

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.762.4.04:621.78.061

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-3-25-31

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ШТАМПОВКИ ПОКОВОК ИЗ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО СКОМПАКТИРОВАННЫХ ГРАНУЛ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Белокопытов В.И.

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Аннотация

Актуальность работы: метод гранулирования – качественно новый технологический процесс производства изделий из алюминия и его сплавов. В этом случае вместо традиционного литья слитков – сложного и трудоемкого процесса – исходным материалом служат гранулы – микрослитки с высокими наследственными свойствами. Такой технологический процесс позволяет не только снизить трудозатраты при производстве штампованных поковок, но и значительно повысить их качественные показатели. **Цель работы:** повышение качества изделий из гранул. **Используемые методы:** были проведены исследования влияния температурно-скоростных параметров процесса штамповки на механические свойства поковок. Исходным материалом для получения заготовок служили гранулы сплава 01969, относящегося к высокопрочным алюминиевым сплавам системы Al–Zn–Mg–Cu. Заготовки с поперечным сечением в виде равнобедренной трапеции получали из пресованного с коэффициентом вытяжки 10 профиля прямоугольного поперечного сечения. Нагрев заготовок до заданной температуры осуществляли в электрической печи в течение двух часов. **Полученные результаты:** установлено, что штамповка в наиболее благоприятном с точки зрения пластичности заготовки режиме повышает механические свойства готового изделия. Аналогичным образом, но в меньшей степени на свойства поковок влияет температура нагрева штампа. При этом наиболее высокий уровень механических свойств штампованных поковок достигается в интервале температур нагрева штампа и заготовки 300–350°C и интенсивности скоростей деформации сдвига $H = 5 \cdot 10^{-2} - 1 \cdot 10^{-1} \text{ с}^{-1}$.

Ключевые слова: гранулированные материалы, штампованные поковки, качество, механические свойства, структура, технология.

Введение

Металлургия гранул, сочетающая затвердевание расплава в виде микрослитков – гранул различной формы с высокой скоростью кристаллизации и их консолидацию в компактные заготовки с достижением плотной, беспористой структуры, является в настоящее время одним из наиболее важных способов дальнейшего повышения свойств конструкционных материалов в тех областях, где традиционная технология получения полуфабрикатов и деталей методом литья и деформации слитка уже исчерпала свои возможности [1].

Кристаллизация расплава с высокой скоростью позволяет устранить такие неизбежно со-

путствующие литью слитков сложнолегированных сплавов явления, как развитие зональной и грубой дендритной ликвации, образование скоплений первичных кристаллов интерметаллидных фаз и выделений избыточных фаз, не поддающихся выравнивающему воздействию гомогенизационного отжига, возникновение пор, раковин, трещин и других несплошностей, приводящих к резкому снижению деформируемости сплавов и возрастанию потерь металла. Высокоскоростная кристаллизация сплавов обеспечивает значительное уменьшение размеров макро- и микрозерна, диспергирование элементов дендритной структуры, вплоть до достижения микрокристаллической (ячеистой) структуры, диспергирование выделений первичных интерметаллидных и избыточных фаз, получение аномально

пересыщенных твердых растворов и тем самым существенное расширение пределов взаимной растворимости многих металлов [2, 3].

Таким образом, метод гранулирования – качественно новый технологический процесс производства изделий из алюминия и его сплавов. В этом случае вместо традиционного литья слитков – сложного и трудоемкого процесса – исходным материалом служат гранулы – микрослитки с высокими наследственными свойствами. Такой технологический процесс позволяет не только снизить трудозатраты при производстве штампованных поковок, но и значительно повысить их качественные показатели [4].

Результаты исследований и их обсуждение

Для изучения в лабораторных условиях влияния термомеханических параметров штамповки на механические свойства поковок и их анизотропию был изготовлен штамп, позволяющий получать изделия (рис. 1), близкие по конфигурации к поковкам типа «лонжерон» [4]. Штамп был оснащен карбидо-кремниевыми нагревате-

лями и установлен на гидравлическом прессе ПО 443 усилием 20 МН. Замер и регулирование температуры производили с помощью термопары, находящейся непосредственно у ручья штампа и подключенной к потенциометру. Механические свойства определяли на образцах, вырезанных в высотном 1а, 1б, 1в, продольном 2 и поперечном 3 направлениях согласно схеме на рис. 2.

