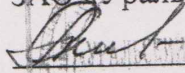


Утверждаю

Генеральный директор
ЗАО «Уральский проект»

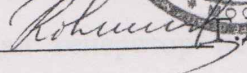


Н.А. Кокарева

« _____ » 2008г.

Утверждаю

Зам. генерального директора по
науке и производству ОАО «ВИЛС»



Д. Ковалев

« _____ » 2008г.

Заключение

по работе «Волновая обработка расплава 4-х алюминиевых сплавов – технический Al, AlMg6, Al-0,2%Sc-0,1%Zr, Al-18%Si в волновом излучении Sc и Zr, Sc и Zr, Mg, P соответственно», выполненной по договору №2/2008 на создание (передачу) научно-технической продукции от 09.06.2008г. между ОАО «ВИЛС» (Заказчик) и ЗАО «Уральский проект» (Исполнитель)

Москва

2008г.

1 Состояние вопроса и постановка задачи

В ЗАО «Уральский проект» создан генератор нестационарного электромагнитного поля с потребляемой мощностью до 50 Вт для обработки расплава, получивший название СВМ-генератор.

В 2006-2007 г.г. с помощью указанного генератора была проведена волновая обработка расплава ряда сталей и чугунов в электросталеплавильной печи и в ковше, в результате которой были получены существенные положительные результаты. Например, были улучшены механические свойства валов из стали 17Г1С: нижний предел σ_b повышен с 450 до 500 МПа, δ с 17 до 25%, уменьшился брак по трещинам при обработке давлением (данные ЗАО «Уральский проект»). Независимой научно-исследовательской группой «Фрактал» (руководитель С.А. Курапов) на площадке ОАО «Авиадвигатель» была проведена волновая обработка расплава никелевого сплава ЖС6У, из которого были отлиты образцы для определения механических свойств и сопловые лопатки. Установлено, что лопатки, обработанные полем, имеют более равномерную зёрненную структуру, а длительная прочность образцов, обработанных полем, увеличилась на 35-66,5% (данные из технического отчета ОАО «Авиадвигатель», 2005 г., представленные ЗАО «Уральский проект»).

Испытания, проведенные в ЦНИИТМАШ, показали, что после волновой обработки «резонансными полями» прослеживается тенденция повышения сопротивляемости питтинговой коррозии стали типа SAF2205 (02X22H5AM3) (данные из отчета Испытательного центра ЦНИИТМАШ, 2008г., представленные ЗАО «Уральский проект»).

Данных по волновой обработке алюминиевых деформируемых сплавов описываемым методом не имеется, поэтому, учитывая вышеописанные положительные результаты, полученные на сталях и

никелевых сплавах, в данной работе была поставлена задача исследовать возможность модифицирования структуры слитков и повышения комплекса свойств деформированных полуфабрикатов из алюминия и его сплавов на основе систем Al-Mg, Al-Sc-Zr и Al-Si путем вышеописанной волновой обработки расплава («виртуального легирования» или «V-легирования»).

2 Экспериментальная часть

2.1 Исследуемые материалы и методика исследования

В качестве материала для исследований выбрали технический алюминий, сплав AMg6, сплав Al-0,2%Sc-0,1%Zr и заэвтектический силумин Al-18%Si. Из каждого сплава необходимо было приготовить плавки массой по 4 кг и отлить контрольные слитки размером 16×160×200 мм и круглые слитки диаметром 25 мм в стальную изложницу, а затем такие же слитки отлить из расплава, подвергнутого волновой обработке. Из плоских слитков необходимо было изготовить листы. В качестве критериев, по которым производится оценка влияния волновой обработки на структуру и свойства полученных слитков и полуфабрикатов, были выбраны: зеренная структура слитков, электропроводимость металла слитков, электропроводимость и механические свойства листов, изготовленных из этих слитков. В качестве материала основных модификаторов, кристаллические решетки которых должны быть индуцированы в расплав с помощью волнового излучателя СВМ-генератора, были выбраны:

- Sc и Zr для алюминия;
- Sc и Zr для сплава AMg6;
- Mg для сплава Al-0,2%Sc-0,1%Zr;
- фосфор (P) для заэвтектического силумина.

