

УДК 669.715:551.442

**В. П. Головаченко, Г. П. Борисов, И. В. Хвостенко,  
А. Г. Вернидуб**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

### **ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И РОТОРНОЙ ОБРАБОТКИ НА ГОРЯЧЕЛОМКОСТЬ ВЫСОКОПРОЧНОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА ВАЛ 10**

*С использованием пробы Зингера-Дженигса установлено, что причинами образования горячих трещин являются низкая температура кокиля и локальное скопление хрупкой эвтектики. Роторная обработка расплава устраняет его химическую неоднородность и в 2,0-2,5 раза измельчает глобулы  $\alpha$ -фазы. Нагрев кокиля свыше 300 °С снижает темп нарастания линейной усадки, что способствует получению «здоровой» отливки.*

**Ключевые слова:** горячеломкость, алюминиевый сплав ВАЛ 10, проба Зингера-Дженигса, роторная обработка.

*З використанням проби Зінгера-Дженігса встановлено, що причинами утворення гарячих тріщин є низька температура кокіля та локальне скупчення крихкої евтектики. Роторна обробка розплаву усуває його хімічну неоднорідність та у 2,0-2,5 рази подрібнює глобулі  $\alpha$ -фази. Нагрівання кокілю понад 300 °С знижує темп наростання лінійної усадки, що сприяє отриманню «здорового» виливка.*

**Ключові слова:** горячоломкість, алюмінієвий сплав ВАЛ 10, проба Зінгера-Дженігса, роторна обробка.

*Using Singer-Jennigs' sample it established the cause of hot cracking is the low temperature of the casting mold and the local accumulation of brittle eutectic. The rotary treatment of melt eliminates its chemical heterogeneity The size of  $\alpha$ -phase globules are decreased in 2,0-2,5. Heating the mold more than 300 °C reduces the rate of increase of linear shrinkage, which contributes to a "healthy" casting.*

**Keywords:** hot-shortness, aluminium alloy VAL 10, sample Singer-Dzhenigsa, rotary treatment.

**В**ысокопрочный широкоинтервальный алюминиевый сплав ВАЛ 10 склонен к горячим трещинам. Наиболее значимыми факторами, влияющими и на горячеломкость сплавов, являются пластичность в твердожидком состоянии и его линейная усадка в эффективном интервале кристаллизации.

Модифицирование расплавов – один из эффективных методов устранения горя-

челомкости. Измельчение зерна, устранение зоны столбчатых кристаллов снижают температуру начала линейной усадки и верхнюю границу интервала хрупкости, повышают относительное удлинение в этом интервале [1].

Однако модификаторы могут перенасыщать сплав хрупкими интерметаллидами и тем самым снижать его потребительские свойства. В Физико-технологическом институте металлов и сплавов НАН Украины разработан метод механического модифицирования при низких температурах перегрева расплава, основанный на использовании ротора, эксцентриситет которого может составлять 0,5-2,0 мм, а число оборотов – 400-800 об/мин.

Суть механического модифицирования состоит в том, что расплав обрабатывают «холодным» графитовым ротором, в контактной зоне которого происходит переохлождение контактирующих приповерхностных слоев расплава и за счет этого генерируется дополнительное множество центров кристаллизации, равномерно распределенных в объеме металла.

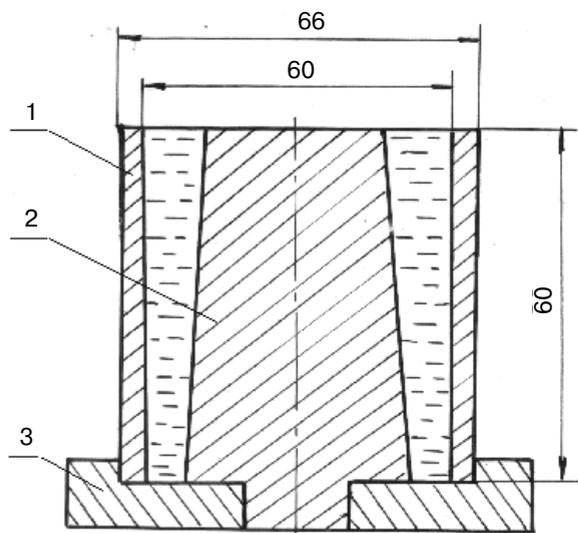


Рис. 1. Схема кольцевой пробы Зингера-Дженинга: 1 – съемный стакан; 2 – стержень; 3 – поддон

Посредством многофункционального термического анализа [2] определяли химический состав высокопрочного алюминиевого сплава ВАЛ 10, а также температуры стояний ликвидуса и солидуса, величина которых составила соответственно 652 и 532 °С при ширине интервала кристаллизации 120 °С. Таким образом, высокопрочный алюминиевый сплав ВАЛ 10 является широкоинтервальным.

