

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЛИТЫХ И ДЕФОРМИРОВАННЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ПРИ СОВМЕЩЕННОЙ ОБРАБОТКЕ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-Zr

Сидельников А.С., Федорова О.В.

Научные руководители д.т.н., доцент Беляев С.В., к.т.н., доцент Лопатина Е.С.

*Сибирский федеральный университет*

Одной из главных тенденций повышения эффективности производства длинномерных изделий из цветных металлов и сплавов является создание интегрированных производств на основе применения агрегатов совмещенной обработки цветных металлов и сплавов. Вопрос создания таких технологий для отечественной промышленности является актуальным как с точки зрения снижения энергоемкости, так и с точки зрения ценовой конкуренции.

Вместе с необходимостью создания высокоэффективного оборудования существует потребность в получении продукции для производства электропроводов с заданным уровнем механических и электрофизических свойств. В связи с изменением требований потребителей по механическим свойствам к деформируемым полуфабрикатам, используемым в силовых кабелях и проводах токопроводящих жил, резко возрастает потребление электротехнической катанки из сплавов алюминия. Реализуемая на рынках катанка для производства проводов и кабелей из сплава марки АВЕ имеет в качестве легирующих добавок кремний и магний, которые увеличивают прочностные характеристики, но существенно снижают электрическую проводимость.

Такая ситуация привела к появлению новых направлений в исследовании. Одним из таких направлений, которое развивает коллектив ученых института цветных металлов и материаловедения, является создание новых металлургических технологий для получения пресс-изделий электротехнического назначения из новых алюминиевых сплавов с переходными металлами с использованием высокоэффективного оборудования, которые должны при высокой механической прочности иметь удовлетворительные характеристики по электропроводности.

В работе были проведены исследования процесса получения катанки из сплавов алюминия с цирконием с использованием совмещенных методов обработки металлов и проведена оценка свойств полученных полуфабрикатов.

Результаты исследования механических свойств в зависимости от метода обработки и режимов литья, проведенных в данной работе, представлены в табл. 1.

Анализ данных показал, что уровень прочностных свойств получаемых изделий достаточно высок. В литом состоянии диапазон изменения значений временного сопротивления разрыву составляет 55 - 70 МПа в зависимости от режимов литья. После горячей обработки литой заготовки разными методами и получения катанки диаметром 9 мм значения увеличиваются при ГСП – в среднем до 100 МПа, при СПП – до 110 - 140 МПа, при СЛИПП – до 110 - 130 МПа. Анализ влияния режимов литья показал, что увеличение времени выдержки расплава ведет к снижению прочностных свойств. Увеличение температуры плавки и разлива металла незначительно влияет на прочностные свойства при небольших степенях деформации, однако с ее увеличением временное сопротивление разрыву растет для всех исследуемых сплавов.

Таблица 1 – Результаты исследований механических свойств деформированных полуфабрикатов из сплавов Al – Zr при различных режимах получения и обработки

№ образца по порядку	Сплав	Температура плавки и заливки, °С	Время выдержки до разлива, мин.	Содержание Zr, %	Метод состояния	$\sigma_v$ , МПа	$\delta$ , %
----------------------	-------	----------------------------------	---------------------------------	------------------	-----------------	------------------	--------------

1	01	750±10	5	0,15	ГСП литой	<u>104,9</u> 68,07	<u>18,82</u> 34,29
2	02	750±10	10	0,15	ГСП литой	<u>105,0</u> 64,13	<u>17,28</u> 42,22
3	03	750±10	20	0,15	ГСП литой	<u>101,4</u> 61,26	<u>18,62</u> 21,73
4	04	790±10	5	0,15	ГСП литой	<u>100,6</u> 61,81	<u>19,02</u> 24,13
5	05	790±10	10	0,15	ГСП литой	<u>106,2</u> 69,94	<u>23,82</u> 26,07
6	06	790±10	20	0,15	ГСП литой	<u>102,5</u> 63,19	<u>18,06</u> 31,02
7	020	790±10	10	0,2	ГСП литой	<u>103,1</u> 65,69	<u>21,67</u> 38,86
8	025	790±10	10	0,25	ГСП литой	<u>101,0</u> 58,44	<u>21,85</u> 21,47
9	01	750±10	5	0,15	СПП литой	<u>127,5</u> 68,07	<u>18,45</u> 34,29
10	02	750±10	10	0,15	СПП литой	<u>117,7</u> 64,13	<u>21,54</u> 42,22
11	03	750±10	20	0,15	СПП литой	<u>116,6</u> 61,26	<u>22,02</u> 21,73
12	04	790±10	5	0,15	СПП литой	<u>125,3</u> 61,81	<u>16,66</u> 24,13
13	05	790±10	10	0,15	СПП литой	<u>120,8</u> 69,94	<u>15,16</u> 26,07
14	06	790±10	20	0,15	СПП литой	<u>115,9</u> 63,19	<u>13,89</u> 31,02
15	020	790±10	10	0,2	СПП литой	<u>117,5</u> 65,69	<u>18,48</u> 38,86
16	025	790±10	10	0,25	СПП литой	<u>127,4</u> 58,44	<u>16,64</u> 21,47
17	001	880±10	10	0,15	СПП литой	<u>123,7</u> 62,50	<u>17,32</u> 39,80
18	002	800±10	10	0,15	СПП литой	<u>125,2</u> 61,40	<u>16,88</u> 39,46
19	003	720±10	10	0,15	СПП литой	<u>138,2</u> 60,72	<u>20,34</u> 32,82
20	002	800±10	10	0,15	СЛИПП литой	<u>105,8</u> 63,64	<u>28,85</u> 31,14
21	001	880±10	10	0,15	СЛИПП литой	<u>121,1</u> 56,78	<u>21,14</u> 33,42
22	003	720±10	10	0,15	СЛИПП литой	<u>121,2</u> 63,08	<u>28,65</u> 36,98
23	015	880±10	10(плавленая лигатура)	0,15	СЛИПП литой	<u>117,4</u> 57,61	<u>24,99</u> 22,05
24	016	800±10	10(плавленая лигатура)	0,15	СЛИПП литой	<u>109,6</u> 58,24	<u>25,84</u> 49,25
25	017	750±10	10(плавленая лигатура)	0,15	СЛИПП литой	<u>118,2</u> 61,34	<u>25,17</u> 22,56
26	018	750±10	20 плавленая лигатура)	0,15	СЛИПП литой	<u>113,5</u> 65,82	<u>29,33</u> 45,98