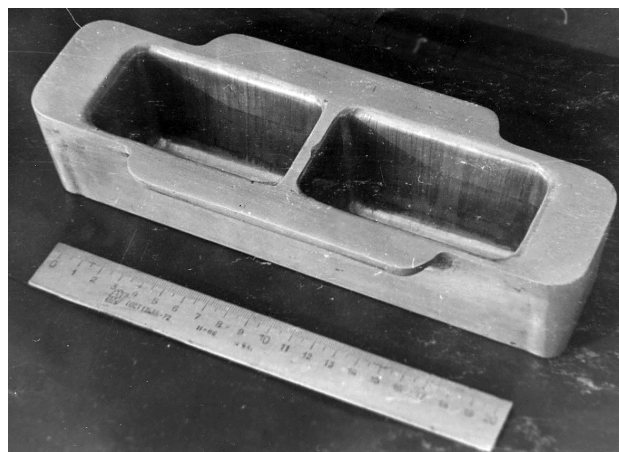


Рис. 1. Модельная штампованная поковка типа «лонжерон»

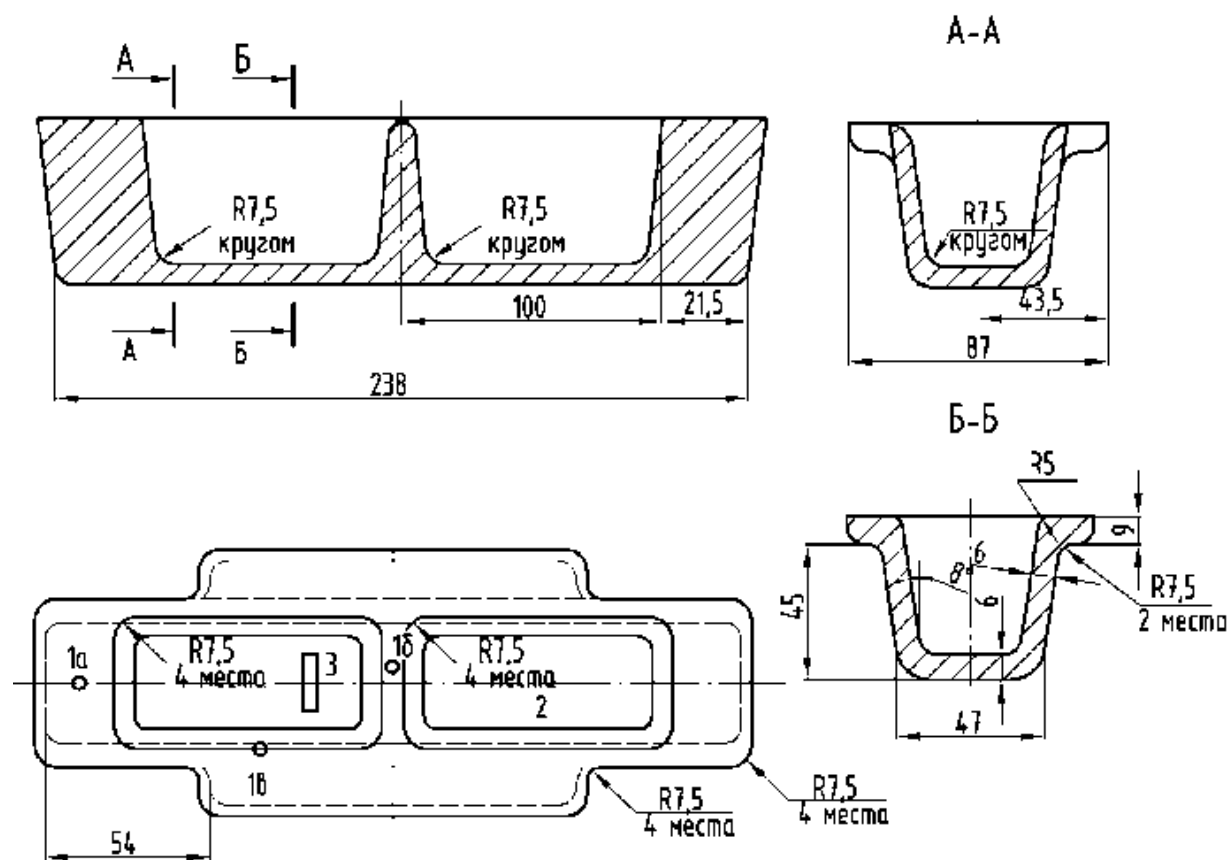


Рис. 2. Эскиз штампованной поковки типа «лонжерон»: 1а, 1б, 1в, 2, 3 – схемы вырезки образцов

Исходным материалом для получения заготовок служили гранулы сплава 01969, относящегося к высокопрочным алюминиевым сплавам системы Al-Zn-Mg-Cu [5, 6]. Заготовки с поперечным сечением в виде равнобедренной трапеции получали из прессованного с коэффициентом вытяжки $\lambda=10$ профиля прямоугольного поперечного сечения. Нагрев заготовок до заданной температуры осуществляли в электрической печи в течение двух часов. Полученные поковки подвергали окончательной термообработке по режиму T1, включающему закалку в воде с температуры $475\pm 5^\circ\text{C}$ и последующее старение при $135\pm 5^\circ\text{C}$ в течение 16 ч [7].

