

ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

УДК 621.762.4.04:621.78.061

ВЫБОР ПРЕССОВАННОЙ ЗАГОТОВКИ ДЛЯ ШТАМПОВКИ ПОКОВОК ИЗ ГРАНУЛ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Белокопытов В.И.

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Аннотация. Осуществлена аналитическая оценка степени деформации сдвига, которой подвергается материал заготовки в процессе штамповки. Установлено наличие максимальных значений степени деформации сдвига в полотне и боковых стенках поковки, что приводит к появлению в гранулированном материале микронесплошностей в виде расслоений и отрицательно сказывается на механических свойствах изделий. Рекомендовано использовать в качестве заготовки под штамповку прессованный профиль прямоугольного поперечного сечения. Применение такой заготовки, обладающей пониженным уровнем анизотропии прочностных свойств, обеспечивает гарантированное соответствие механических свойств штампованных поковок требованиям технических условий.

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

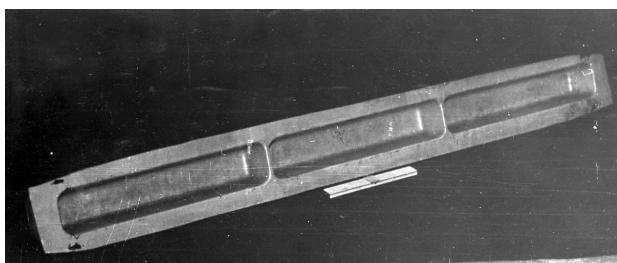
Введение

В последнее время в нашей стране и за рубежом интенсивно разрабатываются новые прогрессивные технологические процессы производства конструкционных материалов из гранул, получаемых диспергированием расплава с последующей кристаллизацией при большой скорости охлаждения [1]. Если вопросы структурообразования и фазовых превращений при литье гранул уже достаточно хорошо изучены, то проблеме консолидации гранул в компактное состояние, достижению устойчивого формообразования полуфабрикатов и формированию их нормированных свойств до настоящего времени не уделялось должного внимания [2]. По причине отсутствия научно обоснованных режимов горячей объемной штамповки гранул этим материалам оставались присущи существенные недостатки: неоднородность структуры, низкий уровень механических свойств и повышенная их анизотропия, развитое волокнистое строение макроструктуры и шиферный характер излома [3]. Поэтому актуальной является проблема создания новых схем

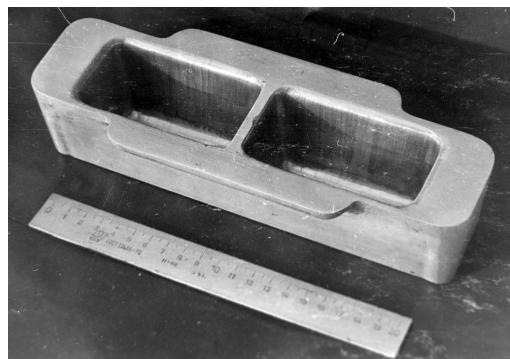
и режимов деформации, позволяющих получать изделия с однородной структурой и высокими эксплуатационными характеристиками [4]. При этом повышению эффективности использования таких материалов в объектах новой техники в значительной мере может способствовать прогнозирование анизотропии их свойств и разработка технологических процессов, приводящих к ее снижению.

Результаты исследований и их обсуждение

С целью повышения механических свойств поковок и снижения их анизотропии был осуществлен выбор прессованной заготовки и разработан технологический процесс получения из гранул сплава 01969 штампованной поковки типа «лонжерон» (рис. 1, а), имеющей габариты 107×175×1780 мм, с высотой ребер жесткости 95 мм и толщиной дна 12 мм. Конфигурация поковки соответствует пятой группе сложности. Сплав относится к высокопрочным алюминиевым сплавам системы Al–Zn–Mg–Cu [5]. Механические свойства поковок должны соответствовать техническим условиям, приведенным в табл. 1.