2.2 Оборудование для волновой обработки расплава

Волновая обработка расплава производилась представителями ЗАО «Уральский проект» с помощью СВМ-генератора ЗАО «Уральский проект» по договору №2/2008 на создание (передачу) научно технической продукции между ЗАО «Уральский проект» (Исполнитель) и ОАО «ВИЛС» (Заказчик). Генератор состоит из 4-х основных частей:

- блок генераторов стандартных сигналов (ГСС) с тремя генераторами ГСС-40 мощностью по 15 Вт каждый;
- блок тороидальных высокочастотных трансформаторов (ТТ) с тремя ТТ;
- пушка-излучатель с двумя соленоидами (С1, С2) и тремя конверторами (К1, К2, К3);
- источник постоянного тока напряжением 3,3 в.

Модификатор в виде таблетки из соответствующего материала (Sc, Zr, Mg и т.д.), в волновом излучении которого обрабатывается расплав, закладывается в ТТ и конверторы. Блоком ГСС формируется основная и модулирующая частота f_0 и f_m соответственно, где:

f_0 -резонансная частота собственных колебаний ядер атомов модификатора, определяется из таблиц;

f_m – модулирующая низкая частота, определяется на основании собственного опыта Исполнителя.

На конверторы К1, К2 и К3 частота подается с блока ТТ.

На соленоиды С1 и С2 подается также частота «антиалюминия» (или «антикремния») – резонансная частота алюминия (или кремния), соответствующая его обратному спиновому состоянию, равная 26,051 МГц для «антиалюминия» и 19,865 МГц для «антикремния», а также «прямая магнитостатика», когда соленоиды намагничиваются постоянным магнитным полем в направлении распространения

электромагнитной волны, и «обратная магнитостатика», когда соленоиды намагничиваются в обратном направлении.

Пушка-излучатель располагается на расстоянии около 3 м от тигля с обрабатываемым расплавом с таким расчетом, чтобы фокус излучателя находился в расплаве. Положение фокуса определяет Исполнитель с помощью собственного прибора типа магнитной рамки.

2.3 Отливка контрольных слитков и слитков из расплава, подвергнутого волновой обработке

В качестве шихты использовали алюминий чушковой марки А99, магний МГ95, лигатуры Al-5%Ti, Al-2%Sc, Al-5%Zr и готовый силумин Al-18%Si. Готовили 4 одинаковых комплекта шихты для алюминия и по 3 одинаковых комплекта для сплавов. Расплав готовили в электропечи сопротивления с графитовым тиглем, расплав рафинировали флюсом №2, максимальная температура расплава 850 °С, температура литья 750-770°С. Из первого комплекта шихты каждого состава готовили контрольные слитки размером 16×160×200 мм и диаметром 25 мм, отлитые в стальные изложницы.

Отлили по одной контрольной плавке каждого состава:

- плавка №01 – алюминий А99;
- плавка №02 – АМг6;
- плавка №03 – Al-0,2%Sc-0,1%Zr;
- плавка №04 – силумин Al-18%Si.

Для проведения волновой обработки расплава готовили плавки из оставшихся 3-х комплектов шихты для алюминия и двух комплектов шихты для каждого из сплавов. Помимо плавков с намеченными модификаторами, дополнительно провели плавки с использованием в качестве модификатора также и других элементов: Nb, Mo, Ag, В, Ti, Cd,

Cr, Cu, S, кроме того в качестве модификатора с аморфной структурой использовали метилметакрилат (плексиглас).