С целью определения влияния скоростных параметров процесса на механические свойства поковок процесс штамповки проводили при скорости перемещения траверсы прессы $v_0 = 0,05; 0,10; 0,18; 0,60$ и $1,80$ мм/с. Скорость деформации в вертикальном направлении определили по выражению

$$\xi_z = \frac{v_0}{h}, \quad (1)$$

где h – толщина дна штампованной поковки.

Приняв деформированное состояние в дне поковки плоским, интенсивность скоростей деформации сдвига рассчитывали исходя из уравнения [8]

$$H = 2\xi_z. \quad (2)$$

В табл. 1 представлены значения скоростей деформирования и соответствующих им скоростей деформации и интенсивности скоростей деформации сдвига в донной части поковок на конечном этапе процесса штамповки.

Таблица 1

Скорости перемещения траверсы прессы и соответствующие им скорости деформации и интенсивности скоростей деформации сдвига

v_0 , мм/с	ξ_z , с ⁻¹	H , с ⁻¹
0,05	$8,3 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$
0,10	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$3,4 \cdot 10^{-2}$
0,18	$3 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$
0,60	$1 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-1}$
1,80	$3 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-1}$

Как показали результаты исследований (рис. 3), максимальные значения предела текучести и временного сопротивления разрыву об-

разцов, вырезанных из поковок согласно схеме на рис. 2, соответствуют интенсивности скоростей деформации сдвига $H=5 \cdot 10^{-2} - 1 \cdot 10^{-1}$ с⁻¹. При этом относительное удлинение образцов изменяется незначительно (табл. 2).

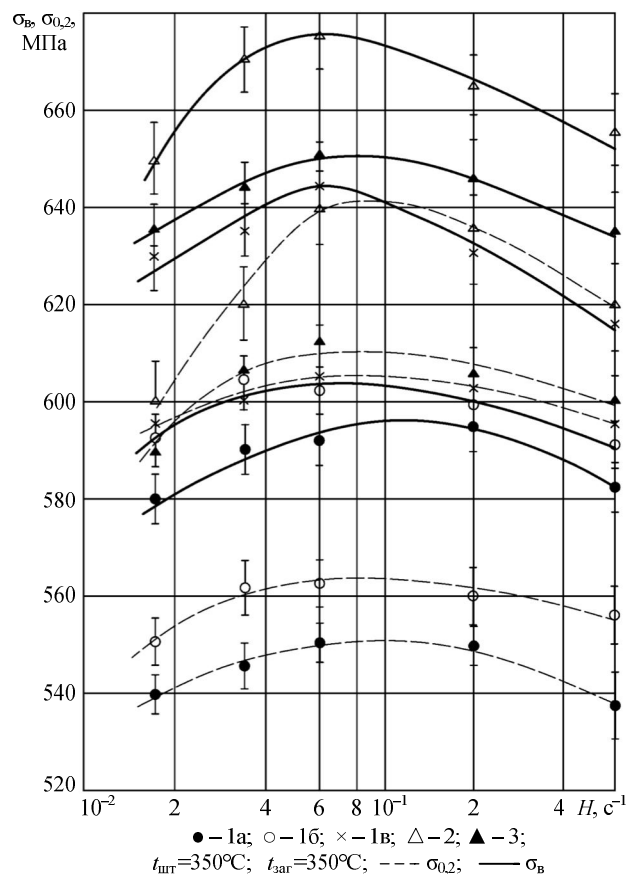


Рис. 3. Зависимость механических свойств образцов из поковок от интенсивности скоростей деформации сдвига при штамповке

Таблица 2

Относительное удлинение образцов из поковок, полученных при различных термомеханических параметрах процесса штамповки

H , с ⁻¹	$t_{шт}$, °C	$t_{заг}$, °C	Относительное удлинение (δ , %) образцов, полученных из поковок согласно схеме вырезки				
			1a	1б	1в	2	3
$1,7 \cdot 10^{-2}$	350	350	2,0	1,8	3,8	5,8	3,5
$3,4 \cdot 10^{-2}$	350	350	3,8	2,8	2,4	6,1	4,0
$6 \cdot 10^{-2}$	350	350	2,4	2,5	3,5	7,2	4,2
$6 \cdot 10^{-2}$	350	300	2,0	4,2	4,8	6,8	4,1
$6 \cdot 10^{-2}$	350	400	3,7	1,8	3,5	6,9	3,2
$6 \cdot 10^{-2}$	300	350	2,8	1,0	3,0	6,2	3,8
$6 \cdot 10^{-2}$	400	350	2,4	1,5	2,5	5,8	3,5

То есть штамповка в наиболее благоприятном с точки зрения пластичности заготовки скоростном режиме (рис. 4, 5) повышает механические свойства готового изделия.