В сплавах системы Al-Cd-Cu-Mn, к которым относится высокопрочный алюминиевый сплав ВАЛ 10, четвертные фазы не образуются, но присутствуют фазы Al, CuAl<sub>2</sub>, MnAl<sub>6</sub>, Cu<sub>2</sub>Mn<sub>3</sub>Al<sub>20</sub> и Cd [3].

Совместное влияние кадмия и марганца на упрочнение при старении сплавов системы Al-Cu состоит в следующем: кадмий препятствует образованию зон Гинье-Пренстона и ускоряет образование θ-фазы, снижает эффект естественного старения и усиливает эффект искусственного старения, марганец связывает медь в тройное соединение, снижая таким образом эффект старения сплавов с содержанием меди меньше максимального. При совместном введении марганца и кадмия преобладает влияние кадмия.

Соединение CuAl<sub>2</sub> чрезвычайно хрупкое, обладает высокой твердостью 4000-6000 МН/м<sup>2</sup> по Виккерсу. При повышении содержания меди наблюдается непрерывное увеличение твердости, а прочность, особенно пластичность, за-

Исследование трещиностойкости отливок проводили с использованием кольцевой пробы Зингера-Дженинга (рис. 1), хорошо зарекомендовавшей себя при исследовании цветных сплавов. Сплав заливают прямо в открытую полость формы – простейший кокиль со стальным стержнем. На поверхности кольцевой отливки измеряется суммарная длина трещин, являющаяся показателем горячеломкости. Кольцевая проба чрезвычайно проста, производительна, требует небольшого расхода металла.

Жесткость кольцевой пробы получали за счет сменного внутреннего стального стержня с таким расчетом, чтобы отливка данной серии имела максимальную трещину.

висят от того, в каком виде находится медь в твердом растворе: в виде округлых равномерно распределенных частиц или непрерывной сетки по границам зерен.

Массовая доля легирующих элементов в исследуемом высокопрочном алюминиевом сплаве ВАЛ 10 составила, в %: 4,8 Cu; 0,55 Mn; 0,25 Ti; 0,15 Cd; 0,1 Fe.

Технологические параметры литья кольцевой пробы из сплава ВАЛ10 приведены в таблице.

### Технологические параметры литья кольцевой пробы

Сплав	Температура, °С					Трещина, мм
	расплава в печи	заливки	кокиля	роторная обработка		
				начало	конец	
ВАЛ10	750	680	200	–	–	вдоль образующей
–"	–"	670	224	–	–	то же
–"	–"	670	250	–	–	то же
–"	–"	660	270	–	–	неспай
–"	–"	670	280	700	670	1/2 образующей
–"	–"	678	300	700	678	нет
–"	–"	670	316	700	672	–"
–"	–"	670	340			–"
–"	–"	660	340	700	662	–"
–"	–"	660	350	–	–	–"
–"	–"	740	350	–	–	–"
–"	–"	740	350	750	741	–"

На рис. 2 представлены характерные кольцевые пробы из сплава ВАЛ 10, полученные согласно режимам, приведенным в таблице.

Кольцевые пробы, залитые при низких перегревах 670–680 °С и температуре кокиля 200–224 °С, вдоль образующей имели сквозные трещины шириной 1 мм (рис. 2, а), а при температуре 660 °С, то есть при перегрева расплава в 8 °С и температуре кокиля 270 °С, образовался неспай кольца вдоль образующей.

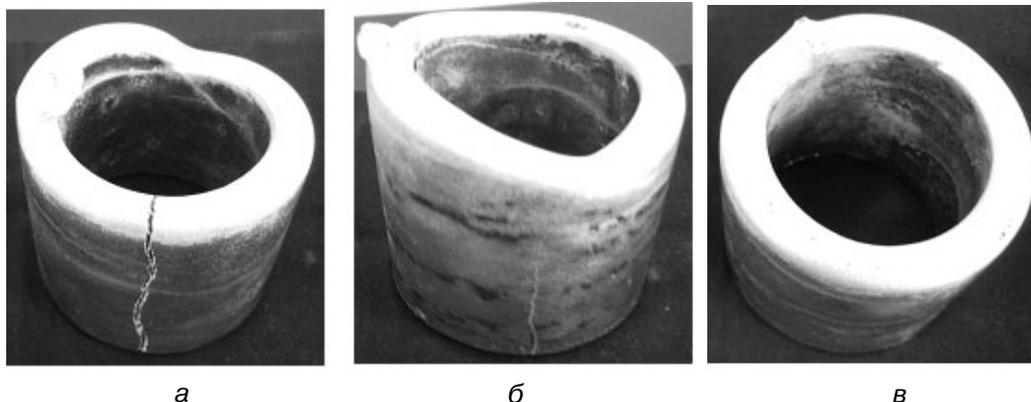


Рис. 2. Характерные виды горячих трещин кольцевых проб, изготовленных из высокопрочного алюминиевого сплава марки ВАЛ10: а – сквозная вдоль образующей; б – 1/2 образующей; в – цельная проба

