
КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ И СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ СПЛАВОВ

УДК 669.715:673.3:532.74

А. Г. Пригунова, д-р техн. наук, зав. отделом, e-mail: adel_nayka@ukr.net

В. П. Головаченко, научн. сотр., e-mail: onmlptima@ukr.net

В. А. Титов*, зав. кафедрой, e-mail: vat.kpi@gmail.com

А. В. Ноговицын, д-р техн. наук, зам. директора,
e-mail: alexey.nogovitsyn@gmail.com

М. В. Кошелев, научн. сотр., e-mail: silica-lum@ukr.net

Т. Г. Цир, научн. сотр., e-mail: jknd-t@ukr.net

А. В. Титов*, докторант, e-mail: avt.kpi@gmail.com

Л. К. Шеневидько, научн. сотр., e-mail: onmlptima@ukr.net

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

*Национальный технический университет Украины «КПИ им. И. Сикорского», Киев

ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ТИКСОТРОПНЫХ СВОЙСТВ ЛИТЫХ ВЫСОКОПРОЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В95 И Д16

Исследовано влияние теплосилового воздействия в жидком состоянии на формирование недендритной структуры в литых заготовках высокопрочных алюминиевых сплавов В95, Д16 и их тиксотропные свойства при последующей изотермической деформации прессованием.

Ключевые слова: высокопрочные деформируемые сплавы, роторная обработка расплава, тонкостенная форма, закалка, морфология кристаллов, твердый раствор алюминия, тиксотропные свойства.

Досліджено вплив теплосилової дії у рідкому стані на формування недендритної структури в литих заготовках високоміцних алюмінієвих сплавів В95, Д16 і їх тиксотропні властивості при подальшій ізотермічній деформації пресуванням.

Ключові слова: високоміцні сплави, що деформуються, роторна обробка розплаву, тонкостінна форма, гартування, морфологія кристалів, твердий розчин алюмінію, тиксотропні властивості.

The effect of heat-power action in the liquid state on the formation of a non-dendritic structure in cast billets of high-strength aluminum alloys В95, D16 and their thixotropic properties during subsequent isothermal deformation by pressing is investigated.

Keywords: *high-strength deformable alloys, melt rotor treatment, thin-walled mould, quenching, crystal morphology, solid aluminum solution, thixotropic properties.*

Все возрастающие эксплуатационные требования к авиационной, аэрокосмической, военной технике стимулируют поиск новых высокоэффективных способов получения литых изделий из высокопрочных литейных и деформируемых алюминиевых сплавов. На протяжении последнего десятилетия интенсивно ведутся исследования процесса тиксоформинга высокопрочных алюминиевых сплавов систем Al–Cu–Mg, Al–Zn–Mg–Cu и их физико-механических свойств, в том числе специальных (деформации ползучести, коррозии под напряжением и др.), изделий из них [1, 2].

Основное требование к структуре заготовок, используемых в тиксоформинге, – это образование глобулярной морфологии α -фазы, которая, согласно М. Флемингу [3], придает тиксотропные свойства металлической суспензии. Глобулярная структура не образует связанного кристаллического каркаса, ответственного за горячеломкость отливок, что позволяет использовать высокопрочные деформируемые алюминиевые сплавы как литейные.

Для реализации процессов тиксолития, тиксоформинга, штамповки и экструзии во ФТИМС НАН Украины разработан оригинальный способ получения заготовок диаметром от 10 до 50 мм и высотой до 150 мм с использованием тонкостенных многослойных форм из металлической фольги [4, 5] толщиной от 50 до 500 мкм, что позволяет производить закалку расплава в различных средах вместе с формой. В зависимости от температуры перегрева расплава и других внешних факторов скорость охлаждения литых заготовок в такой форме может варьироваться в широких пределах. В зависимости от температурно-временных параметров охлаждения возможно получение заготовок с заданной морфологией α -фазы: глобулярной, розеточной, розеточно-глобулярной, дендритной. В отличие от дорогостоящего полунепрерывного литья предлагаемый способ получения литых заготовок обладает высокой мобильностью и не требует больших затрат для реализации в условиях единичного и серийного производства.

Целью настоящей работы является исследование возможности получения дендритной структуры в литых деформируемых высокопрочных алюминиевых сплавах В95 и Д16, определение влияния морфологии кристаллов твердого раствора алюминия в заготовках на особенности структурообразования и тиксотропные свойства при последующей изотермической деформации прессованием.

