

# Структура и механические свойства жидкоштампованного алюминиевого сплава Д16

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, Уфа 450001

## Structure and mechanical properties of squeeze casting aluminum alloy D16

G.R. Khalikova, V.G. Trifonov

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

Исследованы закономерности структурных изменений, а также механических свойств, происходящих в сплаве Д16, в зависимости от величины внешнего давления, приложенного к кристаллизующемуся расплаву, и температуры штамповой оснастки. Показано, что в зависимости от режимов жидкой штамповки в сплаве формируется либо дендритная, либо смешанная структура. Продемонстрирована возможность повышения уровня прочности сплава до значений, наблюдаемых в горячедеформированном состоянии.

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

Influence of size of the ambient pressure enclosed to melt and die temperature on structural changes and mechanical properties are investigated. It is shown, that depending on modes of squeeze casting in an alloy is formed or the dendrite structure or the mixed structure. The opportunity of increase of a level of strength of an alloy up to the values observable in hot-deformed a condition is shown.

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

### 1. Введение

Использование литых заготовок в промышленности в большинстве случаев наиболее экономично. Однако одним из главных недостатков как для традиционных процессов литья, так и для более современных – например, литья под высоким давлением, является формирование усадочных раковин и(или) пористости [1–6]. Кроме того, совокупность таких дефектов как горячие трещины, А и V образные ликвации [7], как правило, приводят к зарождению трещин в процессе эксплуатации литых деталей и, как следствие, к их поломке и выходу из строя. В связи с чем, были разработаны новые, более эффективные методы и подходы в процессах кристаллизации расплавов с целью повысить эксплуатационные и технологические свойства сплавов. Одним из таких методов является жидкая штамповка, которая представляет собой процесс формообразования заготовок, комбинирующий в одной операции литье и горячую

объемную штамповку, где расплав кристаллизуется под прикладываемым гидростатическим давлением [8–10].

В настоящее время влияние жидкой штамповки наиболее широко исследовано на литейных алюминиевых сплавах [3,4–8]. Последнее связано с тем, что они имеют высокую жидкотекучесть и небольшую усадку при кристаллизации. В то же время представляет интерес использование жидкой штамповки применительно к деформируемым алюминиевым сплавам, имеющим более высокие, по сравнению с литейными сплавами, механические свойства.

### 2. Материал и методы исследования

Материал исследования – промышленный деформируемый термически упрочняемый алюминиевый сплав Д16 (Al – 4,8%Cu – 1,22%Mg – 0,76%Mn – 0,3%Si – 0,29%Fe – 0,13%Zn – 0,06%Ti)<sup>1</sup>.

1 Все концентрации указаны в % вес.

Жидкую штамповку осуществляли на гидравлическом прессе ДГ 2436 усилием 4000 кН. Модельные заготовки цилиндрической формы диаметром 86 мм и высотой 60 мм изготавливали при давлениях 10, 105, 210, 420 и 705 МПа.

Скорость кристаллизации расплава регулировали температурой штамповой оснастки, нагретой до температур 200, 300 и 400 °С. Время, затрачиваемое после заливки жидкого металла в штамп до приложения заданного усилия на расплав пуансоном, составляло 12 с. Приложенное усилие поддерживали в течение 2,5 мин. За это время полностью завершался процесс кристаллизации. Последующая термическая обработка Т1 заключалась в закалке (выдержка 2,5 часа при температуре 505 °С, охлаждение в воде) и старении при 195 °С в течение 12 часов.

Металлографический анализ осуществляли на оптических микроскопах «Neophot-32», «Axiovert-100А». Относительная ошибка определения параметров микроструктуры не превышала 12 % при доверительной вероятности 75 %.

Изменение кристаллографической разориентировки зерен определяли с использованием растрового электронного микроскопа (РЭМ) «JEOL JSM-840», оснащенного приставкой фирмы «INCA Crystal».

Природу и состав частиц первичных интерметаллидных фаз определяли, используя цветную металлографию и энергодисперсионный анализ с применением РЭМ «JEOL JSM-840», оснащенного приставкой фирмы «INCA Crystal» и программой «INCA Energy 350».

Тонкую структуру сплава наблюдали в просвечивающем электронном микроскопе «JEOL-2000 EX».

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».

Фрактографические исследования поверхности разрушения образцов проводили на РЭМ «JEOL JSM-840».