Примечание: ГСП – горячая сортовая прокатка; СПП – совмещенная прокатка-прессование, СЛИПП – совмещенное литье и прокатка-прессование.

Следует отметить, что аналогичные зависимости механических свойств в зависимости от режимов литья получены и для других методов обработки (ГСП и СЛИПП). Сравнительный анализ показал, что уровень механических свойств выше для процессов СПП и СЛИПП.

Таким образом, из выше перечисленного следует, что оптимальное количество Zr в алюминиевом сплаве для получения готовых изделий с повышенными механическими и электрофизическими свойствами, должно составлять 0,15%, а в качестве методов обработки целесообразно использовать совмещенные методы обработки СПП и СЛИПП. Результаты исследования микроструктуры металла опытных образцов, полученных различными методами, приведены на рис. 1.

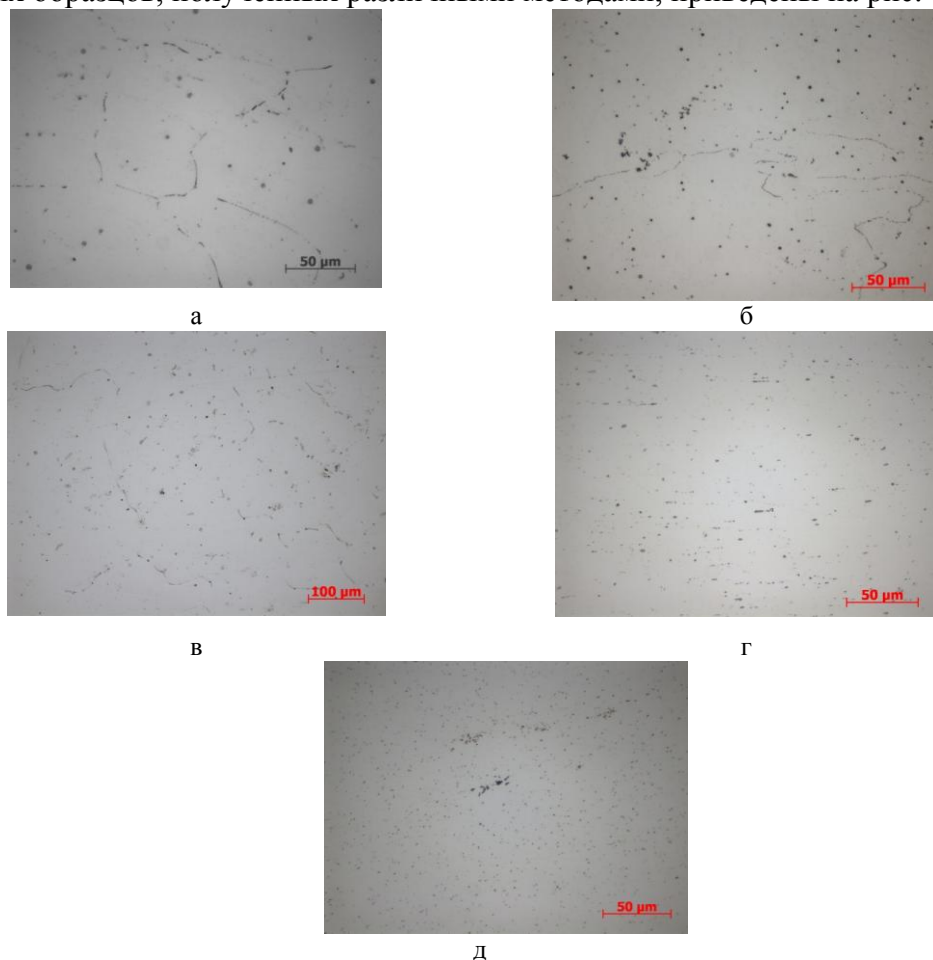


Рисунок 1 – Микроструктура (x500) литой заготовки (а) и катанки (б) опытного образца №21, полученного методом ГСП, заготовки (в) и катанки (г) опытного образца №17, полученного методом СПП и катанки (д), полученной методом СЛИПП

