

## Влияние режимов кристаллизации при жидкой штамповке на структуру и свойства высокопрочного алюминиевого сплава 1960

Халикова Г.Р.<sup>†</sup>, Трифонов В.Г.<sup>‡</sup>

<sup>†</sup>gulnara.r.khalikova@gmail.com; <sup>‡</sup>vadimt@anrb.ru

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Халтурина 39, 450001 Уфа

## The effect of the solidification conditions on the structure and mechanical properties of high-strength 1960 (in Russia) aluminum alloy

G.R. Khalikova, V.G. Trifonov

Institute for Metals Superplasticity Problems RAS, Khalturin St. 39, 450001 Ufa

В работе исследовано влияние температуры штамповой оснастки и давления, приложенного к расплаву, при жидкой штамповке на структурные изменения и механические свойства деформируемого алюминиевого сплава 1960. Показано, что при температурах штамповой оснастки 200 и 400°C и приложенном давлении 90 и 350 МПа формировалась дендритная структура, содержащая первичные интерметаллидные фазы. При этом жидкоштампованные заготовки с отсутствием каких-либо макроскопических дефектов можно получать только при температуре штамповой оснастки 400°C. При этой температуре с ростом приложенного давления объемная доля частиц интерметаллидных фаз практически не менялась и оставалась на уровне 9%, а средний размер дендритных кристаллов увеличивался с ~500 до 600 мкм. Прочностные свойства сплава с ростом температуры штамповой оснастки, так и с увеличением приложенного давления возрастали. При этом относительное удлинение составило менее 1%.

**Ключевые слова:** жидкая штамповка, алюминиевый сплав, структура, механические свойства.

The effects of the die temperature and pressure applied to the liquid melt on structural changes and mechanical properties of wrought 1960 alloy (in Russia) obtained by squeeze casting were investigated. It was shown that a dendrite structure containing primary intermetallic phase particles is formed in the alloy during squeeze casting at the die temperatures 200 and 400°C and applied pressures of 90 and 350 MPa. The cast billets without any macroscopic defects can be obtained only at the die temperature of 400°C. At this temperature, an increase in the applied pressure results in practically no change in the volume fraction of intermetallic phase particles being approximately equal to 9%, and in the increase of the dendrite crystal size from ~500 to ~600 μm. The strength of the alloy raises with increase of the die temperatures and applied pressure. At the same time, the ductility of the alloy was less than 1%.

**Keywords:** squeeze casting, aluminum alloy, structure, mechanical properties.

### 1. Введение

Алюминиевые сплавы системы Al–Zn–Mg–Cu известны как высокопрочные деформируемые термически упрочняемые сплавы [1,2]. Эти материалы широко используются в автомобильной промышленности, в различных областях спорта, электронной индустрии и др. Однако в процессе кристаллизации в этих сплавах (из-за низкой жидкотекучести и малой усадки), среди прочих литейных дефектов, формируются пористость и усадочная

раковина [3,4]. Жидкая штамповка является промышленным процессом, в котором жидкий металл кристаллизуется под постоянным приложенным давлением достаточным для предотвращения литейных дефектов в деформируемых алюминиевых сплавах и достижения желаемого качества заготовок [5,6]. Соответствующие изменения в макро- и микроструктуре сплава приводят к улучшению комплекса механических свойств высокопрочных алюминиевых сплавов [5–10].

Данная научная работа является продолжением исследований по влиянию параметров кристаллизации при жидкой штамповке на структуру и свойства деформируемых алюминиевых сплавов. В ранней работе [11] на примере сплава Д16 (Al–Cu–Mg) было показано увеличение прочностных характеристик (до уровня горячедеформированного состояния), а также возможность формирования мелкозернистой структуры по ободу заготовки в узком поверхностном слое (до 2,5 мм), где имела место высокотемпературная деформация первых закристаллизованных слоев металла со степенями, соответствующими величине усадки (8%).

Настоящее исследование нацелено на оценку возможности повышения уровня механических свойств высокопрочного алюминиевого сплава 1960 (системы Al–Zn–Mg–Cu) и на определение вероятности формирования мелкозернистой структуры в процессе горячей деформации за счет усадки затвердевающей заготовки при жидкой штамповке.

## 2. Материал и методы исследования

Материал исследования – высокопрочный деформируемый термически упрочняемый алюминиевый сплав 1960, химический состав которого соответствует ГОСТ 4784-97.

