

## ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРА И СТЕПЕНИ ЛЕГИРОВАНИЯ НА СКЛОННОСТЬ К ПРОЯВЛЕНИЮ ЛИКВАЦИИ ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК ДЕФОРМИРУЕМЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

*С.И. Ильин, Ю.Д. Корягин, Н.А. Шабурова, М.В. Судариков, О.В. Воробьев, А.С. Иванова, Е.О. Семенов*

*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия*

Получение качественного полуфабриката из алюминиевых деформируемых сплавов для последующей деформации (прокатка, штамповка или прессование) предусматривает получение исходной бездефектной литой заготовки.

Уровень механических свойств сплавов в литом и термически обработанном состоянии определяется в основном внутренним строением зерен, поэтому одним из основных параметров, влияющих на качество литой заготовки для последующей пластической деформации, является проявление химической неоднородности зерен по содержанию легирующих элементов, или ликвация.

В работе исследуются сплавы АМц, АМг6 и Д16. Указанные сплавы можно условно выбрать в качестве модельных для исследования влияния характера легирования на склонность деформируемых алюминиевых сплавов к проявлению ликвационных эффектов в литом состоянии.

Сравнивая локальное содержание легирующих элементов на осях дендритов с марочным составом сплавов, отметим значительное несоответствие. Это отклонение является мерой неомогенности сплава.

Принимая за величину, характеризующую степень неомогенности литых сплавов АМц, АМг6 и Д16, степень отклонения состава от марочного, рассчитаны значения среднего коэффициента оомогенности данных сплавов.

Определенный для алюминиевой основы сплавов критерий оомогенности показывает зависимость степени оомогенности от изменения характера легирования сплава и содержания легирующих элементов. Выявлены значительные различия между локальными содержаниями легирующих элементов в осях дендритов и марочным составом сплавов.

*Ключевые слова: алюминиевые сплавы, АМц, АМг6, Д16; ликвация, степень оомогенности.*

### Введение

Технология получения качественного полуфабриката для последующей деформации (прокатка, штамповка или прессование) предусматривает получение бездефектной литой заготовки [1–5]. Строение исходного слитка определяется формой, размерами и составом зерен, а также их внутренним строением [6–9].

Зерна алюминиевого твердого раствора представляют собой дендриты, выросшие из одного центра кристаллизации, которые легко выявляются при макроисследовании. Зерна по размерам могут быть крупными или мелкими, а по форме равноосными, столбчатыми и верными [10–12]. Внутреннее строение зерен определяется формой и размерами первично кристаллизовавшихся ветвей дендрита, а также формой, размерами и расположением интерметаллидов. По внешнему виду зерен нельзя судить о внутреннем строении. При

любом размере зерна дендритные ветви могут быть также любого размера, как тонкими, так и толстыми, а соответственно этому интерметаллиды – и мелкими, и крупными. Чем тоньше ветви (чем меньше размер дендритной ячейки) и чем мельче интерметаллиды, залегающие в междендритных пространствах, тем тоньше внутреннее строение [13–15].

Уровень механических свойств сплавов в литом и термически обработанном состоянии определяется в основном внутренним строением зерен и в меньшей степени его размерами и формой: чем тоньше внутреннее строение, тем выше и прочность, и пластичность [16–17]. Таким образом, одним из основных параметров, влияющих на качество литой заготовки для последующей пластической деформации, является проявление химической неоднородности зерен по содержанию легирующих элементов, или ликвация.

В работе исследуются сплавы АМц, АМг6 и Д16 по методике, ранее предложенной в статье [18]. Это широко распространенные деформируемые алюминиевые сплавы, которые отличаются как характером легирования (один, два или три легирующих элемента), так и их содержанием. В сплаве АМц, легированном только марганцем, содержание Mn допускается от 1,0 до 1,5 масс. %. В сплаве АМг6, кроме марганца, содержание которого допускается от 0,5 до 0,8 масс. %, дополнительно введен магний, содержание которого от 5,8 до 6,8 масс. %. В сплаве Д16 основными легирующими элементами является медь (3,8...4,9 масс. %), марганец (0,3...0,9 масс. %) и магний в количестве от 1,2 до 1,8 масс. %.

Введение дополнительных легирующих элементов может приводить к суперрадитивному влиянию на склонность алюминиевых сплавов к проявлению ликвационных эффектов в литых заготовках. Выявлению подобного влияния и посвящено данное исследование.