Литые образцы изготовляли способом теплосилового воздействия, который заключается в роторной обработке расплава [6], заливке его в тонкостенную форму из алюминиевой фольги с последующей ее закалкой в воде. Микроструктурные исследования осуществляли методом металлографического анализа, измерение плотности – гидростатическим взвешиванием.

В экспериментах использованы формы в виде цилиндра диаметром 20 и 30 мм, высотой 150 мм из 3-х слоев алюминиевой фольги толщиной 300 мкм. Роторную обработку проводили в ковше, в интервале температур от $675 \pm 5^\circ\text{C}$ до заданной температуры заливки, с записью кривой изменения температуры за время обработки. Скорость охлаждения расплава в процессе роторной обработки в указанном диапазоне температур составляла от 2,14 до 2,8 $^\circ\text{C}/\text{с}$, время обработки – 30–45 с. В зависимости от температуры, при которой завершали роторную обработку и заливали расплав в форму ($T_{\text{зал}}$), а также от вида охлаждающей среды (воздух, вода), скорость охлаждения расплава в тонкостенной форме составляла от 0,3 до 7 $^\circ\text{C}/\text{с}$.

Температурные режимы роторной обработки расплава и изотермического прессования литых заготовок задавали по данным дифференциально-термического анализа (ДТА), который проводили на приборе Derivatograph Q–1500–D (MOM Венгрия). Кривые ДТА снимали при линейной скорости нагревания и охлаждения 5 $^\circ\text{C}/\text{мин}$ в диапазоне температур 25–750 $^\circ\text{C}$ на воздухе, при навеске пробы 140 мг.

Кристаллизация и структурообразование сплавов

В качестве эталона использован прокаленный оксид алюминия ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$). Образец и эталон размещали в закрытых тиглях из жаропрочной стали. Усредненные значения параметров плавления и кристаллизации определяли графически, доверительные интервалы значений температуры составляли $\pm 0,5$ °С. При построении зависимостей «доля жидкой фазы – температура», так называемых кривых ДЖТ, площади пиков определяли численным интегрированием временной зависимости $\Delta T = f(\tau)$ при линейной экстраполяции базисной линии пика. Пределы интегрирования уточняли дифференцированием сигнала ДТА по изменению знака производной на зависимости $d(\Delta T)/d\tau = f(\tau)$. Результаты ДТА представлены на рис. 1, 2, в табл. 1.

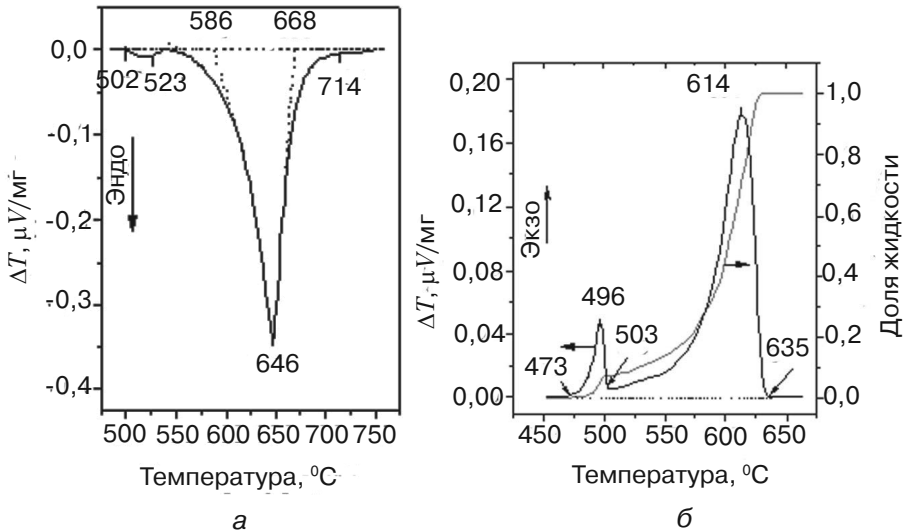


Рис. 1. Приведенные кривые ДТА плавления (а), кристаллизации (б) и ДЖТ (б) сплава Д16