Этот вывод справедлив и для температуры нагрева заготовок. Увеличение температуры за-

готовок выше 350°C приводит к снижению механических свойств штампованных поковок в высотном и поперечном направлениях (рис. 6). Аналогичным образом, но в меньшей степени на механические свойства влияет температура штампа (рис. 7).

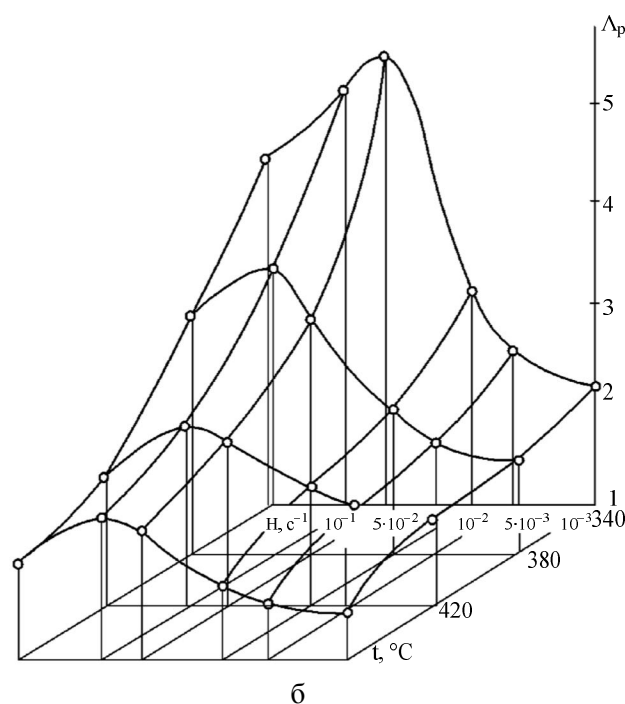
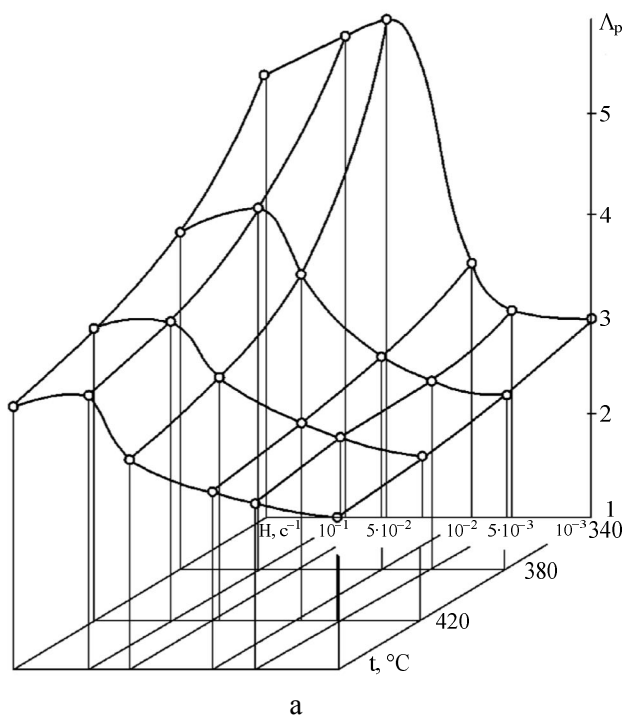


Рис. 4. Диаграмма пластичности в продольном (а) и поперечном (б) направлениях прессованного профиля прямоугольного сечения из гранул сплава 01969, полученная при испытаниях на кручение [9]