Указанные сплавы можно условно выбрать в качестве модельных для исследования влияния характера легирования на склонность деформируемых алюминиевых сплавов к проявлению ликвационных эффектов в литом состоянии.

#### Материал и методика исследования

Для оценки степени ликвации были отобраны образцы из литых заготовок промышленных сплавов различного характера легирования, таких как АМц, АМг6 и Д16, которые не подвергались гомогенизационному отжигу, необходимому по технологии для последующей пластической деформации.

Исследуемые образцы сплавов АМц, АМг6 и Д16С соответствуют ГОСТ 4784–97. Составы сплавов, определенные атомно-эмиссионным методом на спектрометре Spectrolab по ASTM E 1251-11, представлены в табл. 1.

Структуру сплавов после травления реактивом Келлера изучали методами оптической и сканирующей электронной микроскопии.

Состав микрообъемов сплавов в этих образцах определяли на растровом микроскопе JEOL JSM–6460LV с приставкой Oxford Instruments Inca Energy для микрорентгено-спектрального анализа.

Оптическая металлография проводилась на микроскопе Axio Observer D1m.

#### Результаты эксперимента и их обсуждение

Микроструктуры сплавов в исходном литом состоянии представлены на рис. 1–3.

Для всех сплавов наблюдается типичная, ярко выраженная дендритная структура, характерная для литых алюминиевых сплавов. При микроструктурном исследовании на оптическом микроскопе дендритные оси выглядят более светлыми, а междендритные объемы, более темными (см. рис. 1а, 2а, 3а). При исследовании на растровом микроскопе (см. рис. 1б, 2б и 3б) цвета элементов изображения инвертируются. Для определения химического состава осей дендритов и междендритных объемов этих образцов с целью оценки степени химической неоднородности структуры проведены систематические исследования на растровом микроскопе.

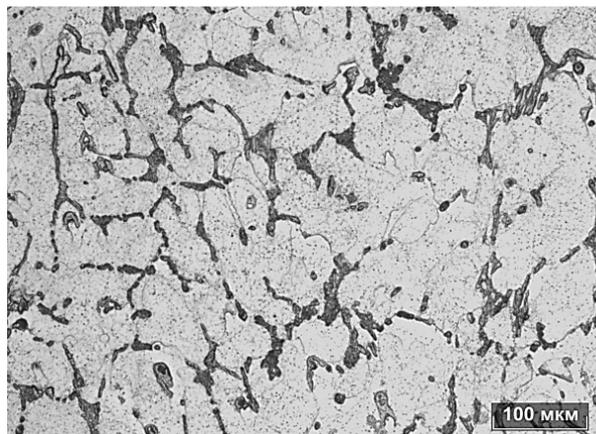
Как показано в статье [18], степень негетогенности алюминиевых сплавов в литом состоянии с достаточной степенью достоверности можно оценивать по результатам измерения отклонения локального состава сплава от равновесного. Измерения содержания легирующих элементов удобнее проводить, как показывает опыт [18], по осям дендритов, которые надежно выявляются при стандартном травлении для анализа микроструктуры. Дендриты, как правило, обеднены основными легирующими элементами, которые обычно локализованы в междендритных объемах.

Таблица 1

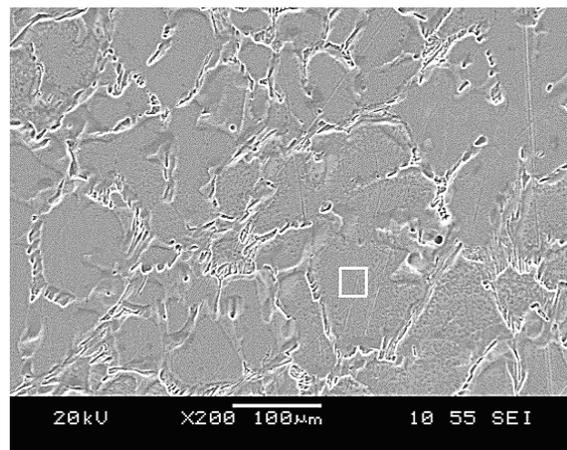
Химический состав исследованных образцов, масс. %

Марка сплава	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Al
АМц	0,2	0,4	0,01	<b>1,2</b>	0,05	0,02	0,09	–	98,03
АМг6	0,09	0,02	0,05	<b>0,7</b>	<b>6,2</b>	0,1	0,07	–	92,77
Д16С	0,1	0,18	<b>4,4</b>	<b>0,6</b>	<b>1,4</b>	0,09	0,07	< 0,01	93,16

Примечание. Жирным шрифтом выделены концентрации основных легирующих элементов.