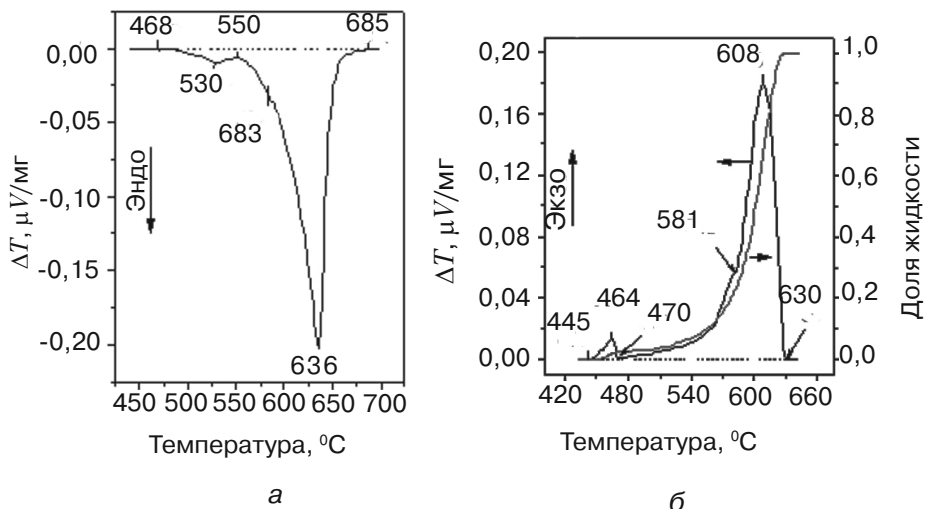


Рис. 2. Приведенные кривые ДТА плавления (а), кристаллизации (б) и ДЖТ (б) сплава В95

Микроструктура исходного образца из высокопрочного сплава В95 диаметром 30 мм, полученного литьем в форму из фольги с охлаждением на воздухе ($V_{\text{охл}} = 0,3$ °С/с), приведена на рис. 3, а. Его центральная часть имеет ярко выраженную розеточную морфологию α -твердого раствора алюминия с размером кристаллов 200–250 мкм и фактором формы 1,23. Объемная доля розеточных кристаллов α -фазы состав-

Таблица 1

Температурные параметры кристаллизации сплавов В95 и Д16

Сплав	Температура ликвидус $T_L, ^\circ\text{C}$	Температура солидус $T_S, ^\circ\text{C}$	Интервал кристаллизации $\Delta T_{LS}, ^\circ\text{C}$
В95	630	470	160
Д16	635	503	132

ляет 95 %. Наблюдаются локальные эвтектические колонии глобулярной формы величиной 10–20 мкм, количество которых около 2 %. Твердость исходного образца составила 1000 МПа, $\sigma_B = 0,38 \text{ HB} = 380 \text{ МПа}$ [7].

Роторная обработка расплава, обеспечивающая генерирование множественных центров кристаллизации, и последующая закалка погружением тонкостенных форм с расплавом в воду ($V_{\text{охл}} = 4 \text{ }^\circ\text{C/с}$) кардинально изменяют процесс кристаллизации сплава В95 (рис. 3, б). Размеры розеток α -твердого раствора уменьшаются в 5–10 раз, при практически неизменной его объемной доле – 95 %. В структуре наблюдаются единичные дендриты α -фазы (~2 %) и отдельные области эвтектики (~3 %). Уровень механических свойств составляет: $\text{HB} = 950 \text{ МПа}$, $\sigma_B = 360 \text{ МПа}$.