а



б

Рис. 1. Реальная (а) и модельная (б) штампованые поковки типа «лонжерон»

Таблица 1

Технические условия на механические свойства поковок из гранул сплава 01969

Состояние поставки	Направление испытания	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %
Горячепрессованное	Продольное	220	320	10,0
	Поперечное	200	300	8,0
	Высотное	180	260	4,0
Термообработанное по режиму Т1	Продольное	600	650	6,0
	Поперечное	580	620	4,0
	Высотное	530	570	2,0

Термообработка по режиму Т1 включает 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 [6].

Традиционная технология штамповки поковок типа «лонжерон» предусматривала следующие операции:

- нагрев прессованной заготовки до температуры $420\text{--}470^\circ\text{C}$ в течение 2 ч;
- ковка;
- нагрев кованой заготовки толщиной 90 мм до температуры $420\text{--}470^\circ\text{C}$ в течение 1 ч;
- предварительная штамповка;
- обрезка облоя;
- травление;
- зачистка дефектов;
- нагрев до температуры $420\text{--}470^\circ\text{C}$;
- окончательная штамповка;
- обрезка облоя;
- травление;
- зачистка дефектов;
- травление;
- контроль механических свойств.

Из данных, представленных в табл. 2, видно, что механические свойства образцов, вырезанных из поковок в продольном направлении, соответствуют техническим условиям, а в поперечном и

высотном направлениях не отвечают им. Последнее, по-видимому, связано с применением в качестве заготовки под штамповку прессованного полуфабриката круглого поперечного сечения, характеризующегося повышенным уровнем анизотропии механических свойств и низким качеством схватывания гранул в поперечном направлении. Кроме того, использование высоких температур при штамповке приводит к интенсивному газовыделению по границам гранул, что ухудшает схватывание между ними и способствует протеканию необратимых процессов структурного изменения в объеме гранул, проявляющегося в распаде пересыщенного твердого раствора с последующим выделением избыточных фаз и их коагуляции.

Таблица 2
Механические свойства штампованых поковок, полученных по традиционной технологии [7]

Направление испытания	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %
Продольное	575	650	8,0
Поперечное	540	585	4,2
Высотное	410	450	1,8

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

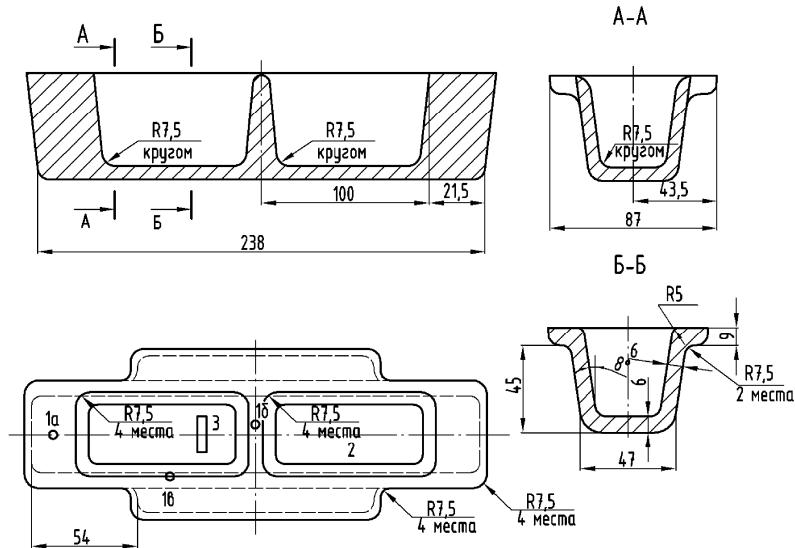


Рис. 2. Эскиз штампованной поковки типа «лонжерон»: 1 а, 1 б, 1 в, 2, 3 – схемы вырезки образцов

Заготовки с поперечным сечением в виде равнобедренной трапеции получали из прессованных с коэффициентом вытяжки $\lambda = 10$ профилей круглого и прямоугольного поперечных сечений. Нагрев заготовок до заданной температуры осуществляли в электрической печи в течение двух часов. Полученные поковки подвергали окончательной термообработке по режиму T1.