Механическое модифицирование расплава с помощью графитового ротора ( $n = 800$  об/мин,  $T_{\text{зал}} = 670$ ,  $T_{\text{к}} = 280$  °С) существенно повлияло на процесс трещинообразования. В процессе кристаллизации отливки образовалась трещина (0,2 мм) до половины образующей (рис. 2, б). При повышении температуры кокиля всего на 10 °С и проведении роторной обработки расплава при этой температуре в кольцевой пробе отсутствовали трещины (рис. 3). При дальнейшем повышении температуры кокиля в диапазоне температур 300-350 °С и роторной обработке расплава трещины не образовывались даже при температуре заливки 700 °С, то есть при перегреве в 88 °С.

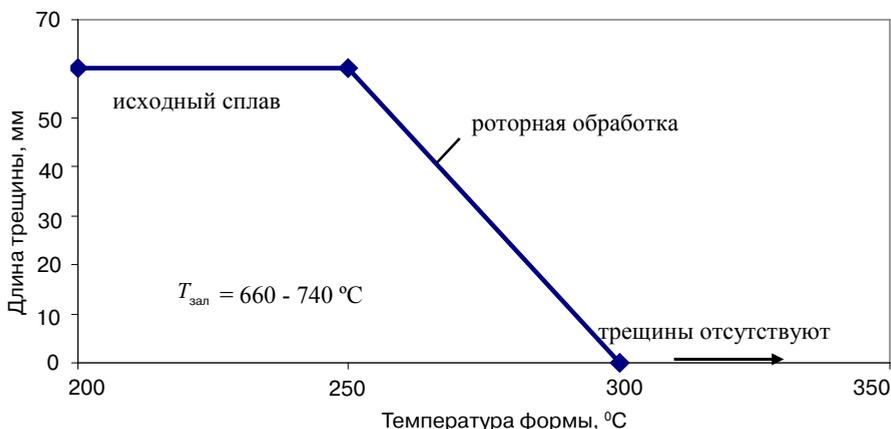


Рис. 3. Влияние температуры формы и роторной обработки на трещинообразование в кольцевой пробе из сплава марки ВАЛ 10

Следует отметить, что скорость охлаждения пробы, регулируемая как температурой расплава, так и кокиля, существенно влияет на процесс горячеломкости кольцевой пробы. Однако больший вклад вносит температура кокиля, которая способна существенно изменить усадочно-напряженное состояние кольцевой пробы.

Высокая температура кокиля (300-350 °С) с ранним извлечением отливки способствует снижению темпа нарастания линейной усадки кольцевой пробы и позволяет эффективно бороться с процессом трещинообразования.

На рис. 4 приведены микроструктура пробы, полученная при низких (670 °С) и высоких температурах (740 °С) заливки в условиях теплосиловой роторной обработки, а также (для сравнения) – исходная.

Исследование микроструктуры кольцевых проб с помощью оптического микроскопа МИМ8, фотокамеры и персонального компьютера позволило установить степень ее влияния на процесс трещинообразования.

Анализ микроструктуры кольцевой пробы убедительно свидетельствует о том, что сочетание роторной обработки с низкой температурой заливки расплава существенно влияет на процесс кристаллизации кольцевой пробы.

Как следует из рис. 4, д, колонии сложной хрупкой эвтектики (~8 %) системы Al-Cu-Mn-Cd с протяженной интерметаллидной фазой длиной до 100-200 мкм являются, наряду с усадочными напряжениями, причинами образования горячих трещин в кольцевой пробе. Повышение температуры формы способствует релаксации напряженного состояния пробы в полости формы.

Роторная обработка расплава ( $n = 400-800$  об/мин) устраняет его химическую неоднородность, а также в 2,0-2,5 раза измельчает глобулы  $\alpha$ -твердого раствора за счет эффекта механического модифицирования и тем самым создаются условия получения качественной отливки.