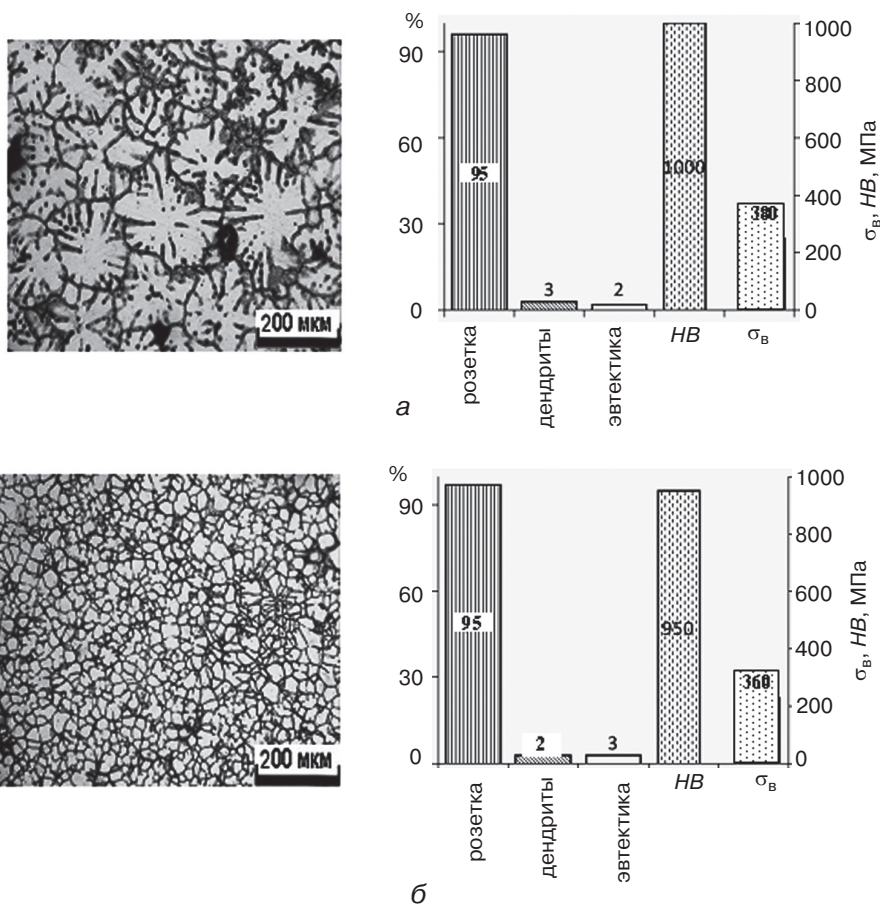
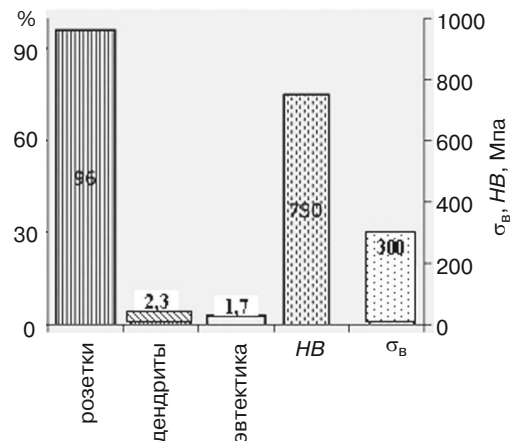
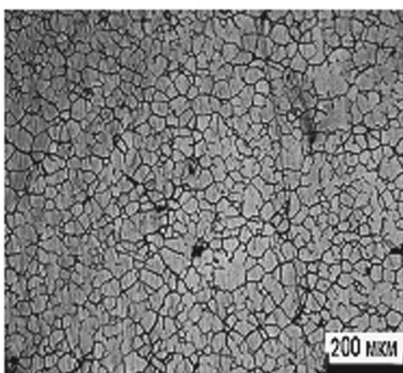
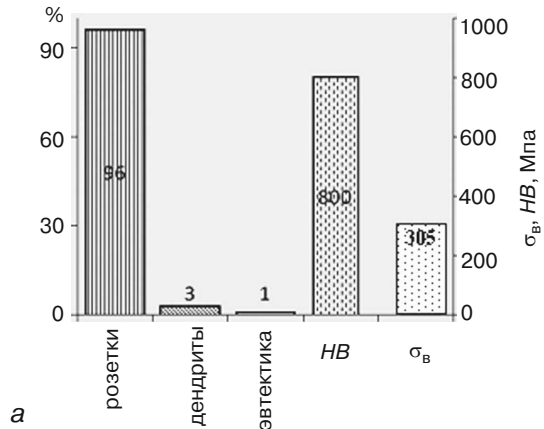
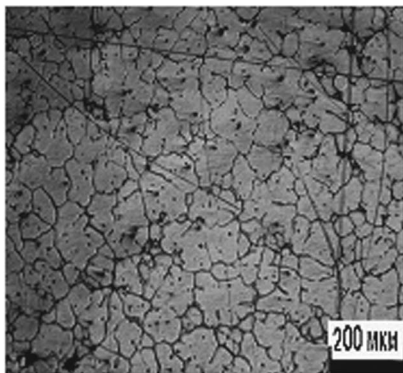