Для оценки степени деформации сдвига, которой подвергается материал в процессе штамповки, и расчета поля тензора деформации в местах вырезки образцов (см. **рис. 2**) использовали метод делительных сеток [8]. Делительную (координатную) сетку, состоящую из взаимно перпендикулярных линий, наносили на внутреннюю поверхность разрезанных вдоль оси симметрии заготовок с шагом 3 мм. Нанесение сетки осуществляли на координатно-расточном станке с точностью до 0,01 мм. Деформированную делительную сетку подвергали обмеру на инструментальном микроскопе БМИ – 1Ц. При получении поковки фиксировали начальную $\varepsilon = 44\%$, промежуточную $\varepsilon = 67\%$ и конечную $\varepsilon = 86\%$ стадии деформирования.

При нанесении координатной сетки на плоскость действия главных деформаций круг, вписанный в квадратную ячейку сетки, преобразуется в результат деформации в эллипс, а сама ячейка в параллелограмм. Главные полуоси эллипса определяли следующим образом [9]:

$$r_{1,2} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{a_1^2 + b_1^2}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{a_1^2 + b_1^2}{2}\right)^2 - a_1^2 b_1^2 \sin^2 \alpha}}, \quad (1)$$

где a_1 и b_1 – размеры ячейки после деформации; α – угол между сопряженными диаметрами, соединяющими точки касания эллипса со стороны

нами параллелограмма.

Компоненты тензора деформации в локальной системе координат находили по уравнениям:

$$U_1 = \frac{r_1}{r_0}; \quad U_2 = \frac{r_2}{r_0}; \quad U_3 = \frac{1}{U_1 U_2}. \quad (2)$$

Степень деформации сдвига (с учетом условия несжимаемости) определяли по выражению [10]

$$\Lambda = 2\sqrt{(\ln U_1)^2 + (\ln U_2)^2 + (\ln U_1 \ln U_2)}. \quad (3)$$

Изменение степени деформации сдвига по высоте поковки в ее характерных сечениях для начальной, промежуточной и конечной стадий процесса показано на **рис. 3-5**. Как видно из графиков, степень деформации сдвига возрастает с увеличением степени обжатия заготовок. При этом на всех стадиях процесса наблюдается неравномерность деформации по сечениям поковки. Наибольшая неравномерность деформации имеет место в крайнем сечении (торец поковки), что является следствием малой деформации средней части торца поковки и резкого увеличения степени деформации сдвига в верхней части сечения при истечении металла в облой.

На конечной стадии деформирования степень деформации сдвига в ребре $\Lambda \approx 2$ и остается практически постоянной по всей его высоте (см. **рис. 5**). Максимальное значение степени деформации сдвига отмечается в полотне и боковых стенках поковки, где $\Lambda = 4$ и более, что несколько ниже критической степени деформации сдвига при испытаниях на кручение прессованной из гранул сплава 01969 заготовки круглого сечения в продольном и выше чем в попечном направлении (**рис. 6**).

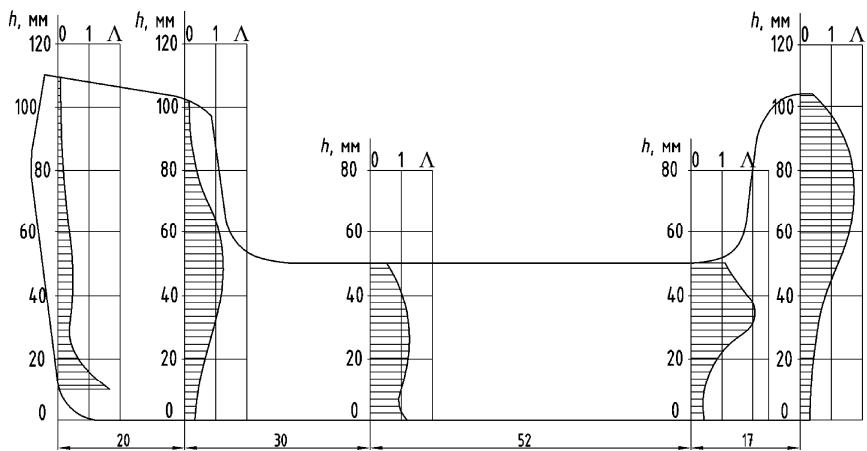


Рис. 3. Распределение степени деформации сдвига по сечению поковки на начальной стадии деформирования ($\varepsilon = 44\%$)