Провели волновую обработку 3-х плавов алюминия (плавки №№1, 2 и 10), 2-х плавов сплава AlMg6 (плавки №№3 и 4), 2-х плавов сплава Al-0,2%Sc-0,1%Zr (плавки №№5 и 6) и 2-х плавов силумина Al-18%Si (плавки №№7 и 8). Из обработанных плавов отлили такие же слитки, как и из контрольных плавов. Режимы волновой обработки приведены в табл.1. Акт о проведении волновой обработки приведен в Приложении к настоящему Заключению.

2.4 Изготовление листов

Все плоские слитки, как контрольные, так и полученные из расплава, подвергнутого волновой обработке, гомогенизировали по режиму:

- A99 и Al-0,2%Sc-0,1%Zr: 360 °C, 4 ч;
- AlMg6 и Al-18%Si: 500 °C, 4 ч.

Затем фрезеровали с двух сторон до толщины 12,5 мм, после чего прокатывали на стане дуо до толщины 2 мм с предварительным нагревом до 380 °C и выдержкой при этой температуре 30 мин. Полученные таким образом листы подогревали до 200 °C и правили в многовалковой роликоправильной машине. Правленные листы резали на заготовки, которые отжигали по режиму, принятому для сплавов Al-Mg-Sc (01570), а именно: 320 °C, 1 ч, охлаждение с печью со скоростью 30 °C/ч до 250±10°C, выдержка 1 ч, далее охлаждение на воздухе. Данный отжиг предпринят для исключения влияния наклепа.

Из отожженных заготовок изготавливали стандартные разрывные образцы для определения механических свойств листов в продольном направлении.

2.5 Исследование структуры слитков и электропроводимости и механических свойств листов

Исследовали структуру слитков диаметром 25 мм в состоянии после литья. Макроструктуру слитков исследовали на шлифах, подвергнутых травлению в специальном реактиве, содержащем хлорное железо, для лучшего выявления зеренной структуры. Микроструктуру слитков (кроме силумина) исследовали после электрополировки и анодного оксидирования на микроскопе Neophot-21, а в отдельных случаях (АМг6 и Al-0,2%Sc-0,1%Zr) – на нетравленных шлифах в растровом электронном микроскопе (РЭМ) КУКУ-2000. Структуру слитков из сплава Al-18%Si исследовали на шлифах, подвергнутых слабому травлению в реактиве Келлера. Удельную электропроводимость слитков и листов определяли вихретоковым методом в соответствии с ГОСТ 27333-87 на приборе «Константа-К6».

Механические свойства отожженных листов определяли при испытании на растяжение стандартных образцов с шириной рабочей части 15 мм и начальной расчетной длиной 30 мм в соответствии с ГОСТ 1170-84, разрывная машина 5Ц-46, шкала 2,5 т и 1 т, скорость деформирования до предела текучести 6 мм/мин, после предела текучести 10 мм/мин. Определяли σ_b , $\sigma_{0,2}$, δ_5 , количество образцов на точку 2 шт.

2.6 Результаты и обсуждение

Структура слитков приведена на рис. 1-5. Результаты измерения электропроводимости слитков и листов – в табл. 2. Результаты испытаний на растяжение листов – в табл. 3.

Как видно из данных рис. 1-5, никаких принципиальных изменений в структуре слитков под влиянием волновой обработки расплава не произошло за исключением того, что в слитках из сплава АМг6

Таблица 1

Режимы волновой обработки расплава (модификаторы, основные и модулирующие частоты f_0 и f_m , подаваемые на конверторы K1, K2, K3 и соленоиды C1, C2)