Исследования проводили на модельных заготовках цилиндрической формы Ø 92 мм и высотой 60 мм, полученных жидкой штамповкой на гидравлическом прессе ДГ2436 усилием 400 тонн. Заготовки изготавливали при давлениях ( $P$ ) 90 и 350 МПа. Скорость кристаллизации расплава регулировалась температурой штамповой оснастки ( $t_{\text{осн}}$ ), нагретой до температур 200 и 400°C. Последующая термообработка проводилась по стандартному режиму Т1 [1]: закалка (выдержка 2,5 часа при температуре 470°C, быстрое охлаждение в воде) и старение при 145°C в течение 16 часов.

Металлографический анализ осуществляли на оптических микроскопах «Olympus GX-51» и «Axiovert - 100А».

Химический состав образующихся фаз исследовали с помощью системы энергодисперсионного анализа на сканирующем электронном микроскопе «JEOL JSM – 840», оснащенной приставкой фирмы «INCA Crystal». Съемку проводили со слегка протравленной поверхности, предварительно оценив цветовую гамму формирующихся фаз. С каждой фазы одной окраски снимали не менее 10 точек. Результаты съёмки обрабатывались в программе «INCA Revision 4.09» по полученным энергодисперсионным распределениям.

Механические испытания на растяжение цилиндрических образцов, вырезанных из жидкоштампованных заготовок по направлению приложения давления, проводили при комнатной температуре согласно ГОСТ 1497 – 84 на универсальном динамометре «Instron – 1185».

## 3. Результаты и их обсуждение

Как показано в раннем исследовании [11] температура штамповой оснастки и приложенное давление явля-

ются важными параметрами процесса кристаллизации расплава, которые влияют как на образование литейных дефектов (усадочных раковин и зональной ликвации), так и на формирование структуры алюминиевого сплава Д16. На макроструктурном уровне аналогичное влияние температуры штамповой оснастки и приложенного давления наблюдается и в случае кристаллизации алюминиевого сплава 1960. Давление, приложенное к расплаву, устраняет дефекты усадочного происхождения, формируя плотную заготовку, но в центральной части, при температуре штамповой оснастки 200°C, наблюдается зональная ликвация (рис. 1,а). Согласно работе [12], такой тип дефекта при жидкой штамповке имеет место в результате заполнения усадочной раковины более обогащенным легирующими элементами жидким расплавом под действием приложенного давления. Однако, в последнее время, существует и другое объяснение, данное Gallerneault с соавторами [13], в котором говорится, что зональная ликвация образуется, предположительно, из-за увеличения скорости теплообмена между стенкой штамповой оснастки и заготовкой под действием приложенного давления. Увеличение температуры штамповой оснастки до 400°C, т.е. уменьшение скорости охлаждения расплава и, соответственно, снижение скорости теплообмена между стенкой штамповой оснастки и заготовкой, устраняет зональную ликвацию, формируя бездефектную заготовку (рис. 1,б).

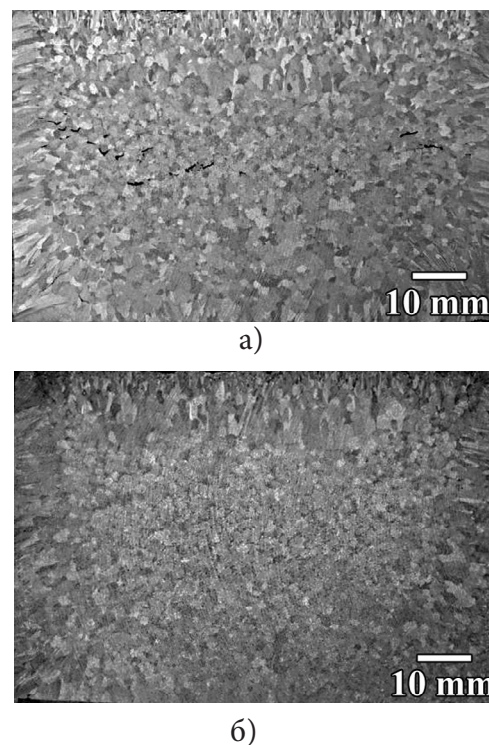
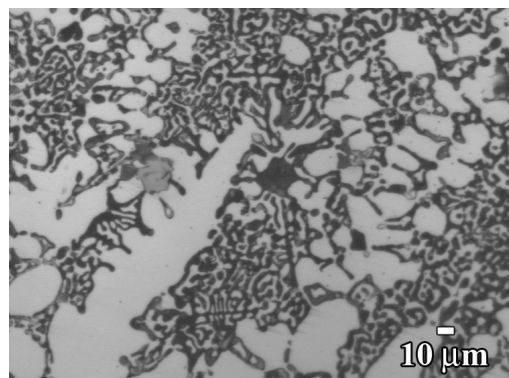
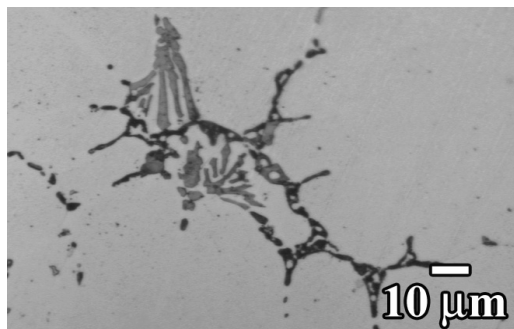