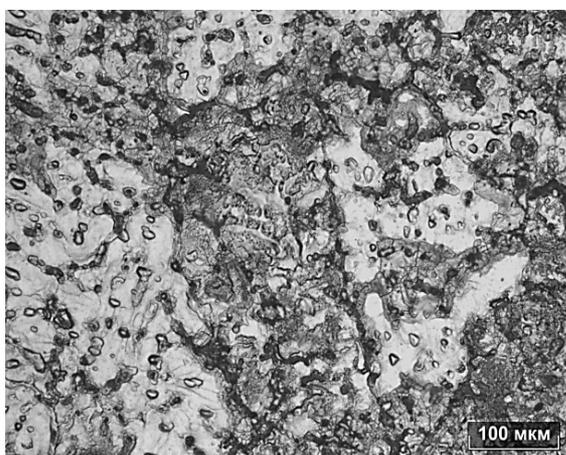


a)

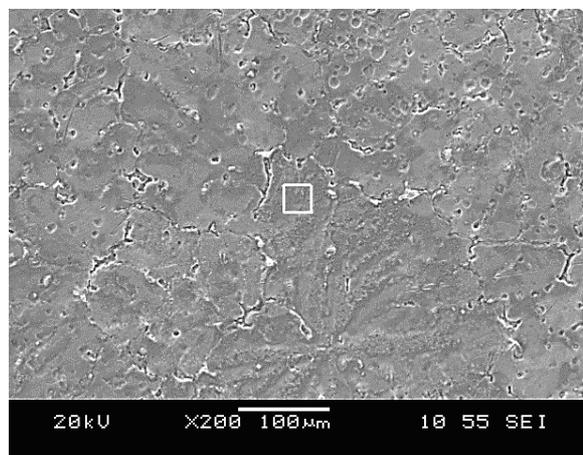


б)

**Рис. 1. Микроструктура литого образца сплава АМц,  $\times 200$ :  
а – оптическая металлография, б – электронная микроскопия**

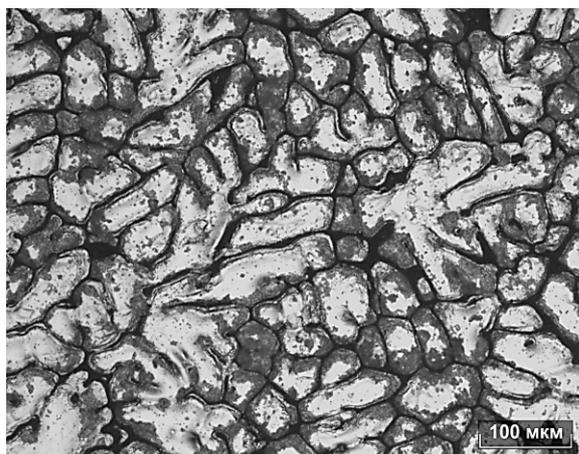


a)

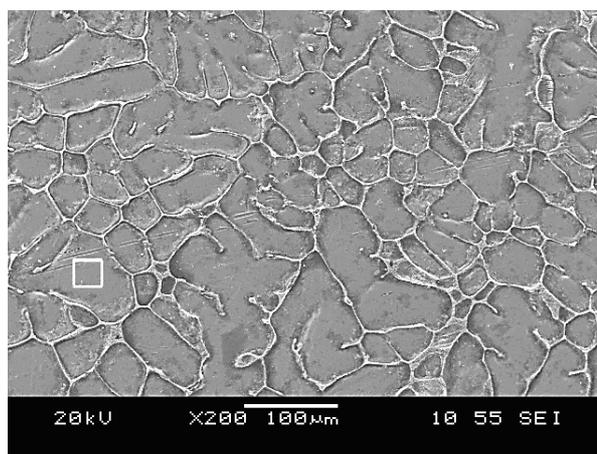


б)

**Рис. 2. Микроструктура литого образца сплава АМг6,  $\times 200$ :  
а – оптическая металлография, б – электронная микроскопия**



a)



б)

**Рис. 3. Микроструктура литого образца сплава Д16  $\times 200$ :  
а – оптическая металлография, б – электронная микроскопия**

На рис. 4, представленном в табл. 2 в качестве примера, белым квадратом показан участок оси дендрита сплава АМц размером 30×30 мкм, в котором был определен химический состав. Аналогичным образом были исследованы 12 участков. Результаты измерений химического состава для образца сплава АМц представлены в табл. 2. На рис. 5–6 и в табл. 3–4 приведены результаты измерений химического состава в осях дендритов для сплавов АМг6 и Д16.