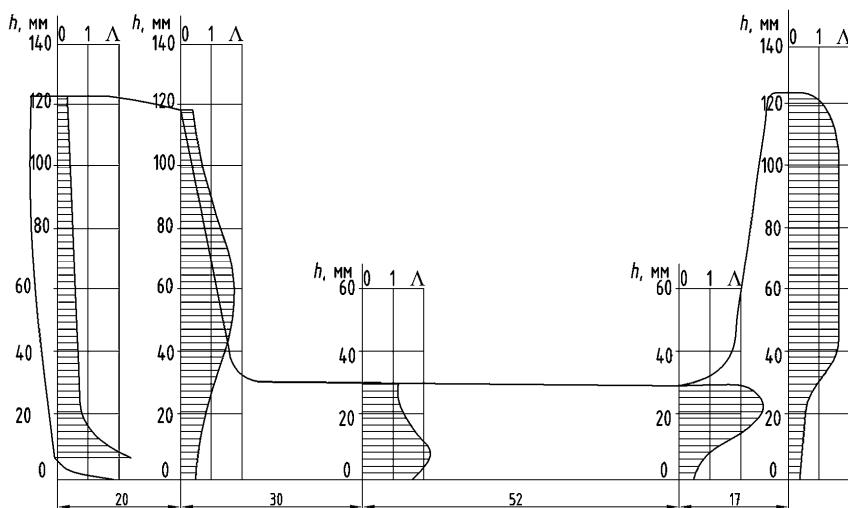


Рис. 4. Распределение степени деформации сдвига по сечению поковки на промежуточной стадии деформирования ($\varepsilon = 67\%$)

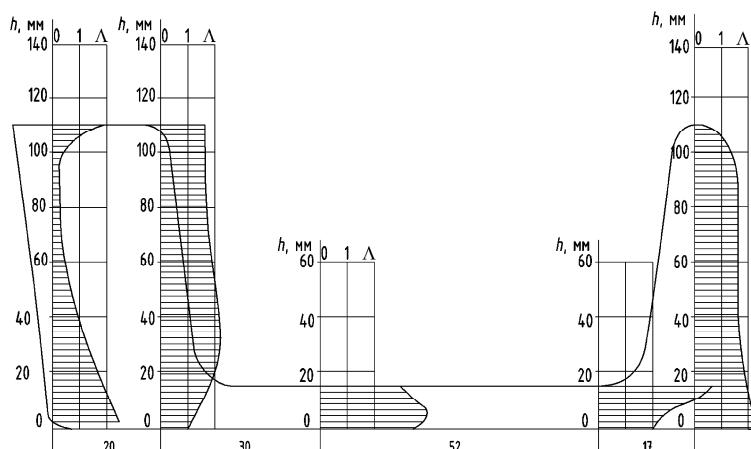


Рис. 5. Распределение степени деформации сдвига по сечению поковки на конечной стадии деформирования ($\varepsilon = 86\%$)

Поскольку оформление боковых стенок поковки происходит за счет деформации заготовки в поперечном направлении, то превышение степени деформации сдвига, соответствующей разрушению, может привести к появлению в гранулированном материале микронесплошностей в виде расслоений, что отрицательно сказывается на механических свойствах изделий.

С этой точки зрения, более предпочтительным является использование в качестве заготовки прессованной полосы прямоугольного сечения, так как для нее характерны высокие предельные степени деформации сдвига в поперечном направлении (рис. 7), достигающие $\Lambda_p=5,5$ при температуре испытания $340-350^\circ\text{C}$ и интенсивности скоростей деформации сдвига $H=5 \cdot 10^{-2}-1 \cdot 10^{-1} \text{ с}^{-1}$. Кроме того, прессованные полуфабрикаты прямоугольного поперечного сечения, полученные при плоской схеме прессования, обладают пониженным уровнем анизотропии прочностных свойств (табл. 3).

Временное сопротивление разрыву в продольном $\sigma_{\text{в}}^{\text{пр}}$ и поперечном $\sigma_{\text{в}}^{\text{п}}$ направлениях и анизотропия прочностных свойств горячепрессованных с коэффициентом вытяжки 10 полуфабрикатов, определенная экспериментально $(\sigma_{\text{в}}^{\text{п}}/\sigma_{\text{в}}^{\text{пр}})_e$ и рассчитанная аналитически $(\sigma_{\text{в}}^{\text{п}}/\sigma_{\text{в}}^{\text{пр}})_T$ [11], представлены в табл. 3.