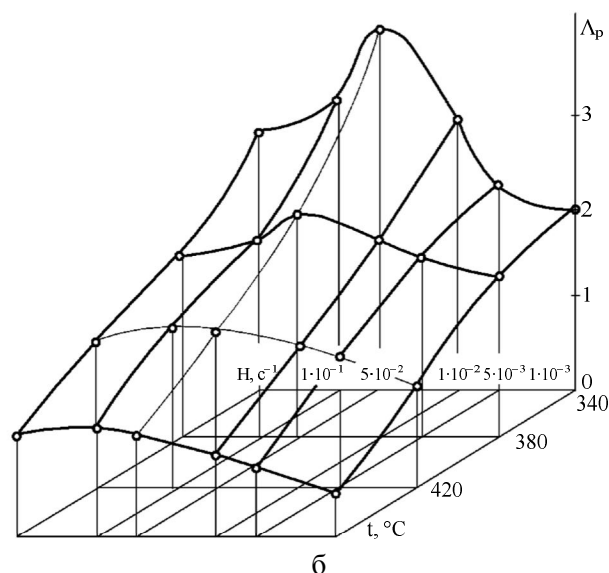
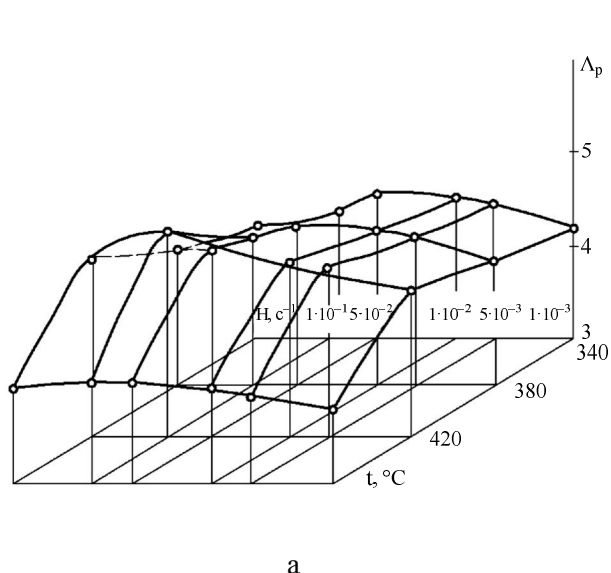


Рис. 5. Диаграмма пластичности в продольном (а) и поперечном (б) направлениях прессованного профиля прямоугольного сечения из гранул сплава 01969, полученная при испытаниях на растяжение

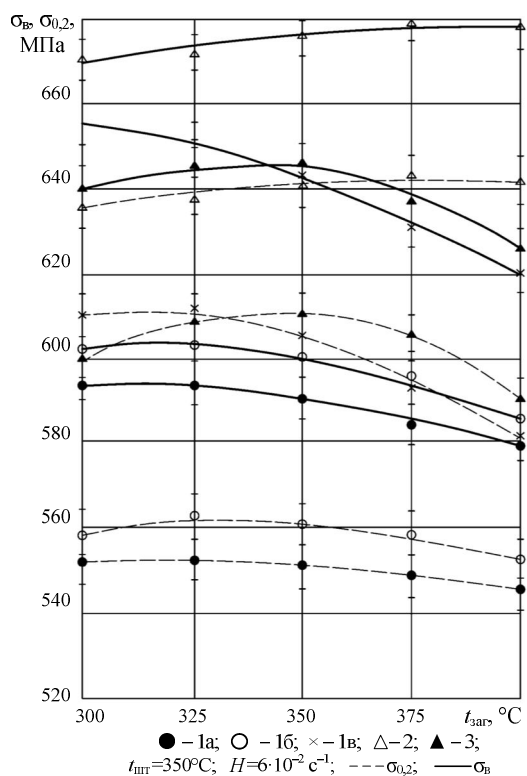


Рис. 6. Зависимость механических свойств образцов из поковок от температуры нагрева заготовок

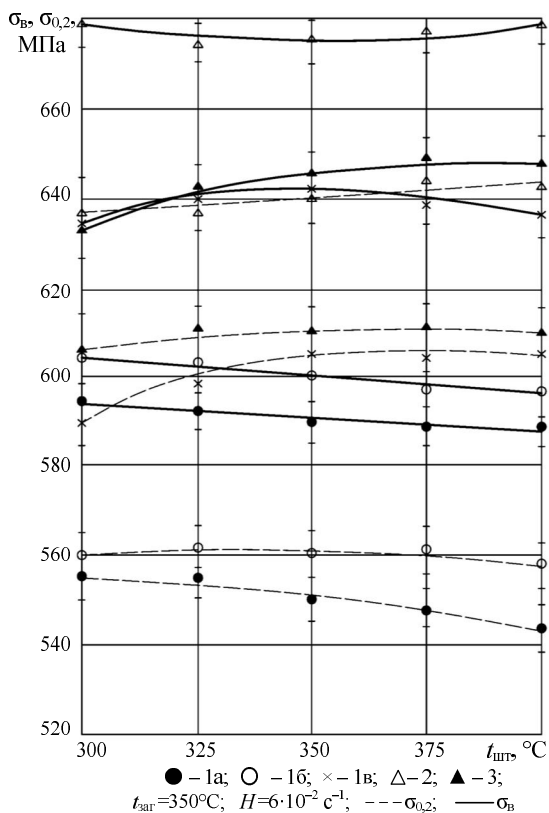


Рис. 7. Зависимость механических свойств образцов из поковок от температуры нагрева штампа