Сравнивая локальное содержание легирующих элементов в осях дендритов (см. табл. 2–4) с составом сплава, определенным атомно-эмиссионным методом (см. табл. 1) можно отметить значительное несоответствие.

Установленные отклонения являются следствием неомогенности сплава.

Как показано в статье [18], критерий гомогенности  $\gamma_i$  может служить мерой степени приближения составов локальных объемов литых сплавов к марочному составу. За величину, характеризующую степень неомогенности для литого сплава, примем величину относительного отклонения состава локального объема от марочного:

$$\Delta_i = (q_{i\text{ср}} - q_{i\text{спл}})/q_{i\text{спл}}, \quad (1)$$

где  $q_{i\text{ср}}$  – среднее по результатам 12 измерений содержание  $i$ -го элемента в осях дендритов, масс. %;  $q_{i\text{спл}}$  – содержание  $i$ -го элемента в сплаве, по результатам атомно-эмиссионного химического анализа (марочный состав), масс. %.

Таблица 2

Химический состав в осях дендритов сплава АМц, масс. %

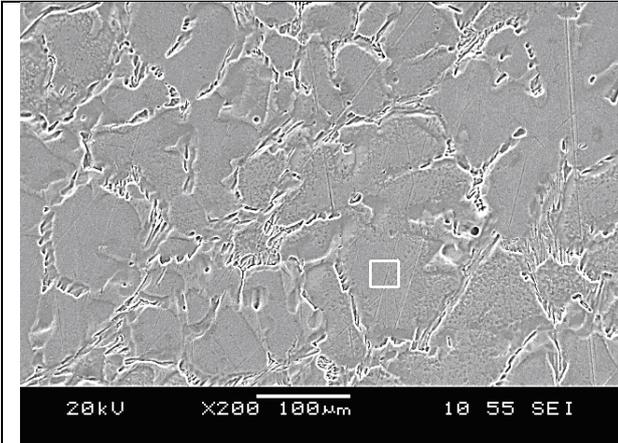
	№	Al	Mn
	1	99,69	0,31
	2	99,39	0,61
	3	99,53	0,47
	4	99,51	0,49
	5	99,70	0,30
	6	99,50	0,50
	7	99,64	0,36
	8	99,45	0,55
	9	99,63	0,37
	10	99,60	0,40
	11	99,63	0,37
12	99,54	0,46	
Среднее	<b>99,57</b>	<b>0,43</b>	

Рис. 4. Участок определения химического состава сплава АМц на осях дендритов, ×200

Таблица 3

Химический состав в осях дендритов сплава АМг6, масс. %

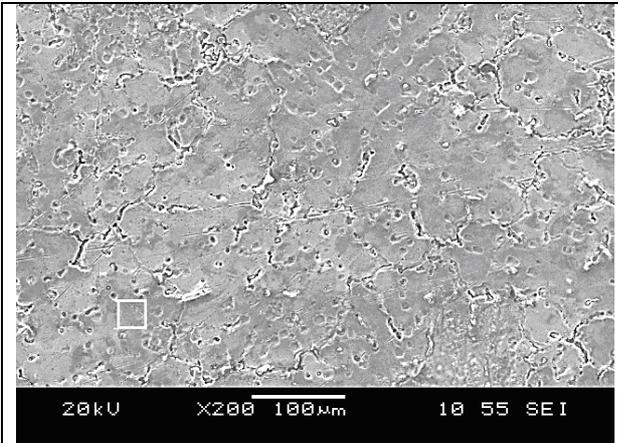
	№	Mg	Al	Mn
	1	4,29	94,88	0,83
	2	4,35	95,03	0,62
	3	4,38	95,12	0,50
	4	3,89	95,37	0,74
	5	5,86	93,63	0,51
	6	6,20	93,13	0,68
	7	4,67	94,84	0,49
	8	4,82	94,68	0,50
	9	4,51	94,89	0,60
	10	4,00	95,65	0,34
	11	4,69	94,58	0,73
12	4,09	95,24	0,67	
Среднее	<b>4,65</b>	<b>94,75</b>	<b>0,60</b>	