### 3. Результаты и их обсуждение

**Макроструктура.** Согласно теории формирования отливки [1] кристаллизация сопровождается двумя одновременно протекающими процессами: формированием структуры в литейной форме (путем зарождения и роста кристаллов в охлаждающемся расплаве) и появлением различного рода дефектов – химической неоднородности, раковин и пористости газового или газоусадочного происхождения. Совокупность этих структурных параметров и определяет свойства сплава в отливке.

Известно, что исследуемый сплав относится к деформируемым и обладает низкой жидкотекучестью [12], поэтому после кристаллизации при минимальном усилии (10 МПа) в заготовке имеет место усадочная раковина.

Дополнительное увеличение давления, прикладываемого к расплаву (свыше 10 МПа) приводит к тому, что жидкая фаза полностью заполняет образующиеся пустоты, формируя плотную заготовку. Однако приложенное давление не устраняет полностью литейные дефекты, и в

центральной части продольных темплетов наблюдается зональная ликвация.

Плотные отливки с отсутствием зональной ликвации кристаллизуются с низкими скоростями охлаждения, соответствующими температуре штамповой оснастки 400 °С.

Макроструктура полученных жидкоштампованных заготовок характеризуется наличием двух зон кристаллизации: по краю – зона столбчатых дендритных кристаллов, в центральной части – зона равноосных дендритных кристаллов.

Протяженность зоны столбчатых кристаллов зависит как от температуры штамповой оснастки, так и от прилагаемого давления (рис. 1).

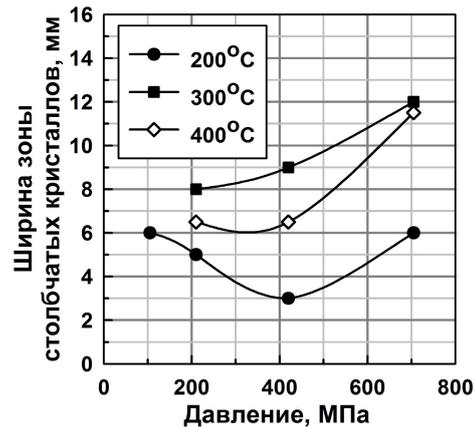


Рис. 1. Влияние величины давления при жидкой штамповке и температуры штамповой оснастки на изменение ширины зоны столбчатых кристаллов

С повышением температуры штамповой оснастки происходит увеличение ширины этой зоны, а затем ее уменьшение. Это связано с тем, что скорость роста кристаллов в направлении теплоотвода с увеличением температуры штамповой оснастки сначала возрастает в связи с ускорением процессов диффузии, затем снижается из-за уменьшения движущей силы процесса кристаллизации – снижения свободной энергии системы [1,2].

В зависимости от режимов жидкой штамповки с последующей термической обработкой Т1 в сплаве формируется либо дендритная, либо смешанная микроструктура.

**Дендритная микроструктура.** Типичная дендритная структура представлена на рисунке 2.

Увеличение давления, приложенного к расплаву, с 105 до 210 МПа резко уменьшает размер равноосных дендритных кристаллов (рис. 3). Это связано с ускоренными процессами охлаждения, во-первых, в результате устранения газовой зазора между стенкой штамповой оснастки и заготовкой в процессе усадки и, во-вторых, с воздействием дополнительного переохлаждения под действием приложенного давления к кристаллизующемуся расплаву.

При достижении давления 210 МПа дополнительное увеличение скорости охлаждения расплава оказывается невозможным из-за высокой скорости кристаллизации, поэтому средний размер равноосных кристаллов практически не меняется.

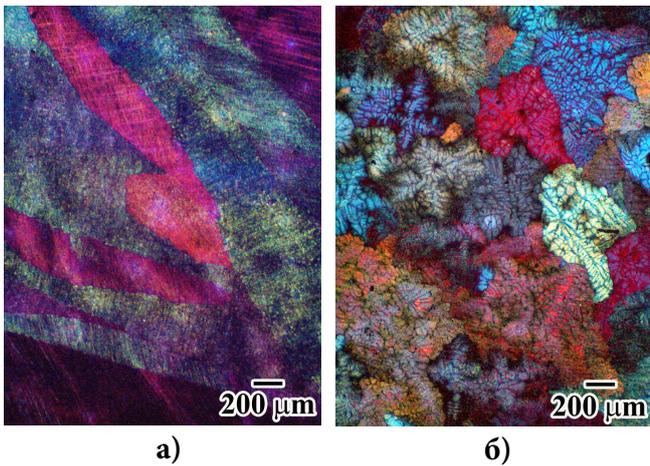


Рис. 2. Типичная дендритная структура сплава в жидкоштампованных заготовках, полученных при  $t_{\text{осн}} = 200\text{ °C}$ : а) – зона столбчатых кристаллов, б) – зона равноосных кристаллов (оптическая металлография, поляризованный свет)