При этом снижение температуры заготовки и увеличение интенсивности скоростей деформации сдвига значительно повышает усилие штамповки $P_{шт}$ (табл. 3) вследствие возрастания сопротивления деформации материала.

Таблица 3
Зависимость усилия штамповки от температуры заготовки и интенсивности скоростей деформации сдвига при температуре штампа 350°C

$t_{заг}, °C$	H, c^{-1}	$\epsilon, \%$	$P_{шт}, МН$
300	$6 \cdot 10^{-2}$	22	2,24
		66	3,94
350	$6 \cdot 10^{-2}$	22	2,02
		66	3,62
400	$6 \cdot 10^{-2}$	22	1,91
		66	3,36
350	$1,7 \cdot 10^{-2}$	22	1,86
		66	3,09
350	$3,4 \cdot 10^{-2}$	22	1,96
		66	3,44

Таким образом, наиболее высокий уровень механических свойств штампованных поковок получен в интервале температур нагрева штампа и заготовки 300–350°C и интенсивности скоростей деформации сдвига $H=5 \cdot 10^{-2} - 1 \cdot 10^{-1} c^{-1}$.

Расчет формообразования реальной штампованной поковки типа «лонжерон» по методике [10] позволил спроектировать штамп для предварительной штамповки, обеспечивающий бездефектное оформление поковки на стадии окончательной штамповки. Предварительную и окончательную штамповку поковок в производственных условиях осуществляли при включении одного и трех насосов на вертикальном гидравлическом прессе усилием 150 МН. Заготовкой служила прессованная с коэффициентом вытяжки $\lambda = 10$ полоса толщиной 40, шириной 250 и длиной 1780 мм. Уменьшение поперечного сечения заготовки (по сравнению с ранее используемой) позволило увеличить вытяжку при ее прессовании и повысить коэффициент использования металла при последующей штамповке. Заготовки нагревали до температуры 300 и 350°C с изотермической выдержкой в течение 2–3 ч. Температура штампа составляла 340–350°C. Такой режим нагрева заготовки является по сути дорекристаллизационным отжигом для сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu, и температурный интервал его соответствует минимальной устойчивости пересыщенного твердого раствора. В результате нагрева происходит выделение из твердого раствора фаз на основе Zn, Mg и Cu (основных легирующих элементов данной группы сплавов) [11]. Так как заготовка подвергалась предварительной горячей деформации (при брикетировании и прес-

совании), то выделение интерметаллидных фаз происходит равномерно, а сама заготовка обладает достаточной пластичностью. Кроме того, в структуре присутствуют дисперсные выделения алюминидов переходных металлов, выделившихся при брикетировании и прессовании, а также при нагреве перед штамповкой. Таким образом, перед штамповкой структура заготовки является перекристаллизованной и представляет собой пластичный твердый раствор с равномерно распределенными в нем частицами интерметаллидов основных легирующих элементов и алюминидов переходных металлов. Последние располагаются преимущественно по границам субзерен [12]. За время выдержки заготовок в печи в течение 2–3 ч при температуре 340–350°C обеспечивается максимальное выделение из твердого раствора избыточных фаз с высокой равномерностью их распределения, что благоприятно сказывается на механических свойствах штампованных изделий.

Исследование геометрии полученных поковок показало, что полного оформления их при температуре нагрева заготовок до 300°C не достигается в силу недостаточной мощности прессы. Недоштамповка составляла 15–20 мм. При температуре нагрева заготовок под окончательную штамповку 350°C поковки оформлялись полностью. Зажимы и складки на поверхности поковок не наблюдались.

Уменьшение скорости деформирования с 7,5 (включение трех насосов) до 1,5 мм/с (включение одного насоса) позволяет понизить интенсивность скоростей деформации сдвига с 1,2 до $2,5 \cdot 10^{-1} \text{ с}^{-1}$, что положительно сказывается на механических свойствах поковок (табл. 4).