Рис. 5. Участок измерения химического состава по осям дендритов сплава АМг6, ×200

Химический состав в осях дендритов сплава Д16, масс. %

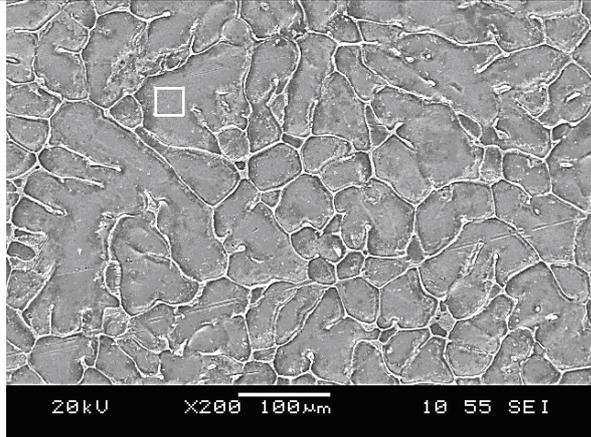
	№	Mg	Al	Mn	Cu
	1	0,68	97,72	0,51	1,09
	2	0,60	97,61	0,47	1,33
	3	0,50	98,14	0,48	0,88
	4	0,61	98,02	0,43	0,94
	5	0,89	96,65	0,45	2,01
	6	0,87	96,29	0,71	2,13
	7	0,49	97,99	0,51	1,01
	8	0,58	98,01	0,35	1,06
	9	0,54	97,91	0,47	1,07
	10	0,58	97,92	0,49	1,01
	11	0,56	97,97	0,54	0,94
12	0,71	97,66	0,55	1,08	
Среднее	<b>0,63</b>	<b>97,66</b>	<b>0,50</b>	<b>1,21</b>	

Рис. 6. Участки измерения химического состава по осям дендритов сплава Д16С, x200

Критерий гомогенности  $i$ -го элемента в сплаве:

$$\gamma_i = 1 - |\Delta_i| \quad (2)$$

Средний критерий гомогенности легирующих элементов сплава можно рассчитать по формуле

$$\gamma_{cp} = \frac{\sum \gamma_i}{n} \quad (3)$$

где  $n$  – число легирующих элементов в сплаве, шт.

Расчитанные по формулам (1)–(3) и данным табл. 1–4 критерии гомогенности сплавов приведены табл. 5.

Полученные ненулевые значения относительного отклонения ( $\Delta_i$ ) локального содержания всех легирующих элементов от марочного свидетельствуют о неоднородности их распределения между осями дендритов и междендритными участками. Знак минус показывает, что все легирующие элементы располагаются преимущественно в межосных участках.

Значение критерия гомогенности ( $\gamma_i$ ) легирующих элементов варьируется в зависимо-

сти от характера легирования сплава. Но в целом можно отметить, что чем больше содержание  $i$ -го легирующего элемента в сплаве, тем выше значения критерия гомогенности. Однако указанная закономерность наблюдается только при комплексном легировании. Так, если для Mg и Mn в системах Al–Mg–Mn (сплав АМг6) и Al–Mg–Cu–Mn (сплав Д16С) наблюдается повышение критерия гомогенности при увеличении содержания указанных элементов в сплаве, то для Mn в системе Al–Mn такая зависимость не выполняется.

Таким образом, полученные критерии гомогенности  $\gamma_i$  для легирующих элементов характеризуют равномерность распределения соответствующего элемента в матрице и могут служить качественным и количественным показателем для контроля процессов гомогенизации при последующем гомогенирующем отжиге.

Для среднего критерия гомогенности  $\gamma_{cp}$  наблюдается прямо пропорциональная зависимость от общего содержания легирующих элементов в сплаве.