№ плавки	Сплав	K1		K2		K3		C1		C2	
		f_0 , МГц	f_m , Гц	f_0 , МГц	f_m , Гц	f_0 , МГц	f_m , Гц	f_0 , МГц	f_m , Гц	f_0 , МГц	f_m , Гц
1	A99	Sc, Sc+B 24,29 557,4		Zr, Zr 9,331 0,0138		Sc, Sc 24,29 557,4		Анти-Al 26,051 0,00138		Прямая магнитостатика	
2	То же	То же		Zr, Nb, Mo, Mo 6,652 141,6		Mg, Mg, Ag 4,652 0,001388		Анти-Al пост. ток		Обратная магнитостатика	
3	AMг6	То же		Zr, Zr 9,331 0,0138		Sc, Sc 24,29 557,4		Анти-Al 26,051 0,00138		Прямая магнитостатика	
4	То же	То же		Zr, B 32,084 682,97		Cd, Cd 22,182 0,001388		Анти-Al пост. ток		Сг пост. ток	
5	Al-0,2%Sc-0,1%Zr	Mg, Mg 6,1195 0,001111		Cu, Ag 4,652 99,03		Mg, Mg 6,1195 0,001111		Mg, Mg 6,1195 0,001111		Анти-Al 26,051 0,00138	
6	То же	Mg, Sc, Mg 6,1195 0,001111		Cu, Zr, Ag 4,652 99,03		Mg, Sc, Mg 6,1195 0,001111		Mg, Mg 6,1195 0,001111		Анти-Al 26,051 0,00138	
7	Al-18%Si	P, P 20,2405 861,72		Cu, Ag 4,652 99,03		P, P 20,2405 861,72		P, P 20,2405 861,72		Анти-Si 19,865 455,86	
8	То же	P, P пост. ток		S, S 7,61 167,2		P, P пост. ток		P, P пост. ток		Ti, B 32,084 0,001388	
10	A99	плексиглас, плексиглас 36,687 0,001388		Sc, Sc 24,29 557,4		плексиглас, плексиглас 36,687 0,001388		Анти-Al 26,051 0,00138		Прямая магнитостатика	

40

$\gamma = 37,0 \text{ МСм}\cdot\text{м}^{-1}$

$\gamma = 36,9 \text{ МСм}\cdot\text{м}^{-1}$

$\gamma = 37,1 \text{ МСм}\cdot\text{м}^{-1}$

$\gamma = 37,1 \text{ МСм}\cdot\text{м}^{-1}$

исх.

“V-легирование” Sc, Zr

“V-легирование”
Sc, Zr и пр.

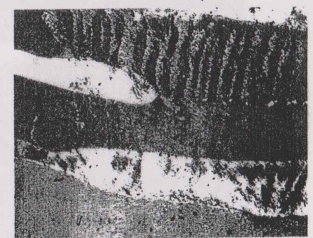
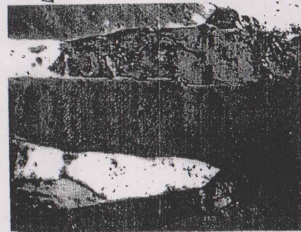
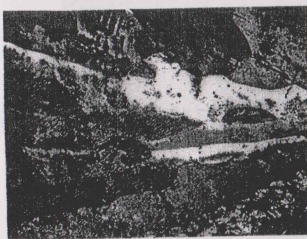
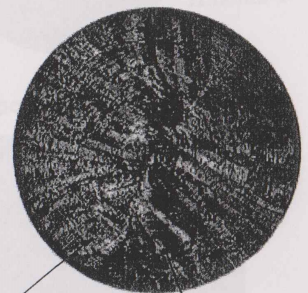
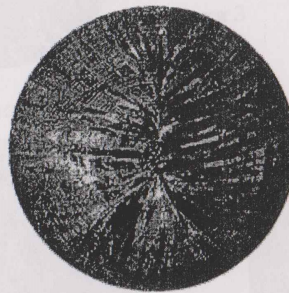
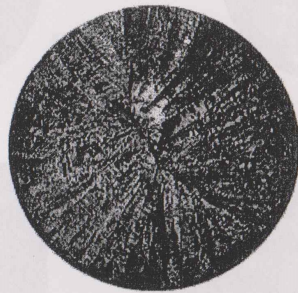
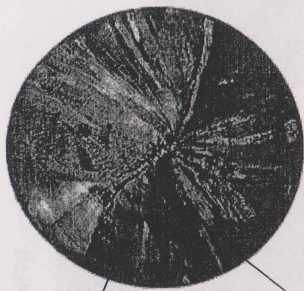
“V-легирование”
метилметакрилатом, Sc

