положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** проведен обзор литературы по теме диссертации, подчеркивается, на основании работ самарской школы литейщиков, важность явлений структурной наследственности (ЯСН) и возможность управлять ею, в частности, за счет процессов модифицирования и рафинирования расплавов, наиболее эффективно влияющих на кристаллизацию и формирование свойств сплавов в отливках.

*В качестве замечаний следует, отметить следующее:*

1. к сожалению, в ссылках на труды ученых, внесших вклад в теорию наследственности сплавов, отсутствует упоминание о Н.Г. Гиршовиче, впервые на примере исследования чушковых литейных чугунов 11 металлургических заводов показавшем роль наследственных признаков шихтовых материалов на структуру и свойства чугунов;

2. желательно уточнить формулировку одной из поставленных задач, различающуюся в тексте реферата (т.р. с. 4: 1. **Теоретически обосновать** эффективность модифицирования... ) и в тексте диссертации (т.д. с. 45: 2. **Уточнить механизмы** модифицирования алюминия...).

Во **второй главе** представлена методика проведения исследований, свидетельствующая об использовании современных и оригинальных методик, приборов и оборудования, комплексном подходе к решению задач оценки структуры, свойств и качества объектов исследования.

**Третья глава** посвящена исследованию и разработке технологий получения микрокристаллических модифицирующих лигатур в условиях ЦЛТ СамГТУ с целью изменения и повышения эффективности модификаторов за счет специальных способов обработки лигатур – жидкофазных (перегревы до 850-1050°C, выдержка 15-20 минут), кристаллизационных (заливка в валковый кристаллизатор со скоростью охлаждения порядка  $10^3$  °C/с и получение лент толщиной 1-1,5 мм), твердофазных (горячая деформация  $\varepsilon = 40\%$ ) и комбинированных (заливка в валки + деформация, перегрев с выдержкой + заливка в валки).

Объектами исследования являлись чушковые, прутковые, центробежные и кокильные модифицирующие лигатуры, поставляемые зарубежными и отечественными производителями.

Исследование лигатур AlSr10 производства ИГМЗ (Таджикистан) и LSM (Англия), AlTi5 (на базе чушковой лигатуры AlTi10 производства LSM) и AlTi5B1 производства KBM (Нидерланды) в исходном состоянии и подвергнутых специальным видам обработки в условиях ЦЛТ, показало, что специальная обработка AlSr лигатур (перегрев до 850 или 1050°C, выдержка 15-20 мин, заливка в валковый кристаллизатор; деформационная ковка в нагретом состоянии или после расплавления и заливки в валковый кристаллизатор) обеспечивает значительное измельчение интерметаллидов и увеличение их количества. В валковых лигатурах AlTi5 и AlTi5B1 наблюдалось значительное измельчение и увеличение количества интерметаллидных фаз  $TiAl_3$  и  $TiB_2$ , повышение степени их упорядоченности, появление включений микроигльчатых и округлых форм.

Впервые проведенное исследование химического состава, макро- и микроструктуры, электропроводности исходной кокильной лигатуры AlSc2 российского производства (ООО «Интермикс-мет») выявило существенную неравномерность распределения скандия по высоте отливки, что сказалось на изменении электропроводности и позволило сделать вывод о возможности использования электропроводности для оценки содержания Sc и качества лигатуры. Использование специальных жидкофазных и кристаллизационных способов обработки лигатуры с высокими скоростями охлаждения ( $10^3$ - $10^6$  °C/с) обеспечило изменение морфологии интерметаллидов от разнообразной хаотичной формы до более однородной и сфероидальной, увеличение степени равномерности распределения интерметаллидов по всему сечению валковой ленты, уменьшение среднего размера интерметаллидов в валковой и прутковой лигатурах.

Особый интерес вызывают получение и исследования нового класса быстрозакаленных наноструктурированных модифицирующих лигатур (AlTi10 и AlZr10), предварительно подготовленных в ЦЛТ и полученных в МИФИ-АМЕТО (г. Москва) в виде фрагментов быстрозакаленных лент на установке «Кристалл-702» со скоростью охлаждения  $10^4$ – $10^6$  °C/с. Отличием быстрозакаленных лигатур является появление дисперсных выделений интерметаллидов размером 0,2-0,7 мкм (доля 55-65%) и до 0,1 мкм (доля 10-20%), повышение микротвердости.

Предложена классификация (т.д. табл.3.5) исследуемых в работе модифицирующих лигатур в зависимости от среднего размера, доли интерметаллидов и реализуемых при специальной обработке скоростей охлаждения.