Таблица 5

Критерии гомогенности исследуемых сплавов в литом состоянии

Сплав	Относительное отклонение содержания легирующего элемента от марочного состава			Критерии гомогенности для легирующих элементов и основы сплава				Средний коэффициент гомогенности легирующих элементов $\gamma_{cp}$
	$\Delta_{Mn}$	$\Delta_{Mg}$	$\Delta_{Cu}$	$\gamma_{Mn}$	$\gamma_{Mg}$	$\gamma_{Cu}$	$\gamma_{Al}$	
АМц	-0,64	–	–	0,36	–	–	0,98	0,36
АМг6	-0,14	-0,25	–	0,86	0,75	–	0,98	0,81
Д16	-0,17	-0,55	-0,73	0,83	0,45	0,27	0,95	0,52

### Выводы

По результатам проведенного анализа можно сделать следующие выводы.

1. Метод расчета критерия гомогенности, предложенный авторами в работе [18], можно использовать для сплавов различного характера легирования.

2. На основе данного метода рассчитаны критерии гомогенности легирующих элементов и основы для алюминиевых сплавов АМц, АМг6 и Д16.

3. Экспериментально показано, что оси дендритов в исследуемых сплавах обеднены легирующими элементами.

4. Установлено, что значение критерия гомогенности ( $\gamma_i$ ) легирующих элементов варьируется в зависимости от характера легирования сплава.

5. Критерии гомогенности  $\gamma_i$  для легирующих элементов характеризуют равномерность распределения соответствующего элемента в матрице и могут служить качественным и количественным показателем для контроля процессов гомогенизации при последующем гомогенизирующем отжиге.

### Литература

1. Kaufman, J.G. *Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications* / J.G. Kaufman, E.L. Rooy. – 1st printing. – ASM International, 2004. – 340 p.

2. Белоусов, Н.Н. *Плавка и разливка сплавов цветных металлов* / Н.Н. Белоусов; под общ. ред. А.М. Липницкого. – М.: Машиз, 1961. – 80 с.

3. Колачев, Б.А. *Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов* / Б.А. Колачев, В.И. Елагин, В.А. Ливанов. – М.: МИСИС, 1999. – 416 с.

4. *Плавка и литье алюминиевых сплавов: справ. изд.* / М.Б. Альтман, А.Д. Андреев, Г.А. Балахонцев и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.

5. Золоторевский, В.С. *Структура и прочность литых алюминиевых сплавов* / В.С. Золоторевский. – М.: Металлургия, 1981. – 192 с.

6. Беляев, А.П. *Рафинирование и литье*

*первичного алюминия* / А.П. Беляев, М.Б. Гохштейн, С.Е. Мараев. – М.: Металлургия, 1966. – 76 с.

7. Кузьмин, Б.А. *Технология металлов и конструкционные материалы* / Б.А. Кузьмин. – М.: Машиностроение, 1981. – 351 с.

8. Дальский, А.М. *Технология конструкционных материалов* / А.М. Дальский. – М.: Машиностроение, 1985. – 448 с.

9. Лахтин, Ю.М. *Материаловедение* / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.

10. Курдюмов, А.В. *Производство отливок из сплавов цветных металлов: учеб. для вузов. – 2-е изд., доп. и перераб.* / А.В. Курдюмов, М.В. Пикунов. – М.: МИСИС, 1996. – 504 с.

11. Новиков, И.И. *Дендритная ликвация в сплавах* / И.И. Новиков, В.С. Золоторевский. – М.: Наука, 1966. – 155 с.

12. Мондольфо, Л.Ф. *Структура и свойства алюминиевых сплавов* / Л.Ф. Мондольфо. – М.: Металлургия, 1979. – 640 с.

13. *Производство литых заготовок из деформируемых алюминиевых и медных сплавов: учеб. пособие* / Р.К. Мысик, Ю.Н. Логинов, А.В. Сулицин, С.В. Брусницын. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. – 414 с.

14. Голиков, И.Н. *Дендритная ликвация в сталях и сплавах* / И.Н. Голиков, С.Б. Масленков. – М.: Металлургия, 1977. – 224 с.

15. Кузьмин, М.П. *Ликвация и повышение качества проб литейных алюминиевых сплавов* / М.П. Кузьмин, М.Ю. Кузьмина // *Вестник ИРГТУ*. – 2013. – № 12 (83). – С. 210–213.

16. Бродова, И.Г. *Закономерности формирования литой структуры переохлажденных сплавов Al–Ti* / И.Г. Бродова, И.В. Полени, В.О. Есин // *ФММ*. – 1992. – № 1. – С. 84–89.