Микроструктура исследуемых слитков представляет собой дендриты  $\alpha$  – твердого раствора, избыточные двойные и тройные фазы (рис. 1, а). Избыточные фазы расположены по границам зерен и дендритных ячеек, имеют пластинчатую, скелетную и сферическую форму. Микроструктурным методом анализа не выявлено различий в структуре сплавов исследуемых слитков. В микроструктуре сплавов системы Al – Zr обнаружены дисперсные (менее 10 мкм) включения игольчатого строения. Вследствие невысокого разрешения оптического микроскопа, выявленные фазы были детально исследованы на растровом электронном микроскопе. Форма и расположение первичных кристаллов  $Al_3Zr$ , обнаруженных в микроструктуре исследуемых слитков, свидетельствует о том, что частицы циркониевой фазы не растворились при получении расплава в исследуемом диапазоне температур. Таким образом, исследуемые температуры плавки и заливки расплава недостаточны для растворения вводимых в виде порошковой лигатуры интерметаллидных частиц  $Al_3Zr$ , что подтверждается данными работы. В слитке образца 17, который был получен при температурах плавки

и заливки, рекомендуемыми в работе в интервале 800 – 900<sup>0</sup>С, по результатам микроскопического анализа частицы Al<sub>3</sub>Zr не обнаружены (рис. 1, в). Результаты микрорентгеноспектрального анализа также подтвердили, что в слитке образца 17 фаз, содержащих цирконий, не наблюдается. Микроструктура состоит из дендритов α – твердого раствора на основе алюминия и избыточных фаз AlFe и AlFeSi с присутствием в них кислорода (табл. 2).

Таблица 2 – Результаты микрорентгеноспектрального анализа для литого образца 17 из сплава Al – Zr

Спектр	O	Al	Si	Fe
Спектр 1	3.70	92.42	1.28	2.60
Спектр 2	5.95	87.41	1.16	5.48
Спектр 3	3.24	95.57	1.18	

Металлографический анализ деформированных полуфабрикатов (образцы 1 – 16) в виде прутков для технологий ГСП и СПП показал, что микроструктура всех образцов состоит из α – твердого раствора и дисперсных частиц фаз AlFe, AlFeSi и Al<sub>3</sub>Zr. При деформации катанки форма и размеры интерметаллидных фаз Al<sub>3</sub>Zr существенно не изменились по сравнению со строением включений в слитках. В долевом сечении катанки наблюдается ориентированность частиц железосодержащих фаз и включений Al<sub>3</sub>Zr в направлении оси деформации. Микроструктура деформированных полуфабрикатов, полученных СПП и ГСП, не имеет различий. Исследования также показали, что катанка, изготовленная из литого образца 17, сохраняет те же структурные составляющие, что и в литом состоянии, при этом фазы Al<sub>3</sub>Zr не обнаружено.

Таким образом, микроструктура полуфабрикатов, полученных по технологии совмещенной прокатки-прессования, зависит от качества слитка и метода его получения. Если исходная структура слитка не содержит интерметаллидных частиц Al<sub>3</sub>Zr, то и в деформированном состоянии их не наблюдается.

Структура всех образцов катанки, полученных по методу СЛИПП, характеризуется неоднородным распределением фаз по сечению алюминиевого твердого раствора. В отличие от образцов, полученных методом СПП, здесь наблюдаются более грубые скопления железосодержащих частиц и алюминидов циркония. Кроме того, здесь обнаружены мелкие частицы Al<sub>3</sub>Zr, чего не наблюдалось в слитках и деформированных заготовках данной плавки, полученных другими методами. Частицы алюминидов вытянуты вдоль направления деформации. Выделение некоторого количества включений Al<sub>3</sub>Zr, по-видимому, связано с занижением температуры при переплавке сплава для СЛИПП.

Измерения микротвердости деформированных полуфабрикатов, полученных различными методами, показали, что наибольшие значения микротвердости наблюдаются у изделий, полученных методом СПП. Уровень значений микротвердости для образцов, полученных методами ГСП и СЛИПП, несколько ниже.

Данная научно-исследовательская работа выполнена в рамках договора Минобрнауки России №13.G25.31.0083 по созданию высокотехнологичного производства по теме «Разработка технологии получения алюминиевых сплавов с переходными металлами и высокоэффективного оборудования для производства электротехнической катанки».