Рис. 3. Влияние роторной обработки расплава и скорости охлаждения на микроструктуру, морфологию кристаллов твердого раствора алюминия и механические свойства сплава В95: а – исходный образец, охлаждение расплава с формой на воздухе ($T_{\text{зал}} = 655 \text{ }^\circ\text{C}$, $V_{\text{охл}} = 0,3 \text{ }^\circ\text{C/с}$); б – роторная обработка расплава, закалка расплава с формой в воде ($T_{\text{зал}} = 640 \text{ }^\circ\text{C}$, $V_{\text{охл}} = 4 \text{ }^\circ\text{C/с}$)

Общие закономерности структурообразования отливок из сплава Д16 аналогичны сплаву В95 (рис. 4). В микроструктуре образца, полученного заливкой расплава в форму из алюминиевой фольги ($d = 30$ мм) при температуре 638 °С (перегрев расплава над линией ликвидус 3 °С) с охлаждением на воздухе, морфология α -твердого раствора преимущественно в виде розеток (96 %) величиной 110 – 170 мкм. Доля эвтектики около 1 %. Такая микроструктура обеспечивает следующие механические свойства: $HV = 812$ МПа, $\sigma_B = 305$ МПа (рис. 4, а).

Роторная обработка расплава с его последующим скоростным охлаждением вместе с тонкостенной (300 мкм) формой в воде ($V_{\text{охл}} = 5$ °С/с) приводит к уменьшению размера кристаллов α -твердого раствора розеточной морфологии до 50 – 100 мкм, объемная доля которых также составляет 96 %, при содержании дендритов 2,3 %. Количество тонкодифференцированной эвтектической составляющей не превышает 1,7 % (рис. 4, б).

С повышением скорости охлаждения расплава увеличивается степень пересыщенности α -твердого раствора алюминия и соответственно его микротвердость (рис. 5). Так, в образце диаметром 20 мм, охлажденном со скоростью 5 °С/с, микротвердость α -фазы на 20 % выше, чем в отливке диаметром 30 мм, охлажденной со скоростью 4 °С/с.



б

Рис. 4. Влияние роторной обработки расплава и скорости охлаждения на микроструктуру, морфологию кристаллов твердого раствора алюминия и механические свойства сплава Д16: а – исходный образец, охлаждение расплава с формой на воздухе ($T_{\text{зал}} = 638$ °С, $V_{\text{охл}} = 0,3$ °С/с); б – роторная обработка, закалка расплава с формой в воде ($T_{\text{зал}} = 638$ °С, $V_{\text{охл}} = 5$ °С/с)

Повышение скорости охлаждения, связанное с переходом от охлаждения на воздухе к закалке в воде, также приводит к увеличению плотности отливок: из сплава В95 с 2,65 до 2,7 г/см³, из сплава Д16 – с 2,7 до 2,75 г/см³ (рис. 6). Однако более эффективным является результат при совмещении роторной обработки расплава с его закалкой в воде. По сравнению с охлаждением на воздухе плотность заготовок из сплава В95 возрастает на 3,3 %, а из сплава Д16 – на 3,7 %. Прослеживается некоторая тенденция формирования более плотных

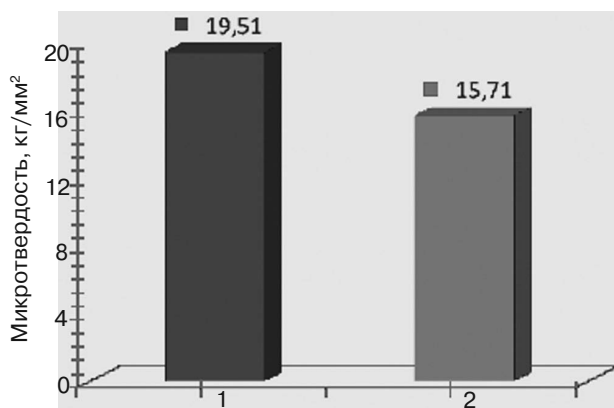


Рис 5. Влияние скорости охлаждения на микротвердость α-фазы в литых образцах из высокопрочного алюминиевого сплава В95: 1 – $V_{\text{охл}} = 5^\circ\text{C}/\text{c}$ (диаметр образца 20 мм); 2 – $V_{\text{охл}} = 4^\circ\text{C}/\text{c}$ (диаметр образца 30 мм)

отливок с увеличением температуры заливки расплава в форму. Так, с повышением температуры от 655 до 690 °С при получении заготовок из сплава В95 диаметром 30 мм их плотность увеличивается с 2,7 до 2,742 г/см³, то есть почти на 2 %. С перегревом расплава возрастает степень растворимости газов, прежде всего водорода, что, соответственно, приводит к увеличению пористости и уменьшению плотности в твердом состоянии. Учитывая этот факт, можно предположить, что при использовании эффективных способов дегазации влияние температуры на плотность отливок было бы более значимым.