17. Гуляев, А.П. *Металловедение* / А.П. Гуляев. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.

18. *Аналитические возможности оценки степени гомогенности литых алюминиевых сплавов* / С.И. Ильин, Ю.Д. Корягин, Н.А. Шабурова и др. // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*. – 2018. – Т. 18, № 2. – С. 64–71. DOI: 10.14529/met180208

**Ильин Сергей Иванович**, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; [ilinsi@susu.ru](mailto:ilinsi@susu.ru).

**Корягин Юрий Дмитриевич**, д-р техн. наук, профессор кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; [koriaginyd@susu.ru](mailto:koriaginyd@susu.ru).

**Шабурова Наталия Александровна**, канд. техн. наук, доцент кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; [shaburovana@susu.ru](mailto:shaburovana@susu.ru).

**Судариков Михаил Викторович**, канд. хим. наук, младший научный сотрудник кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; [судариковmv@susu.ru](mailto:sудариковmv@susu.ru).

**Воробьев Олег Валентинович**, магистрант кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; [vorobiovov@mail.ru](mailto:vorobiovov@mail.ru).

**Иванова Анастасия Сергеевна**, магистрант кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; [ivanova20131996@mail.ru](mailto:ivanova20131996@mail.ru).

**Семененко Екатерина Олеговна**, магистрант кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; [semenenko.katya@mail.ru](mailto:semenenko.katya@mail.ru).

*Поступила в редакцию 15 октября 2018 г.*

---

DOI: 10.14529/met180408

## INFLUENCE OF THE CHARACTER AND DEGREE OF ALLOYING ON THE TENDENCY TO SEGREGATION IN CAST BILLETS OF DEFORMABLE ALUMINUM ALLOYS

*S.I. Ilyin, [ilinsi@susu.ru](mailto:ilinsi@susu.ru),*

*Yu.D. Koryagin, [koriaginyd@susu.ru](mailto:koriaginyd@susu.ru),*

*N.A. Shaburova, [shaburovana@susu.ru](mailto:shaburovana@susu.ru),*

*M.V. Sudarikov, [судариковmv@susu.ru](mailto:sудариковmv@susu.ru),*

*O.V. Vorobiov, [vorobiovov@mail.ru](mailto:vorobiovov@mail.ru),*

*A.S. Ivanova, [ivanova20131996@mail.ru](mailto:ivanova20131996@mail.ru),*

*E.O. Semenenko, [semenenko.katya@mail.ru](mailto:semenenko.katya@mail.ru)*

*South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation*

Production of high-quality semi-finished product from aluminum wrought alloys for subsequent deformation (rolling, stamping or pressing) is provided by obtaining the initial defect-free cast billet.

The level of mechanical properties of alloys in the cast and heat-treated state is determined mainly by the internal structure of the grains, therefore one of the main parameters affecting the quality of the cast billet for subsequent plastic deformation is the manifestation of chemical heterogeneity of grains in the content of alloying elements or segregation.

In this work, the alloys Al–Mn, Al–Mg and duralumin are investigated according to the method previously proposed by the same authors. These alloys can be conventionally chosen as model ones, to study the influence of the alloying character on the tendency of wrought aluminum alloys to manifest segregation effects in the cast state.

Comparing the local content of alloying elements on the axes of dendrites with the brand composition of the alloys, a significant discrepancy was noted. This discrepancy is a measure of the inhomogeneity of the alloy.

Taking the degree of deviation of the local composition from the brand as the value characterizing the degree of inhomogeneity of cast alloys Al–Mn, Al–Mg and duralumin, the values of the average homogeneity coefficient of these alloys are calculated.

The homogeneity criterion, determined for the aluminum base of alloys, shows the dependence of the degree of homogeneity on the change in the nature of alloying and the content of alloying

elements. Significant differences between the local content of alloying elements in the axes of the dendrites and the grade composition of the alloys were revealed.

*Keywords:* aluminum alloys, Al–Mn, Al–Mg, duralumin, segregation, degree of homogeneity.