Плавка 01

Плавка 1

Плавка 2

Плавка 10



центр

периферия

центр

периферия

Рис.1 Структура слитков из алюминия А99

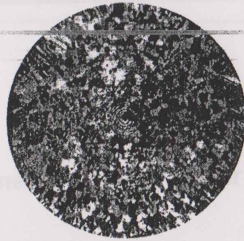
1 мм

$\gamma = 10,72 \text{ МСм}\cdot\text{м}^{-1}$



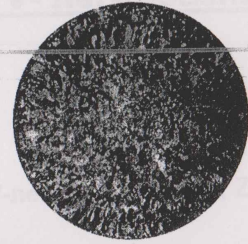
Плавка 02

$\gamma = 13,05 \text{ МСм}\cdot\text{м}^{-1}$



Плавка 3

$\gamma = 12,82 \text{ МСм}\cdot\text{м}^{-1}$



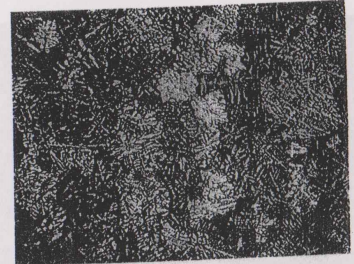
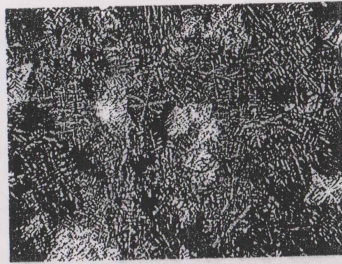
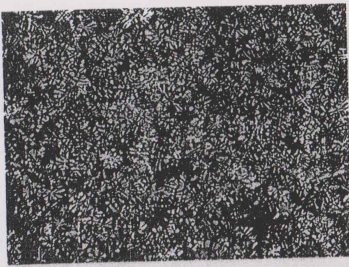
Плавка 4

исх.

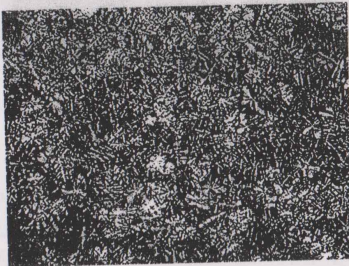
“V-легиование” Sc, Zr

“V-легиование” Sc, Zr и пр.

центр



периферия

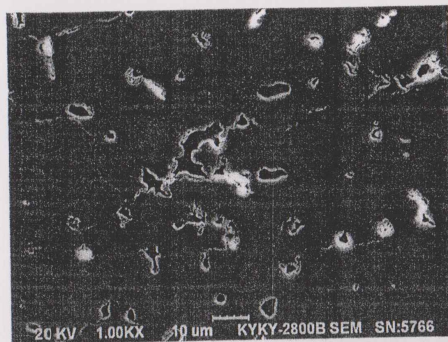


Макро- и микроструктура сплава АМг6 после "V- легирования"

$\gamma = 10,3 \text{ МСм}\cdot\text{м}^{-1}$

исх.