Таблица 4

Механические свойства штампованных поковок типа «лонжерон», полученных в производственных условиях при температуре 350°C

$H, \text{ с}^{-1}$	Направление вырезки образцов	Номер образца согласно схеме вырезки	$\sigma_{0,2}, \text{ МПа}$	$\sigma_{\text{в}}, \text{ МПа}$	$\delta, \%$
1,2	Продольное	2	620	665	7,2
		3	570	610	3,0
	Высотное	1 а	520	570	8,3
		1 б	530	585	2,8
$2,5 \cdot 10^{-1}$	Продольное	2	620	695	7,8
		3	595	640	4,0
	Высотное	1 а	545	595	10,4
		1 б	565	580	3,9
		1 в	605	670	5,8

Заключение

Таким образом, осуществление процесса штамповки при температуре 340–350°C и интенсивности скоростей деформации сдвига

$H = 2,5 \cdot 10^{-1} \text{ с}^{-1}$ позволило получить изделия с достаточно высокими механическими свойствами, отвечающими техническим условиям. Вместе с тем существующий уровень технологии литья, дегазации и компактирования гранул не обеспечивает получения качественной исходной заготовки с низким уровнем газосодержания, что приводит к появлению расслоений в виде точечных дефектов после закалки штампованных поковок. Интенсивность скоростей деформации сдвига, которая обеспечивалась включением одного насоса прессы, в 3–4 раза превышала оптимальную и дальнейшее уменьшение ее требует модернизации существующего оборудования, в чем заключается один из резервов повышения качества штампованных поковок.

Список литературы

1. Гарибов Г.С. Металлургия гранул – основа создания перспективных авиационных двигателей // Технология легких сплавов. 2007. № 1. С. 66–78.
2. Конкевич В.Ю., Лебедева Т.И. Развитие металловедения гранулируемых алюминиевых сплавов и технологии их производства // Технология легких сплавов. 2013. № 4. С. 113–123.
3. Польшкин Е.С. Перспективы развития гранульной металлургии титановых сплавов // Технология легких сплавов. 2011. № 4. С. 5–10.
4. Белокопытов В.И., Губанов И.Ю. Специальные виды штамповки: теория и технология штамповки поковок из гранул алюминиевых сплавов: монография. Красноярск: Сиб. фед. ун-т, 2013. 130 с.
5. Осинцев О.Е., Конкевич В.Ю. Высокопрочные быстрозакристаллизованные алюминиевые сплавы систем Al-Zn-Mg и Al-Zn-Mg-Cu // Технология легких сплавов. 2010. № 1. С. 157–163.
6. Осинцев О.Е., Конкевич В.Ю. О роли основных компонентов и переходных металлов в высокопрочных быстрозакристаллизованных сплавах системы Al-Zn-Mg-Cu // Технология легких сплавов. 2014. № 2. С. 57–64.
7. Кинематика старения гранулированных алюминиевых сплавов 01969 и 01995 / В.Н. Мироненко [и др.] // Тезисы докладов II Всесоюзной конференции по металлургии гранул. М.: ВИЛС, 1987. С. 133–134.
8. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. Екатеринбург: Уральский государственный технический университет – УПИ, 2001. 836 с.
9. Оптимизация параметров штамповки гранулируемых алюминиевых сплавов на основе исследования их реологических характеристик / Н.В. Шепельский [и др.] // Металлургия гранул: сб. статей. Вып. 5. М.: ВИЛС, 1989. С. 147–152.
10. Моделирование процесса горячей объемной штамповки поковки из алюминиевого сплава АК6 / И.Л. Константинов [и др.] // Цветная металлургия. 2015. № 1. С. 45–48.
11. Влияние цинкования гранул на структуру и механические свойства брикетов, промежуточных заготовок и штамповок из сплава 01969 / В.Д. Сидоренко [и др.] // Тезисы докладов II Всесоюзной конференции по металлургии гранул. М.: ВИЛС, 1987. С. 158–160.
12. Bampton, C.C. Heating rate effects on recrystallized grain size in two Al-Zn-Mg-Cu alloys / C.C. Bampton, J.A. Wert, M.W. Mahoney // Met. Trans. A. 1982, v. 13 a, no. 2, pp. 193–198.

Материал поступил в редакцию 14.05.15.