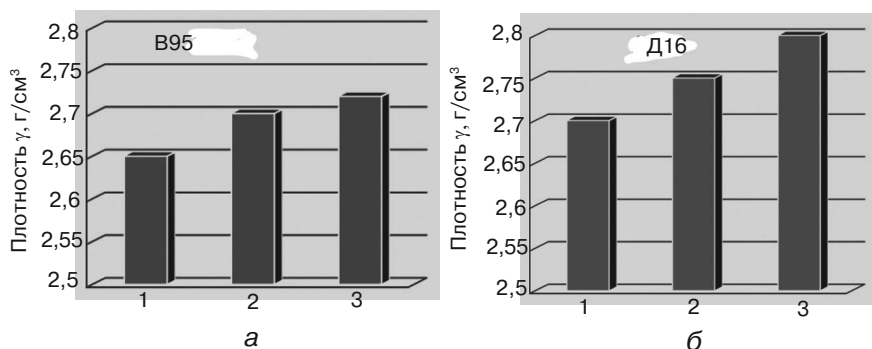


Рис. 6. Гистограммы плотности литых образцов из сплавов В95 (а) и Д16 (б): а – 1 – исходный образец, полученный охлаждением тонкостенной формы ($d = 20$ мм) с расплавом на воздухе ($V_{\text{охл}} = 0,3^\circ\text{C}/\text{c}$), 2 – охлаждение формы с расплавом в воде ($d = 20$ мм, $T_{\text{зал}} = 646^\circ\text{C}$), 3 – роторная обработка, охлаждение формы с расплавом в воде ($d = 20$ мм, $T_{\text{зал}} = 676^\circ\text{C}$); б – 1 – исходный образец, полученный охлаждением тонкостенной формы ($d = 20$ мм) с расплавом на воздухе ($V_{\text{охл}} = 0,3^\circ\text{C}/\text{c}$), 2 – охлаждение формы с расплавом в воде ($d = 20$ мм, $T_{\text{зал}} = 638^\circ\text{C}$), 3 – обработка расплава ротором, охлаждение формы с расплавом в воде ($d = 20$ мм, $T_{\text{зал}} = 638^\circ\text{C}$)

Нагрев подготовленного к изотермическому прессованию образца из алюминиевого сплава В95 до температуры 600 °С с последующим охлаждением на воздухе приводит к изменению его микроструктуры, морфологии α-твердого раствора алюминия (рис. 7). Розеточные кристаллы α-фазы (см. рис. 3, б) трансформируются в практически равноосные, глобулярные кристаллы размером 100–400 мкм с фактором формы $\sim 0,95$. Такие структурные изменения в заготовке способствуют повышению эффективности процесса тиксоформинга [8].

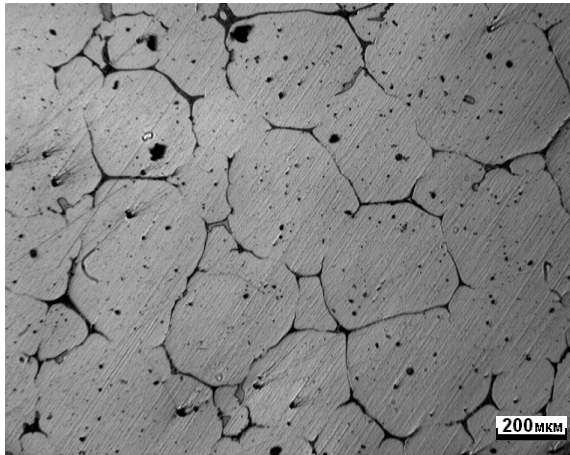


Рис. 7. Микроструктура литого образца из сплава В95 после нагрева до температуры 600 °С и охлаждения на воздухе

Литые заготовки, полученные с использованием роторной обработки расплава в ковше, заливки его в трехслойные формы из алюминиевой фольги и последующей закалки в воде, подвергали изотермическому прессованию с целью изготовления тонкостенного элемента. Технологические режимы прессования приведены в табл. 2.