### References

1. Kaufman J.G., Rooy E.L. *Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications*. 1st printing. ASM International, 2004. 340 p.
2. Belousov N.N. *Plavka i razlivka splavov tsvetnykh metallov* [Melting and Casting of Non-Ferrous Metal Alloys]. Under the General Editorship of A.M. Lipnitsky. Moscow, Mashgiz, 1961. 80 p.
3. Kolachev B.A., Elagin V.I., Livanov B.A. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka tsvetnykh metallov i splavov* [Metallovedenie and Heat Treatment of Non-Ferrous Metals and Alloys]. Moscow, MISIS Publ., 1999. 416 p.
4. Altman M.B., Andreev A.D., Balakhontsev G.A. et. al. *Plavka i lit'ye alyuminiyevykh splavov* [Melting and Casting of Aluminum Alloys: Ref. ed.]. Moscow, Metallurgy Publ., 1983. 352 p.
5. Zolotarevsky V.S. *Struktura i prochnost' litykh alyuminiyevykh splavov* [Structure and Strength of Cast Aluminum Alloys]. Moscow, Metallurgy Publ., 1981. 192 p.
6. Belyaev A.P., Gokhstein M.B., Marayev S.E. *Rafinirovaniye i lit'ye pervichnogo alyuminiya* [Refining and Casting of Primary Aluminum]. Moscow, Metallurgy Publ., 1966. 76 p.
7. Kuzmin, B.A. *Tekhnologiya konstruktsionnykh materialov* [Metal Technology and Structural Materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 351 p.
8. Dalsky, A.M. *Tekhnologiya konstruktsionnykh materialov* [Technology of Construction Materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 448 p.
9. Lakhtin Yu.M., Leontyeva V.P. *Materialovedeniye* [Materials Science]. Moscow, Mashinostrenie Publ., 1990. 528 p.
10. Kurdyumov A.V., Pikunov M.V. *Proizvodstvo otlivok iz splavov tsvetnykh metallov* [The Production of Castings from Alloys of Non-Ferrous Metals]. 2nd ed. Moscow, MISIS Publ., 1996. 504 p.
11. Novikov I.I., Zolotarevsky B.C. *Dendritnaya likvatsiya v splavakh* [Dendritic Liquefaction in Alloys]. Moscow, Nauka Publ., 1966. 155 p.
12. Mondolfo L.F. *Struktura i svoystva alyuminiyevykh splavov* [Structure and Properties of Aluminum Alloys]. Moscow, Metallurgy Publ., 1979. 640 p.
13. Mysik R.K., Loginov Yu.N., Sulitsin A.V., Brusnitsyn S.V. *Proizvodstvo litykh zagotovok iz deformiruyemykh alyuminiyevykh i mednykh splavov* [Production of Cast Billets from Wrought Aluminum and Copper Alloys]. Ekaterinburg, Ural Federal University Publ., 2011. 414 p.
14. Maslenkov S.B., Golikov I.N., *Dendritnaya likvatsiya v stalyakh i splavakh* [Dendritic Segregation in Steels and Alloys]. Moscow, Metallurgy Publ., 1977. 224 p.
15. Kuzmin M.P., Kuzmina M.Yu. [The Elimination and Quality Improvement of Samples of Cast Aluminum Alloys]. *Bultin of ISTU*, 2013, no. 12 (83), pp. 210–213. (in Russ.)
16. Brodova I.G., Polents I.V., Esin V.O. [Regularities in the Formation of a Molded Structure of Supercooled Al–Ti]. *Physics of metals and metal science*, 1992, no. 1, pp. 84–89. (in Russ.)
17. Gulyaev A.P. *Metallovedeniye* [Metal Science]. Moscow, Metallurgy Publ., 1986. 544 p.
18. Ilin S.I., Koryagin Yu.D., Shaburova N.A., Sudarikov M.V., Vorobyov O.V. Analytical Possibilities of Estimation of the Degree of Homogeneity of the Cast Aluminum Alloys. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 64–71. (in Russ.) DOI: 10.14529/met180208

Received 15 October 2018

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Влияние характера и степени легирования на склонность к проявлению ликвации литых заготовок деформируемых алюминиевых сплавов / С.И. Ильин, Ю.Д. Корягин, Н.А. Шабурова и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2018. – Т. 18, № 4. – С. 74–81. DOI: 10.14529/met180408

### FOR CITATION

Ilyin S.I., Koryagin Yu.D., Shaburova N.A., Sudarikov M.V., Vorobyov O.V., Ivanova A.S., Semenenko E.O. Influence of the Character and Degree of Alloying on the Tendency to Segregation in Cast Billets of Deformable Aluminum Alloys. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 74–81. (in Russ.) DOI: 10.14529/met180408