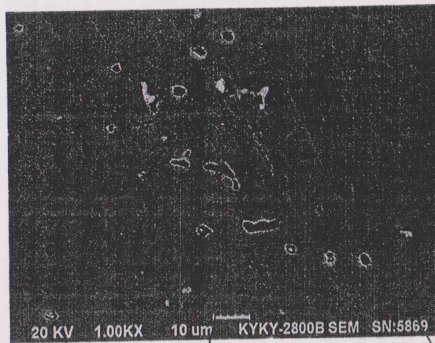
Плавка 02



$\gamma = 13 \text{ МСм}\cdot\text{м}^{-1}$

"V-легирование" Sc, Zr

Плавка 3



$\gamma = 12,8 \text{ МСм}\cdot\text{м}^{-1}$

"V-легирование" Sc, Zr и пр.

Плавка 4

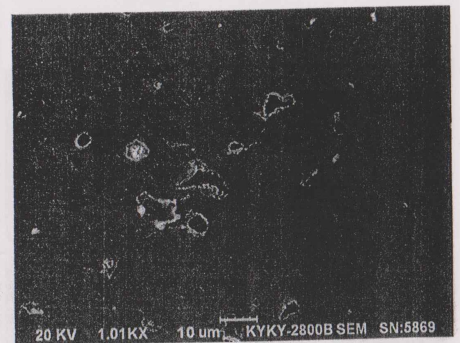
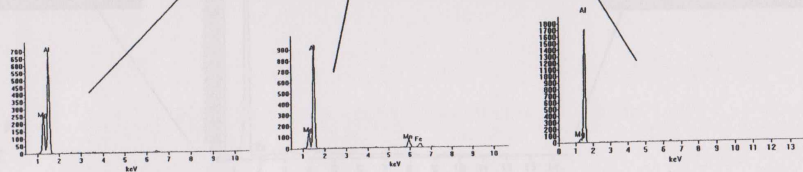
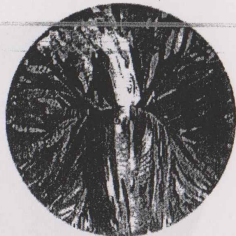


Рис.3 Структура слитков из сплава АМг6 (РЭМ)



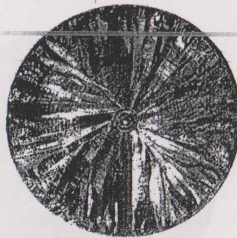
$\gamma = 29,5 \text{ МСм}\cdot\text{м}^{-1}$



исх.

Плавка 03

$\gamma = 29,5 \text{ МСм}\cdot\text{м}^{-1}$



“V-легирувание” Mg

Плавка 5

$\gamma = 29,8 \text{ МСм}\cdot\text{м}^{-1}$



“V-легирувание” Mg и пр.

Плавка 6

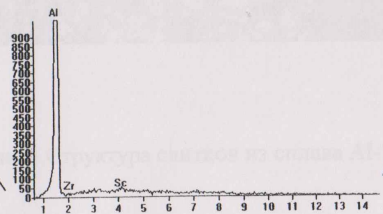
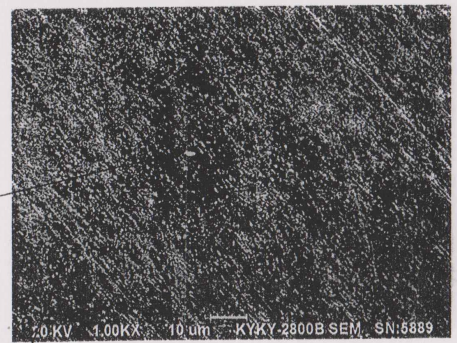
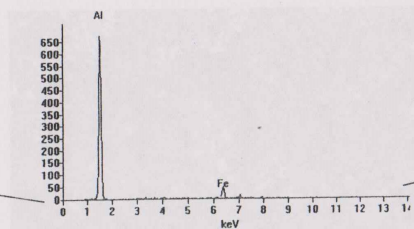
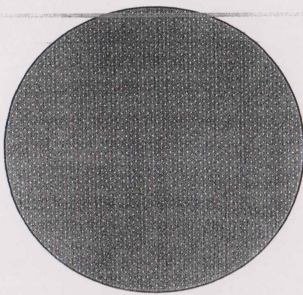


Рис.4 Структура слитков из сплава Al-0,2%Sc-0,1%Zr

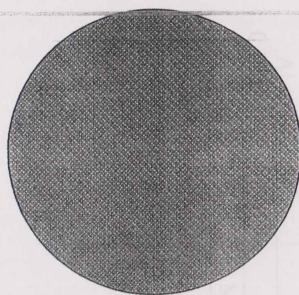
исх.