*В качестве замечаний следует отметить следующее:*

1. на с. 49 т.д. приведена методика исследования быстрозакалённых наноструктурированных лигатур и указывается, что на установке МИФИ использовались чушки исходных лигатур, полученные в ЦЛТ. Желательно уточнить, каким операциям подвергались эти чушки перед обработкой в МИФИ;

2. кажется не совсем правильным называть модифицирующие лигатуры первичными шихтовыми материалами (с. 57 т.д.), так как они вводятся в сплавы, уже находящиеся в жидком состоянии;

3. утверждение «По степени эффективности данные модификаторы в несколько раз превосходят чушковые, кокильные и даже валковые лигатуры» (с. 76 т.д.) кажется бездоказательным, тем более, что в тексте реферата (с. 10 т.р.) эта мысль выражена более «скромно»: «...наиболее высокой модифицирующей способностью должны обладать наноструктурированные лигатуры...»;

4. в связи с замечанием (с. 57 т.д.) об отсутствии в ГОСТ Р 53777-2010 требований по структурным параметрам лигатур возникает вопрос о наличии таких требований в нормативных документах стран-производителей исследованных лигатур;

**Четвертая глава** посвящена исследованию влияния микрокристаллических модифицирующих лигатур на эффективность модифицирования алюминия и его сплавов.

Исследования влияния лигатур, содержащих Sc, Zr и Ti, на структуру и свойства алюминия марки А95 показали, что наиболее эффективными по влиянию на степень измельчения макрозерна являются предварительно подогретые наноструктурированные лигатуры AlTi10 и AlZr10.

В результате исследования влияния модифицирования валковыми лигатурами AlSc2 и AlTi5, центробежной лигатурой AlZr4 и наноструктурированными лигатурами AlZr10 и AlTi10 на структуру деформируемого сплава АМг4,5 установлено, что наиболее эффективными по влиянию на размер макрозерна оказались наноструктурированные лигатуры AlZr10 и AlTi10. При этом установлено, что в этих лигатурах Ti оказался более эффективным модификатором, чем более дорогие Zr и Sc. Это позволило рекомендовать для модифицирования сплавов системы Al-Mg титансодержащие быстрозакаленные лигатуры как наиболее эффективные.

Объектами исследования влияния комплексной обработки расплавов (рафинирование + дегазация + модифицирование добавками различных мелкокристаллических материалов) на структуру и свойства промышленных силуминов являлись сплавы АК9ч, АК6М2 и АК10М2Н.

Влияние комплексной обработки сплава АК9ч проявилось в положительном воздействии на структурные параметры (число и размеры дендритов  $\alpha$ -Al), электропроводность и механические свойства сплава в литом состоянии. Установлены граничные концентрации содержание стронция, превышение которых приводит к перемодифицированию и ухудшению механических свойств. Сделан вывод о целесообразности применения стронциевых лигатур вместо титановых при модифицировании доэвтектических силуминов. Сравнительные исследования структуры и свойств сплава АК9ч, модифицированного валковыми лигатурами Al-Ti-B и импортными лигатурами такого же состава, изготовленными в виде прутков, показали преимущества валковых лигатур.

При исследовании влияния модифицирующей и комплексной обработки на структуру (твёрдый раствор, эвтектический кремний), электропроводность, плотность, механические свойства сплава АК6М2 в литом и термообработанном

состояниях использовались мелкокристаллические модификаторы и рафинирующие флюсы по методике, аналогичной применяемой при исследовании сплава АК9ч. В качестве шихты, применялись отходы производства (от 10 до 100%). В ряде экспериментов расплав, в отличие от технологии, принятой на АО «АВТОВАЗ», сначала рафинировали, а затем модифицировали. В результате проведенных исследований были выявлены условия комплексной обработки расплава, обеспечивающие наиболее высокие параметры исследуемых характеристик сплава.

Исследование влияния комплексной обработки расплава на структуру и свойства поршневого сплава АК10М2Н показали результаты, принципиально согласующиеся с результатами экспериментов, полученными по сплаву АК6М2. Дополнительно установлено положительное влияние комплексной обработки расплава на ТКЛР сплава при различных температурах испытаний.

*В качестве вопросов и замечаний следует отметить следующее:*

1. почему результаты исследования по влиянию модифицирования на структуру алюминия А95 не нашли отражение в автореферате?

2. все виды обработки сплавов в жидком состоянии предназначены, в конечном итоге, для обеспечения заданных, в частности механических, свойств; почему не для всех исследованных сплавов приведены данные по механическим свойствам?

3. на стр. 95 т.д. указывается: «Для всех видов модификаторов рекомендуется проводить специальные виды обработки (жидкофазная, кристаллизационная, деформационная и т.д.) для получения мелкокристаллической структуры». Кому предназначены эти рекомендации (работникам литейных цехов, производителям лигатур), какие именно виды обработки и в каких случаях следует применять, учитывается ли стоимость дополнительных затрат на обработку лигатур?

4. кажется неправомерным неоднократное употребление в тексте диссертации понятия «оптимальность» (например: «В Центре литейных технологий СамГТУ были проведены опыты по определению **оптимальной** технологии...», с.106 т.д.), так как фактически оптимизационные задачи (параметр оптимизации, ограничения) не решались; что такое «...**наиболее оптимальные** результаты...» (с. 152 т.д.) – вообще непонятно.