Внешний вид полученного изделия, разрезанного по оси в направлении деформации прессованием, представлен на рис. 8. Цифрами обозначены области исследования его микроструктуры, в том числе тонкостенного элемента (клин). Микроструктура тонкостенного элемента (см. рис. 8, г, д) представлена

Таблица 2

Режимы изотермического прессования при получении тонкостенного элемента из сплава Д16

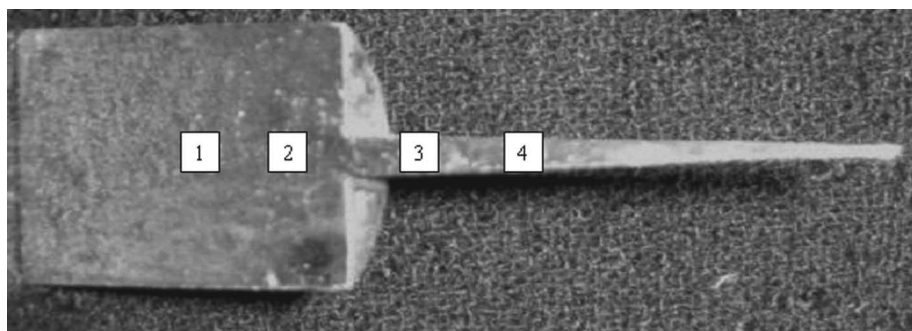
Температура нагрева заготовки, °С	Температура нагрева формы, °С	Усилие прессования, т	Смазка	Время выдержки, мин
580	500	70	укринол	7

зернами α -твердого раствора, вытянутыми в направлении течения металла при деформации. По их границам располагаются интерметаллидные фазы темного цвета, входящие в состав эвтектических колоний, имеющих ширину 5–10, длину до 20 мкм, а также интерметаллиды в свободном состоянии. Наиболее вероятно, это эвтектика α -Al–CuAl₂–S(Al₂CuMg) и интерметаллиды S(Al₂CuMg), Mg₂Al₃, CuAl₂, выделившиеся из твердого раствора алюминия при нагреве заготовки перед изотермическим прессованием, а также под действием напряжений, возникающих в процессе пластической деформации.

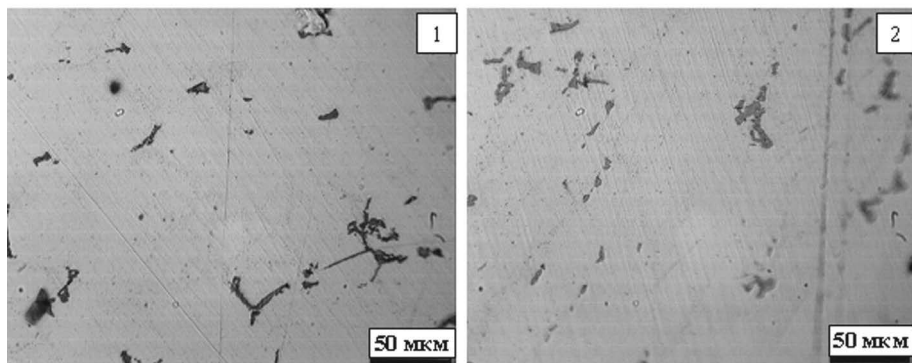
В цилиндрической части изделия колонии эвтектик и интерметаллиды практически равномерно распределены и не имеют преимущественного направления роста (см. рис. 8, б, в). В процессе изотермического прессования металл достаточно хорошо течет, заполняя полость формы, в том числе наиболее узкую ее часть размером до 0,6 мм.

Таким образом, в структуре литых образцов из высокопрочных алюминиевых сплавов В95 и Д16, полученных в условиях теплосилового воздействия, формируется α -твердый раствор розеточной морфологии различной дисперсности. В процессе нагревания заготовки перед прессованием розеточные кристаллы трансформируются в глобулярные. Это положительно влияет на ее тиксотропные свойства в процесс деформации, в частности, для изделий из алюминиевого сплава Д16.

Авторы выражают благодарность Вернидубу А. Г. за проведение опытных плавов и изготовление образцов, а также Оноприенко Л. И. – за измерение их плотности.