DEVELOPMENT OF A FORGING TECHNIQUE BASED ON PRE-COMPACTED ALUMINIUM ALLOY GRANULES

Vasily I. Belokopytov – Ph.D. (Eng.), Associate Professor

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. Phone: (391) 294-23-28. E-mail: VBelokopytov@sfu-kras.ru

Abstract

Problem Statement (Relevance): Granulating is a novel technique for manufacturing aluminium and aluminium alloy products. Instead of the conventional ingot casting, which is a complex and effort-consuming process, the new technique is based on granules, i.e. micro-ingots with strong hereditary properties. This process does not only help reduce the labor costs of die forging, but it also offers significant benefits in terms of quality. **Objectives:** The study aims to improve the quality of granule products. **Methods Applied:** Tests were carried out to identify the effect of the forging temperature and speed on the mechanical properties of forgings. The workpieces were made of granules of the 01969 alloy, which is one of the high-strength Al-Zn-Mg-Cu alloys. Pressed rectangular section billets with the elongation ratio of 10 were forged into billets with a trapezoidal cross-section. The billets were then placed in an electric furnace and heated up to a predefined temperature for two hours. **Findings:** It was determined that the forging process that ensures the most favourable conditions in terms of plasticity leads to enhanced mechanical properties in the finished product. The forging temperature was found to have a similar effect but to a lesser extent. The forging temperature range of 300 to 350 °C and the shear strain rate intensity of $H = 5 \times 10^{-2} - 1 \times 10^{-1} \text{ sec}^{-1}$ were identified as ensuring the highest level of mechanical properties of the die forgings.

Keywords: Granular materials, forgings, quality, mechanical properties, structure, technique.

References

- Garibov G.S. Granule metallurgy as the basis of building advanced aircraft engines. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Light alloy technology], 2007, no. 1, pp. 66–78. (In Russ.)
- Konkevich V.Yu., Lebedeva T.I. The development of the material science of granulated aluminium alloys and the technology behind them. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Light alloy technology], 2013, no. 4, pp. 113–123. (In Russ.)
- Pol'kin E.S. The development prospects of titanium alloy granule metallurgy. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Light alloy technology], 2011, no. 4, pp. 5–10. (In Russ.)
- Belokopytov V.I., Gubanov I.Yu. *Spetsial'nye vidy shtampovki: teoriya i tekhnologiya shtampovki pokovok iz granul alyuminiyevykh splavov* [Specific forging operations: The theory and technology of producing forgings from aluminium alloy granules. Monograph]. Krasnoyarsk: SFU, 2013, 130 p. (In Russ.)
- Osintsev O.E., Konkevich V.Yu. High-strength rapidly crystallized Al-Zn-Mg and Al-Zn-Mg-Cu alloys. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Light alloy technology], 2010, no. 1, pp. 157–163. (In Russ.)
- Osintsev O.E., Konkevich V.Yu. On the role of the main components and transition metals in high-strength rapidly crystallized Al-Zn-Mg-Cu alloys. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Light alloy technology], 2014, no. 2, pp. 57–64. (In Russ.)
- Mironenko V.N. [et al.] The aging kinematics of the 01969 and 01995 granular aluminium alloys. *Tezisy dokladov II Vsesoyuznoy konferentsii po metallurgii granul* [Abstracts of the 2nd All-Union Conference on Granule Metallurgy]. Moscow: VILS, 1987, pp. 133–134. (In Russ.)
- Kolmogorov V.L. *Mekhanika obrabotki metallov davleniem* [Metal forming mechanics]. Yekaterinburg: The Ural State Technical University – UPI, 2001, 836 p. (In Russ.)
- Shepelskii N.V. [et al.] Optimization of granular aluminium alloy forging parameters based on the study of the alloy rheological properties. *Metallurgiya granul: sbornik statey. Vypusk 5* [Granule metallurgy: A collection of articles. Iss. 5]. Moscow: VILS, 1989, pp. 147–152. (In Russ.)
- Konstantinov I.L. [et al.] Modelling a hot die forging operation based on the AK6 aluminium alloy. *Tsvetnaya metallurgiya* [Non-ferrous metallurgy], 2015, no. 1, pp. 45–48.
- Sidorenko V.D. [et al.] The effect of galvanized granules on the structure and mechanical properties of the 01969 alloy briquettes, billets and forgings. *Tezisy dokladov II Vsesoyuznoy konferentsii po metallurgii granul* [Abstracts of the 2nd All-Union Conference on Granule Metallurgy]. M.: VILS, 1987, pp. 158–160. (In Russ.)
- Bampton, C.C., Wert J.A., Mahoney M.W. Heating rate effects on recrystallized grain size in two Al-Zn-Mg-Cu alloys. *Met. Trans. A*. 1982, vol. 13 a, no. 2, pp. 193–198.

Received 14/05/15

Белокопытов В.И. Разработка технологии штамповки поковок из предварительно скомпактированных гранул алюминиевых сплавов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №3. С. 25–31. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-3-25-31

Belokopytov V.I. Development of a forging technique based on pre-compacted aluminium alloy granules. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 3, pp. 25–31. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-3-25-31