Чрезвычайно полезными и важными являются результаты выполненного при участии диссертанта технологического аудита предприятий «РКЦ-Прогресс» и АО «АВТОВАЗ» (**пятая глава**).

Проведенный анализ технологии получения сплава АК9ч и кокильной отливки «Корпус» в условиях «РКЦ-Прогресс» позволил сформулировать рекомендации, направленные на повышение качества литья.

На основании анализа действующих технологий на АО «АВТОВАЗ» выявлены причины, оказывающие существенное отрицательное влияние на уровень механических свойств и повышенный брак по металлургическим дефектам в отливках, разработаны рекомендации, в частности по изменению порядка обработки рабочих расплавов при их подготовке к литью.

При проведении промышленных экспериментов с сопоставлением эффективности действующей и предложенной опытно-промышленной технологий комплексной подготовки расплава АК10М2Н с применением роторных установок периодического действия (РУПД) установлена целесообразность перенесения

операции подшихтовки расплава магнием в раздаточную печь, показана высокая эффективность использования РУПД при подготовке расплавов к литью.

При проведении исследований по комплексной обработке расплавов АК6М2 были реализованы две серии экспериментов с использованием РУПД. В первой серии испытаний модифицирование расплавов АК6М2 осуществляли прутковой лигатурой AlTi5B1 фирмы «ARNILIPPS», во второй серии исследовали влияние способа ввода и количества прутковой лигатуры AlSr10 на свойства сплава АК6М2. Особенностью проведенных экспериментов являлось их доведение до получения конкретных отливок. Установлено, что модифицирование лигатурой AlTi5B1 наиболее существенно влияет на снижение содержания водорода, повышение плотности сплава и измельчение дендритов алюминия, а модифицирование лигатурой AlSr10 в большей степени вызывает измельчение кристаллов эвтектического кремния и увеличение предела прочности в термообработанном состоянии.

На основании анализа лабораторных результатов и опытно-промышленных испытаний разработаны технологические рекомендации по комплексной обработке алюминиевых расплавов АК6М2 и АК10М2Н перед заливкой.

*В качестве вопросов и замечаний следует отметить следующее:*

1. какие конкретные выводы должны быть сделаны из зафиксированного факта, что «обработка расплава с применением РУПД способствует существенному повышению концентрации натрия в сплаве» (с. 136 т.д.)?;

2. условия проведения экспериментов на предприятии и в ЦЛТ существенно отличались, поэтому утверждение «Результаты опытно-промышленных испытаний... полностью совпадают с результатами лабораторных исследований, выполненных в ЦЛТ СамГТУ» (с. 152 т.д.) вызывают сомнения в точности формулировки;

3. кто производитель использованных в промышленных экспериментах прутковых лигатур (п.5.3 т.д.), ведь в перечне продукции ЦЛТ (специальных способов обработки) прутковые лигатуры не упоминаются? В перечне применяемых первичных лигатур (с. 7 т.р.) центробежная лигатура AlZr4, очевидно ошибочно, отнесена к продукции ЦЛТ.

4. не совсем понятно упоминание (с. 4 т.р., п.2 с. 156 т.д.) о разработке технологической инструкции (технологического регламента?) по получению модифицирующих микрокристаллических лигатур AlTi5, AlZr4 и AlSc2 (ТИ-ЛВТ-05-2015): что предусматривается - вторичная переработка поступающих готовых лигатур или полный цикл их изготовления?

Все вышеприведенные вопросы и замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы.

Текст автореферата и публикации достаточно полно отражают содержание диссертации.

Текст и содержание работы соответствуют паспорту специальности 05.16.04 – Литейное производство.

Высокий научный и методический уровень выполненной работы, использование современных и оригинальных методик, приборов и оборудования, особая ценность результатов технологического аудита предприятий и промышленных экспериментов, использование результатов работы в учебном процессе СамГТУ свидетельствуют о полном соответствии диссертационной работы требованиям ВАК к кандидатским диссертациям.

Автор диссертационной работы Д.С. Криволатов заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.04 – Литейное производство

Засл. работник ВШ РФ,  
профессор кафедры «Металлургические и литейные технологии»  
ИММвТ СПбПУ Петра Великого  
д-р техн. наук, профессор

 Косников

Геннадий Александрович Косников

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. *Новотехническая*, 79  
ФГАОУ ВО «СПбПУ Петра Великого»  
Институт металлургии, машиностроения и транспорта  
Кафедра «Металлургические и литейные технологии»  
Тел. (812) 552-67-52



195257, Россия, г. Санкт-Петербург,  
Гражданский проспект 85, кв. 147  
Тел. (812) 653-38-59  
E-mail: genkosnikov@mail.ru

Подпись *Косникова Г.А.*  
УДОСТОВЕРЯЮ  
Ведущий специалист  
по кадрам *Климова С.А.*  
*12 декабря 2016 г.*