Рис. 1. Макроструктура заготовок сплава 1960: а) –  $t_{\text{осн}} = 200^\circ\text{C}$ ,  $P = 350$  МПа; б) –  $t_{\text{осн}} = 400^\circ\text{C}$ ,  $P = 350$  МПа.

На рисунке 2 представлены микроструктуры с области зональной ликвации, соответствующей рис. 1,а, и центрального участка бездефектной заготовки, соответствующей рис. 1,б. В первом случае имеет место эвтектическая составляющая ( $\alpha\text{-Al} + \text{Mg}(\text{Zn,Cu,Al})_2$ ), во втором – структура представлена  $\alpha\text{-Al}$  с равномерно рас-



а)



б)

Рис. 2. Микроструктура сплава 1960: а) –  $t_{\text{осн}} = 200^\circ\text{C}$ ,  $P = 350$  МПа; б) –  $t_{\text{осн}} = 400^\circ\text{C}$ ,  $P = 350$  МПа.

пределенными первичными частицами интерметаллидных фаз.

В системе Al–Zn–Mg–Cu могут существовать твердые растворы, образованные фазами  $\text{CuMg}_4\text{Al}_6$  и  $\text{Mg}_3\text{Zn}_3\text{Al}_2$  ( $T(\text{AlCuMgZn})$ ),  $\text{MgZn}_2$  и  $\text{CuMgAl}$  ( $\eta(\text{M},\sigma)(\text{AlCuMgZn})$ ) [1,14]. Согласно [14], с  $\alpha$ -Al твердым раствором могут сосуществовать фаза  $\theta$  ( $\text{CuAl}_2$ ), в которой практически не растворяется магний и растворяется не более 2% вес. Zn, и S ( $\text{CuMgAl}_2$ ) фаза, растворимость Zn в которой не превышает 1% вес. В сплавах с 5...8% вес. Zn и 2...3% вес. Mg выделяются в основном фазы  $\text{CuMgAl}$  и (или)  $\text{CuMg}_4\text{Al}_6$ . В литой структуре также могут кристаллизоваться одна или несколько разновидностей фазы  $(\text{Fe,Cu})_3\text{SiAl}_{12}$ ,  $\text{Mg}_2\text{Si}$  и псевдобинарная эвтектика, состоящая из алюминия и  $\text{MgZn}_2$  [2]. Последняя фаза содержит также Al и Cu, ко-

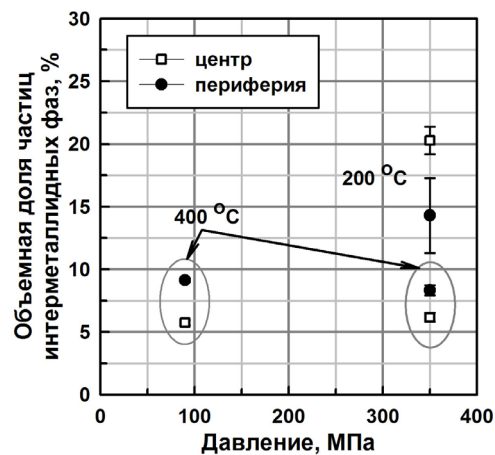


Рис. 3. Влияние величины давления при жидкой штамповке и температуры штамповой оснастки на изменение объемной доли частиц интерметаллидных фаз.

торые замещают Zn, поэтому состав фазы может быть выражен как  $\text{Mg}(\text{Zn,Cu,Al})_2$ .

В нашем случае по результатам исследований были определены следующие фазы:  $\alpha$ -Al твердый раствор,  $\text{CuAl}_2$ ,  $S_{\text{Al-Cu-Mg}}$  ( $\text{Cu}_2\text{MgAl}_6$ ),  $(\text{Mn,Fe,Cu})_3\text{SiAl}_{12}$ ,  $T(\text{Al,Cu,Mg,Zn})$  и  $\text{Mg}(\text{Zn,Cu,Al})_2$ . Морфологические характеристики и химический состав вышеуказанных интерметаллидных фаз описаны в таблице 1.