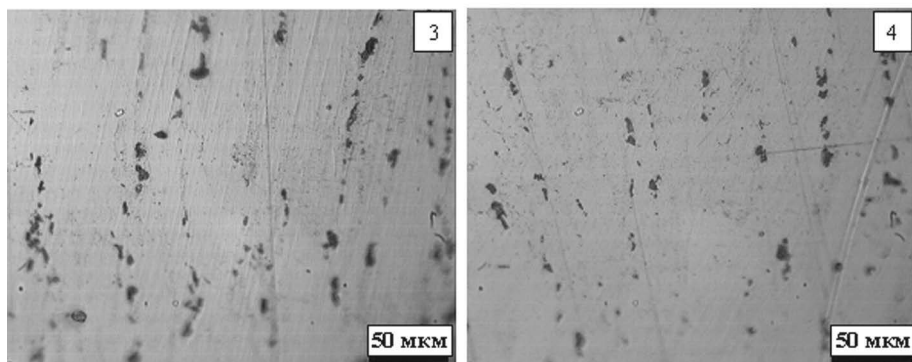


а



б

в



г

д

Рис. 8. Изделие (а), полученное изотермическим прессованием тиксозаготовки из сплава Д16, и микроструктуры участков (1, 2, 3, 4), отмеченных на изделии аналогичными цифрами (б–д)



Список литературы

1. Нго Тхань Бинь, Джиндо Н. А., Семенов А. Б., Семенов Б. И. Тиксоформинг высокопрочных сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». – 2012. – С. 148–165.

2. *Kapranos P.* Thixoforming wrought aluminium alloys. URL: www.aluplanet.com.
3. United States Patent. 3,954,455. *Flemings et. al.* Liquid-solid alloy composition. May 4, 1976.
4. *Головаченко В. П., Борисов Г. П., Дука В. М., Вернидуб А. Г.* Литье цветных металлов и сплавов в форму из металлической фольги // Процессы литья. – 2012. – № 2. – С. 40–44.
5. *Головаченко В. П., Борисов Г. П., Дука В. М.* Способ тиксолитья. Патент Украина № 85981, опубл. 10.03.09, Бюл. № 5.
6. *Головаченко В. П., Хвостенко И. В., Вернидуб А. Г.* Что дает роторная обработка алюминиевых расплавов в предкристаллизационной области температур // Процессы литья. – 2013. – № 4. – С. 28–30.
7. *Натапов Б. С.* Металловедение. – М.: Металлургиздат, 1950. – 340 с.
8. Производство изделий из металла в твердожидком состоянии. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. – 223 с.



References

1. *Ngo Than Biny, Gindo, N. A., Semenov, A. B., Semenov B. I.* (2012) Thixoforming vysokoprochnykh spлавov sistemy Al—Zn—Mg—Cu [Thixoforming high-strength alloys of the Al-Zn-Mg-Cu system]. Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. «Mashinostroenie», pp. 148–165 [in Russian].
2. *Kapranos, P.* Thixoforming wrought aluminium alloys. URL: www.aluplanet.com [in English].
3. United States Patent. 3, 954, 455. *Flemings et. al.* Liquid-solid alloy composition. May 4, 1976.
4. *Golovachenko, V. P., Borisov, G. P., Duka, V. M., Vernydub, A. G.* (2012) Lityo tsvetnykh metallov i spлавov formu iz metallicheskoj folgi [Casting of non-ferrous metals and alloy-in the form of metal foil]. Processy litya, no. 2, pp. 40–44 [in Russian].
5. *Golovachenko, V. P., Borisov, G. P., Duka, V. M.* Sposob tixolitya [Method of thixolysis] Patent Ukraine № 85981, opubl. 10.03.09, Byul. № 5.
6. *Golovachenko, V. P., Hvostenko, I. V., Vernydub, A. G.* (2013) Chto daet rotornaya obrobotka alyuminiyevykh rasplavov v predkristalizacionoy oblasti temeratur [What gives the rotary treatment of aluminum- melts in the pre-crystallization temperature range]. Processy litya, no. 4, pp. 40–44 [in Russian].
7. *Natalov, B. S.* (1950) Metallovedenie [Metal science]. М.: Metallurgizdat, 340 p. [in Russian].
8. *Semenov, B. I., Kushtaryov, K. M.* (2010) Proizvodstvo izdeliy iz metalla v tverdodidkom sostoyanii [Manufacture of metal products in trejzhdidkom state]. М.: MGTU im. N.E. Bauman, 2010. – 223 p.

Поступила 11.05.2018