“V-легирование” Р

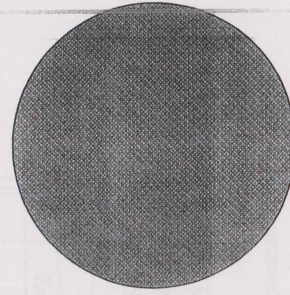
“V-легирование” Р, S и пр.



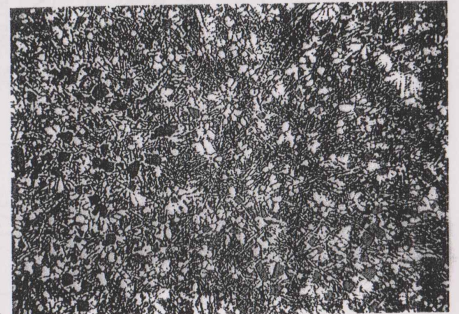
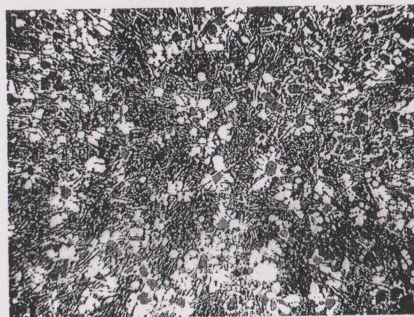
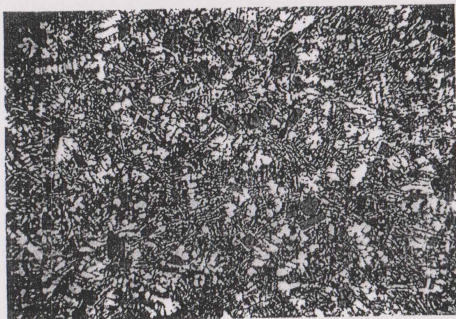
Плавка 04



Плавка 7



Плавка 8



100 мкм

Рис.5 Структура слитков из сплава Al-18%Sc

Таблица 2

Удельная электрическая проводимость γ слитков, отлитых в обычных условиях и после волновой обработки расплава, и отожженных листов

Сплав	№плавки	Модификаторы, применяемые при волновой обработке	γ , МСм/м	
			Слиток	Лист
А99	01	-	37,0	37,55
	1	Sc, Zr, B	36,9	37,55
	2	Zr, Mo, Nb, Mg, Ag	37,1	37,55
	10	Плексиглас, Sc	37,1	37,2
АМг6	02	-	10,72	15,05
	3	Sc, Zr	13,05	15,0
	4	Zr, B, Cd, Cr	12,82	15,1
Al- 0,2%Sc- 0,1%Zr	03	-	29,5	35,65
	5	Mg, Cu, Ag	29,5	35,25
	6	Mg, Sc, Cu, Zr, Ag	29,8	35,45
Al-18%Si	04	-	-	25,0
	7	P, Cu, Ag	-	25,45
	8	P, S, Ti, B	-	25,2

Таблица 3

Механические свойства отожженных листов толщиной 2 мм, полученных после прокатки слитков, отлитых в обычных условиях и после волновой обработки расплава, продольное направление