С повышением температуры штамповой оснастки средний размер дендритных кристаллов увеличивается, достигая максимума при  $300\text{ °C}$ , а затем при  $400\text{ °C}$  незначительно снижается.

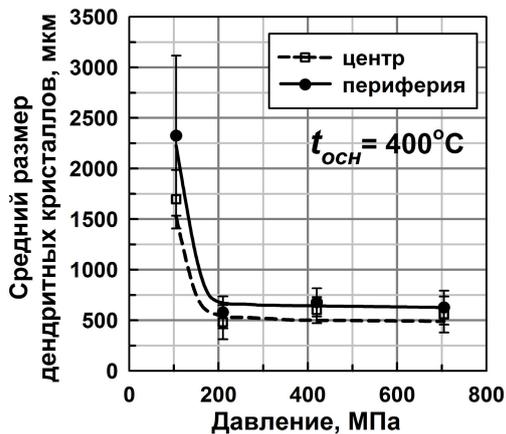


Рис. 3. Влияние величины давления при жидкой штамповке и температуры штамповой оснастки на изменение среднего размера равноосных дендритных кристаллов.

Исследование тонкой структуры показало наличие ячеек и субзерен. Внутри дислокационных ячеек наблюдаются одиночные дислокации. Такое структурное состояние с повышенной плотностью дислокаций, формирующееся при жидкой штамповке авторы работ [11, 13–15] объясняли деформацией, имеющей место при усадке материала.

**Смешанная микроструктура.** Жидкая штамповка при давлениях 105...705 МПа и температурах штамповой оснастки 300 и 400 °C в сочетании с последующей термической обработкой приводят к формированию на периферии заготовок структуры, несвойственной для литого состояния, обычно получаемой при жидкой штамповке (рис. 4). Такая структура включает в себя слой мелких зерен (шириной 150...2300 мкм), который располагается на поверхности заготовок, и слой крупных вытянутых зерен с развитой субструктурой внутри, который находится между мелкозернистой структурой и зоной столбчатых дендритных кристаллов.

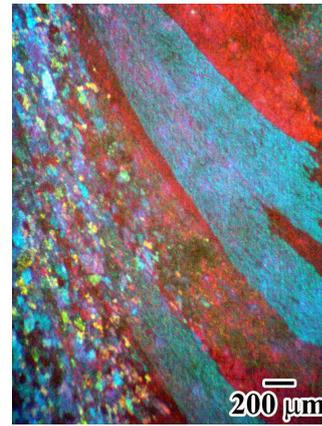


Рис. 4. Смешанная микроструктура сплава на периферии жидкоштампованных заготовок (оптическая металлография, поляризованный свет).

Наименьший средний размер мелких зерен  $\sim 13\text{ мкм}$  и наибольшая их объемная доля  $\sim 5\%$  наблюдаются при следующих режимах жидкой штамповки: давление 420 МПа и температура штамповой оснастки  $400\text{ °C}$ .

Согласно EBSD анализу в участках с мелкозернистой структурой преобладают зерна с высокоугловыми границами, в которых присутствует большое количество дислокаций, связанных с протеканием деформации, имеющей место при усадке материала во время кристаллизации. Внутри крупных вытянутых зерен преобладают малоугловые границы.

Поскольку кристаллизация начинается с периферии заготовок, то и наибольшая степень деформации закристаллизовавшегося материала наблюдается на периферии. Чем больше ширина затвердевшего слоя, тем степень деформации меньше. В центре заготовок деформация практически отсутствует. При больших давлениях, достаточных не только для получения формы при кристаллизации, но и для деформирования в твердом состоянии, в заготовке формируется структура в соответствии со степенью деформации. В кромке имеет место мелкозернистая рекристаллизованная структура, в центре остается дендритная, между ними – крупные вытянутые зерна.