Наличие крупных областей зональной ликвации в сплаве 1960 оказывает влияние на объемную долю частиц интерметаллидных фаз. Так их содержание с уменьшением скорости охлаждения расплава снижается примерно в 2 раза (рис. 3), в то время как повышение давления не приводит к существенному изменению их количества. Отсутствие значимых изменений объемной доли частиц интерметаллидных фаз от прикладываемого давления может быть обусловлено доминирующим влиянием на этот параметр модификатора Zr, входящего в состав сплава 1960.

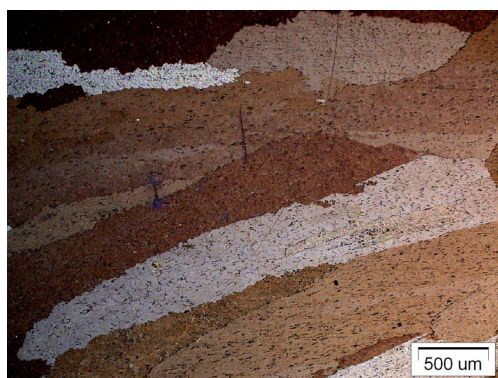
Типичная микроструктура сплава представлена на рисунке 4. При всех исследованных режимах жидкой штамповки в сплаве 1960 имеет место дендритная структура, состоящая из двух зон кристаллизации: зона столбчатых и зона равноосных кристаллов.

Таблица 1

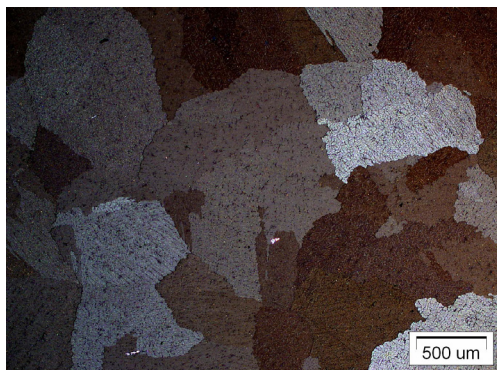
Элементный состав и морфологические характеристики фаз в структуре сплава 1960.

№	Содержание компонентов, % вес.							Окраска фазы (состав травителя: 50 мл $\text{H}_2\text{O}$ , 45 мл $\text{HNO}_3$ , 5 мл HF)	Формула фазы
	Mg	Al	Si	Mn	Fe	Cu	Zn		
1	2,11	48,74	–	–	–	48,21	–	Коричневая	$\text{CuAl}_2$ ( $\theta$ -фаза)
2	7,38	52,97	–	–	–	39,65	–	Светло-коричневая с четкими границами	$\text{Cu}_2\text{MgAl}_6$ ( $S_{\text{Al-Cu-Mg}}$ -фаза)
3	–	60,71	5,59	4,93	20,88	7,89	–	Серые частицы с четкими границами	$(\text{Mn,Fe,Cu})_3\text{SiAl}_{12}$
4	5,25	47,93	–	–	–	29,77	17,1	Коричневая с четкими границами	$T(\text{Al,Cu,Mg,Zn})$ -фаза
5	1,47	54,69	–	–	–	37,21	6,63	Светло-коричневая с разъевшими границами	$\text{Mg}(\text{Zn,Cu,Al})_2$





а)



б)

**Рис. 4.** Типичная дендритная структура сплава 1960 в жидкоштампованных заготовках, полученных при  $t_{\text{осн}} = 200^\circ\text{C}$ : а) – зона столбчатых кристаллов, б) – зона равноосных кристаллов (оптическая металлография, поляризованный свет).

В работе [11] было показано, что в сплаве Д16 в процессе жидкой штамповки имеют место области мелкозернистой структуры. Формирование такой структуры возможно за счет высокотемпературной деформации первых закристаллизованных слоев сплава при усадке затвердевающей заготовки. В сплаве 1960 мелкозернистая структура не наблюдается. По всей видимости, наличие дисперсных частиц алюминида циркония подавляет процессы рекристаллизации при горячей деформации во время усадки.

Рост температуры штамповой оснастки приводит к увеличению среднего размера равноосных дендритных кристаллов с  $558 \pm 44$  мкм до  $608 \pm 115$  мкм в центре заготовки, и с  $479 \pm 55$  мкм до  $560 \pm 108$  мкм на периферии. Такое изменение связано с уменьшением степени переохлаждения жидкого расплава, что соответствует работам [15,16].