Сплав	№ плавки	Модификаторы, применяемые при волновой обработке	σ_b , кгс/мм ²			$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²			δ_5 , %		
			1-е	2-е	Ср.	1-е	2-е	Ср.	1-е	2-е	Ср.
А99	01	-	5,2	5,0	5,1	2,3	2,3	2,3	46,0	51,0	48,5
	1	Sc, Zr, B	5,0	5,1	5,1	2,2	2,3	2,3	43,3	50,7	47,0
	2	Zr, Mo, Nb, Mg, Ag	5,2	5,3	5,3	1,7	1,9	1,8	58,3	58,0	58,2
	10	Плексиглас, Sc	5,3	5,3	5,3	2,2	2,2	2,2	53,3	57,7	55,5
АМг6	02	-	36,1	35,7	35,9	17,6	17,6	17,6	30,0	29,3	29,7
	3	Sc, Zr	34,6	34,5	34,6	16,7	16,6	16,7	30,3	32,0	31,2
	4	Zr, B, Cd, Cr	35,5	34,9	35,2	16,8	17,1	17,0	26,3	31,0	28,7
Al-0,2%Sc-0,1%Zr	03	-	19,6	19,7	19,7	16,3	16,4	16,4	15,0	15,0	15,0
	5	Mg, Cu, Ag	20,4	20,3	20,4	16,9	16,9	16,9	15,3	15,0	15,2
	6	Mg, Sc, Cu, Zr, Ag	19,5	19,6	19,6	16,3	16,3	16,3	15,0	15,0	15,0
Al-18%Si	04	-	12,1	11,5	11,8	6,0	5,9	5,9	15,0	9,7	12,4
	7	P, Cu, Ag	11,3	12,3	11,8	5,5	5,8	5,7	10,7	14,0	12,4
	8	P, S, Ti, B	12,1	11,3	11,7	5,7	5,6	5,7	14,0	9,7	11,9

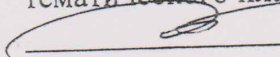
3 Выводы

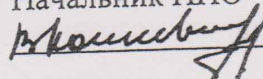
1. При исследовании влияния волнового микрорезонансного воздействия на расплавы алюминия и сплавов AMg_6 , $Al-0,2\%Sc-0,1\%Zr$ и $Al-18\%Si$ путем обработки расплава в нестационарном электромагнитном поле волнового излучателя, создаваемым генератором малой мощности, обнаружено, что в результате указанной обработки произошли изменения в структуре слитка из сплава AMg_6 , выразившиеся в укрупнении зерен слитка, следствием чего явилось повышение электропроводимости литого металла, измельчении и перераспределении частиц избыточных фаз в структуре слитка и некотором повышении пластичности листов. Обнаруженное явление может быть полезным в практике производства слитков и полуфабрикатов из сплава AMg_6 и нуждается в дальнейшем изучении. Каких либо изменений в структуре слитков и свойствах листов из алюминия и сплавов $Al-0,2\%Sc-0,1\%Zr$ и $Al-18\%Si$ под влиянием волновой обработки расплава на использованных в данной работе режимах не обнаружено.

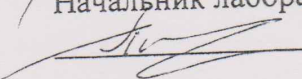
2. Исследования по влиянию волновой обработки расплава в нестационарном электромагнитном поле на свойства слитков и полуфабрикатов из деформируемых алюминиевых сплавов целесообразно продолжить (в том числе на промышленных плавках сплавов AMg_6 , AMg_{61} , 01570 и др.) в направлении уточнения режимов и изучения механизма воздействия поля на расплав.

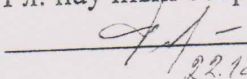
От ЗАО «Уральский проект»
(Исполнитель)

От ОАО «ВИЛС»
(Заказчик)

Научный руководитель раздела
тематического плана НИОКР
 И.С. Полькин

Начальник НИО
 В.Ю. Конкевич

/ Начальник лаборатории
 В.В. Захаров

Гл. научный сотрудник
 Ю.А. Филатов
22.12.2008