В процессе исследования установили:

- высокопрочный алюминиевый сплав ВАЛ 10 склонен к горячеломкости в диапазоне температур кокиля 200-300 °С;
- причиной образования горячих трещин в кольцевых пробах является нерав-

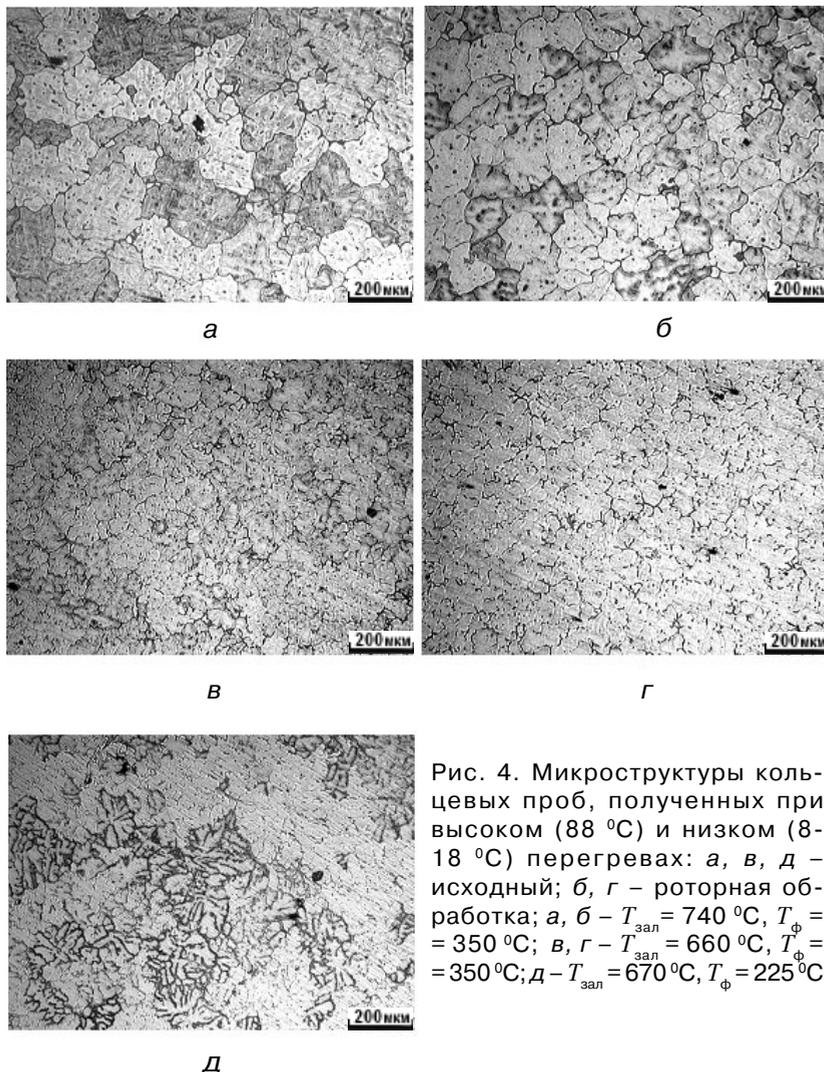


Рис. 4. Микроструктуры кольцевых проб, полученных при высоком (88 °С) и низком (8-18 °С) перегревах: а, в, д – исходный; б, г – роторная обработка; а, б –  $T_{\text{зал}} = 740$  °С,  $T_{\text{ф}} = 350$  °С; в, г –  $T_{\text{зал}} = 660$  °С,  $T_{\text{ф}} = 350$  °С; д –  $T_{\text{зал}} = 670$  °С,  $T_{\text{ф}} = 225$  °С

д

номерное (локальное) распределение хрупкой эвтектики системы Al-Cu-Mn-Cd в объеме металла; величина отдельных интерметаллидов составляет 100-200 мкм;

– роторная обработка расплава ( $n = 400-800$  об/мин) устраняет его химическую неоднородность, а также в 2,0-2,5 раза измельчает глобулы  $\alpha$ -твердого раствора и тем самым создает условия получения качественной отливки;

– повышение температуры формы пробы свыше 300 °С приводит к уменьшению темпа нарастания линейной усадки и более равномерному распределению интерметаллидных фаз в объеме отливки.



### Список литературы

1. Новиков И. И. Горячеломкость цветных металлов сплавов. – М.: Наука, 1966. – 299 с.
2. Бялик О. М., Смутьский А. А., Иванчук Д. Ф. Контроль качества металла методом термического анализа // Литейн. пр-во. – 1982. – № 5. – С. 8-9.
3. Мондольфо Л. Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. – М.: Metallurgizdat, 1979. – 640 с.

Поступила 17.04.2014