**Фазовый состав.** Согласно оценке объемной доли (рис. 5) и удельной поверхности частиц интерме-

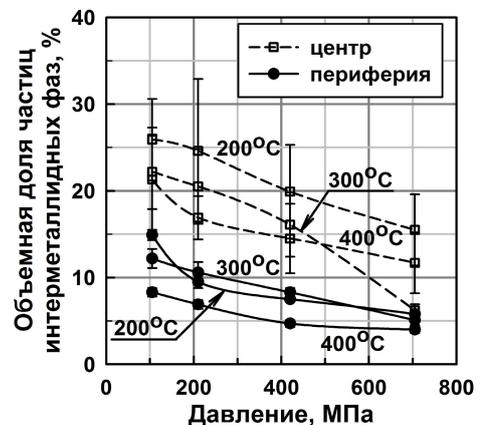


Рис. 5. Влияние величины давления при жидкой штамповке и температуры штамповой оснастки на изменение объемной доли частиц интерметаллидных фаз.

таллидных фаз ( $\text{CuAl}_2$ ,  $\text{CuMgAl}_2$ ,  $\text{Cu}_2(\text{Mn,Fe})_4\text{Al}_7$  и  $(\text{Mn,Fe,Cu})_3\text{SiAl}_{12}$ ), их количество в сплаве уменьшается с увеличением давления и с ростом температуры штамповой оснастки. Это может быть связано с тем, что с ростом давления при кристаллизации возрастает легированность твердого раствора, что, в свою очередь, приводит к снижению объема частиц интерметаллидных фаз.

**Механические свойства.** Механические свойства сплава после жидкой штамповки и последующей термообработки Т1, измеренные при комнатной температуре, демонстрируют тенденцию к росту прочностных характеристик и относительного удлинения с увеличением температуры штамповой оснастки (рис. 6), приблизив их уровень к значениям, наблюдаемым в горячедеформированном состоянии. Повышение прочности сплава обусловлено, по всей видимости, увеличением легированности твердого раствора, а уменьшение объемной доли частиц интерметаллидных фаз приводит к росту относительного удлинения.

С ростом давления, приложенного к расплаву, значения прочностных характеристик сплава сначала возраст-

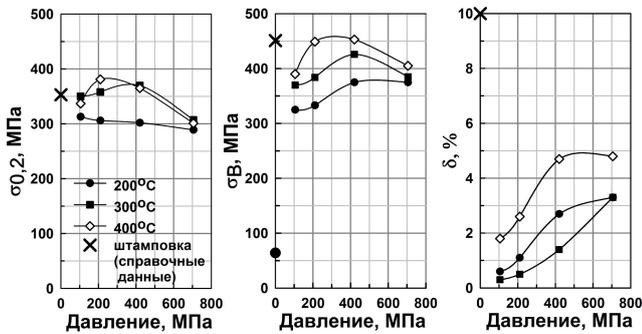
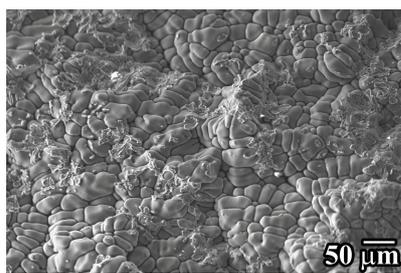
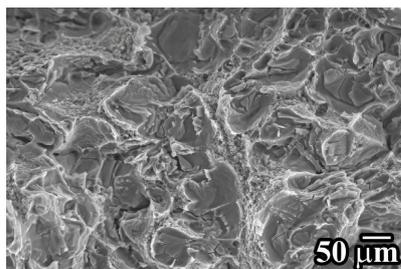


Рис. 6. Влияние величины давления и температуры штамповой оснастки на изменения механических свойств сплава в жидкоштампованных заготовках при комнатной температуре (справочные данные – [16])



а)



б)

Рис. 7. Поверхность разрушения жидкоштампованных образцов, полученных при давлении 10 МПа и температуре 200 °С (а) и при давлении 420 МПа и температуре 400 °С (б).

тают вследствие уменьшения значений среднего размера равноосных дендритных кристаллов, а затем снижаются из-за уменьшения в сплаве объемной доли частиц интерметаллидных фаз.