С ростом давления, приложенного к расплаву, с 90 до 350 МПа средний размер дендритных кристаллов в центре заготовок увеличивается с  $501 \pm 48$  мкм до  $592 \pm$

109 мкм, на периферии заготовок практически не меняется:  $562 \pm 54$  мкм при давлении 90 МПа и  $560 \pm 108$  мкм при 350 МПа.

Исследования механических свойств образцов сплава 1960 при комнатной температуре показывают, что с увеличением температуры штамповой оснастки и с ростом давления при кристаллизации расплава прочностные характеристики сплава увеличиваются при относительном удлинении менее 1% (табл. 2). Их значения ниже, чем значения, наблюдаемые в горячедеформированном состоянии.

#### 4. Заключение

Жидкоштампованные заготовки без каких-либо макроскопических дефектов, таких как усадочная раковина и зональная ликвация, могут быть изготовлены при температуре штамповой оснастки  $400^\circ\text{C}$  и при всех исследованных величинах давлений, приложенных к расплаву. Уменьшение объемной доли частиц интерметаллидных фаз с ~20 до 9% наблюдается только при увеличении температуры штамповой оснастки с 200 до  $400^\circ\text{C}$ . Прочностные свойства сплава как с ростом температуры штамповой оснастки, так и с увеличением приложенного давления возрастают, не достигая значений, наблюдаемых в горячедеформированном состоянии. При этом относительное удлинение сплава составляет менее 1%.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России».*

#### Литература

1. Promishlennye aluminievye splavi. Sprav. izd. Alieva S.G., Al'tman M.B., Ambarzumyan S.M. et al. 2-nd edition, Moscow, Metallurgiya (1984) 528 p. (in Russian) [Промышленные алюминиевые сплавы. Справ. изд. Алиева С.Г., Альтман М.Б., Амбарцумян С.М. 2-е изд., перераб. и доп., М: Металлургия (1984) 528 с.].
2. Aluminum. Properties and physical metallurgy. Ed. by J.E. Hatch. Metals Park, Ohio, American Society for Metals, 1984, 363 p. [Алюминий: свойства и физическое металловедение. Справ. изд. Перев. с англ. Под ред. Хэтча Дж.Е.. М., Металлургия (1989) 422 с.].
3. S-W. Kim, G. Durrant, J-H. Lee, B Cantor. Journal of Materials Synthesis and Processing **6**(2), 75 (1998).
4. S-W. Kim, G. Durrant, J-H. Lee, B Cantor. J. Mater. Sci. **34**, 1873 (1999).
5. G.A. Chadwick, T.M. Yue. Metals and Materials **5**(1), 6 (1989).
6. S.W. Kim, D.Y. Kim, W.G. Kim, K.D. Woo. J. Mater. Sci. **A304-306**, 721 (2001).
7. T.M. Yue, H.U. Ha, N.J. Musson. J. Mater. Sci. **30**, 2277 (1995).
8. T.M. Yue. J. Mater. Sci. **25**, 175 (1990).
9. M.R. Chomashchi, A. Vikhrov. J. Mater. Process. Tech. **101**, 1 (2000).
10. G. Williams. Foundry Trade Journal **2**, 66 (1984).

**Таблица 2**

Механические свойства жидкоштампованных образцов сплава 1960 при комнатной температуре.

Режимы жидкой штамповки	$\sigma_B$ , МПа
$t = 200^\circ\text{C}, P = 90$ МПа	570
$t = 400^\circ\text{C}, P = 90$ МПа	571
$t = 400^\circ\text{C}, P = 350$ МПа	608
Штамповка (справочные данные) [1]	650

11. V.G. Trifonov, G.R. Khalikova. Materialovedenie 7, 37 (2009) (in Russian) [В.Г. Трифонов, Г.Р. Халикова. Материаловедение 7, 37 (2009)].
12. M. Fudjii, N. Fudjii, S. Morimoto, S. Okada. Journal of Japan Institute of Light Metals **36**, 353 (1986).
13. M. Gallerneault, G. Durrant, B. Cantor. Metall. Mater. Trans. A**27**, 4121 (1996).
14. L.F. Mondolfo in: Aluminum alloys: structure and properties. Butterworths, London (1976) 312 p.
15. T.N. Lipchin. Structura i svoštva cvetnikh splavov, zatverdevshikh pod davleniem. Moscow: Metallurgiya (1994) 128 p. (in Russian) [Т.Н. Липчин. Структура и свойства цветных сплавов, затвердевших под давлением. М: Металлургия (1994) 128 с.].
16. A.I. Batishev. Crystallization of metals and alloys under pressure. Moscow, Metallurgy (1990) 144 p. (in Russian) [А.И. Батышев. Кристаллизация металлов и сплавов под давлением. М: Металлургия (1990) 144 с.].