Изучение поверхности разрушения образцов свидетельствуют о более вязком изломе заготовок, закристаллизованных при давлениях 105 МПа и выше, в сравнении с заготовками, закристаллизованными при минимально изученном давлении – 10 МПа (рис. 7), что согласуется с работой [17].

#### 4. Заключение

Таким образом, на основании проведенных исследований определены режимы жидкой штамповки (давление 420 МПа и температура штамповой оснастки 400 °С) в сочетании с последующей термической обработкой на максимальную прочность, которые обеспечивают в сплаве следующий уровень механических свойств:  $\sigma_B = 455$  МПа,  $\sigma_{0.2} = 365$  МПа и  $\delta = 5$  %. Также при этих режимах в сплаве формируется смешанная структура, состоящая из мелких рекристаллизованных зерен со средним размером ~ 13 мкм и крупных зерен с развитой субструктурой внутри.

#### Литература

1. G. F. Balandin. Bases of the theory of formation of casting. In 2 parts. II. Formation of a macroscopical structure of casting: tutorial for machine-building institute of higher education on a speciality «Machines and technologies of foundry manufacture», Moscow, Mechanical engineering (1979) 335 (in Russian) [Г. Ф. Баландин. Основы теории формирования отливки. В 2 – х частях. Ч. II. Формирование макроскопического строения отливки: учеб. пособие для машиностроительных вузов по специальности «Машины и технологии литейного производства», М., Машиностроение (1979) 335].
2. А.М. Skrebzov. Convection and crystallization of metal melt in ingot and molding, Moscow, Mechanical engineering (1993) 144 (in Russian) [А.М. Скребцов. Конвекция и кристаллизация металлического расплава в слитках и отливках, М., Металлургия (1993) 144].
3. M.T. Murray, G.A. Chadwick, M.R. Ghomashchi. Materials Australasia, 20 (June, 1990)
4. M.R. Ghomashchi. Scandinavian Journal of Metals. 22(2), 61 (1993)
5. G. Durrant, M. Gallerneault, B. Cantor. Materials Science Forum. 242, 77 (1997)
6. C.P. Hong, H.F. Shen, S.M. Lee. Metall. Mater. Trans. B 31, 297 (2000)
7. M.C. Flemings. Solidification Processing, McGraw – Hill Book. New York, NY. (1974)
8. M.R. Chomashchi, A. Vikhrov. J. Mater. Process. Technol. 101, 1 (2000).
9. G.A. Chadwick, T.M. Yue. Metals and Materials. 5 (1), 6 (1989)
10. G. Williams. Foundry Trade Journal. 66 (February 2, 1984)

11. T.N. Lipchin. Structure and properties of nonferrous alloys solidified under pressure, Moscow, Metallurgy (1994) 128 (in Russian) [Т.Н. Липчин. Структура и свойства цветных сплавов, затвердевших под давлением, М., Metallurgy (1994) 128]
12. I.V. Morozov. Pressure die casting (Collection of foundry worker) 2 edition, revised and adding, Leningrad, Mechanical engineering, Leningradskoe department (1980) 75 (in Russian) [И. В. Морозов. Литье под давлением (Б-чка литейщика) 3-е изд., перераб. и доп., Л., Машиностроение, Ленингр. отд-ние (1980) 75]
13. F.P. Bullen, F. Henderson, M.M. Hutchison, H.L. Wain. Philosophical Magazine. **9**, 285 (1991)
14. S.V. Radcliffe, H. Warlimont. Physica Status Solidi. **7**(1), K67 (1964)
15. R.I. Garrod, H.L. Wain. Journal of Less – Common Metals. **9**, 81 (1965)
16. Z.N. Archakova, G.A. Balahonzev, I.G. Basova et al. Structure and properties of aluminum alloys half-finished product: reference book. 2 edition, revised and adding, Moscow, Metallurgy (1984) 408 (in Russian) [З.Н. Арчакова, Г.А. Балахонцев, И.Г. Басова и др. Структура и свойства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов: справ. изд. 2-е изд., перераб. и доп., М., Metallurgy (1984) 408]
17. A.I. Batishev. Crystallization of metals and alloys under pressure, Moscow, Metallurgy (1990) 144 (in Russian) [А.И. Батышев. Кристаллизация металлов и сплавов под давлением, М., Metallurgy (1990) 144]