В табл. 4 приведены значения механических свойств термообработанных образцов, вырезанных из поковок согласно схеме на рис. 2. Заготовки с поперечным сечением в виде равнобедренной трапеции были получены из прессованных полуфабрикатов круглого и прямоугольного поперечного сечения. Температура нагрева штампа и заготовки составляла 350°C , скорость перемещения траверсы пресса $v_0=0,18 \text{ мм/с}$.

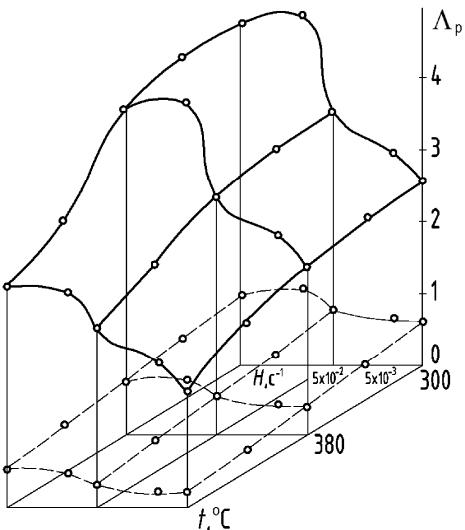


Рис. 6. Диаграмма пластичности в продольном (—) и поперечном (---) направлениях прессованного профиля круглого сечения из гранул сплава 01969, полученная при испытаниях на кручение

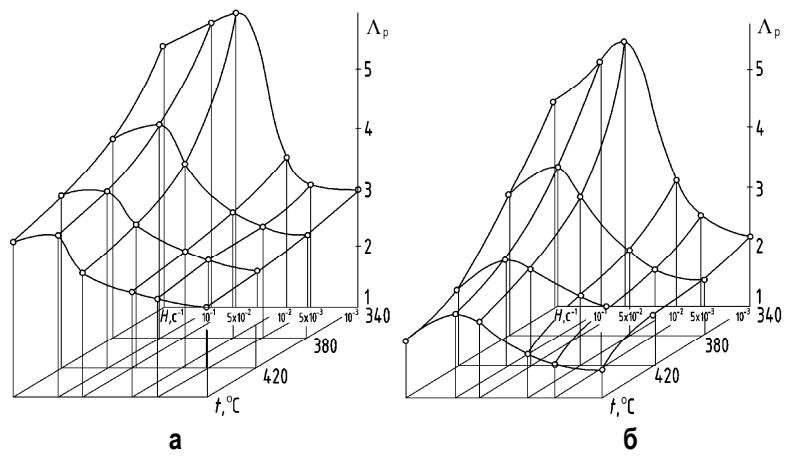


Рис. 7. Диаграмма пластичности в продольном (а) и поперечном (б) направлениях прессованного профиля прямоугольного сечения из гранул сплава 01969, полученная при испытаниях на кручение

Таблица 3

Временное сопротивление разрыву в продольном и поперечном направлениях и анизотропия прочностных свойств прессованных полуфабрикатов

Форма поперечного сечения полуфабриката	$\sigma_{\text{в}}^{\text{п}}$, МПа	$\sigma_{\text{в}}^{\text{пр}}$, МПа	$(\sigma_{\text{в}}^{\text{п}} / \sigma_{\text{в}}^{\text{пр}})_\text{п}$	$(\sigma_{\text{в}}^{\text{п}} / \sigma_{\text{в}}^{\text{пр}})_\text{т}$
Круг	265±5	330±5	0,78–0,85	0,72
Прямоугольник	315±5	325±5	0,94–1,00	1,00

Таблица 4

Значения механических свойств поковок, полученных из прессованных полуфабрикатов круглого и прямоугольного сечения

Форма поперечного сечения полуфабриката	Механические свойства	Номер образца				
		1а	1б	1в	2	3
Круг	$\sigma_{0,2}$, МПа	530	530	545	600	550
	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	575	575	590	660	595
	δ , %	2,5	2,5	3,0	6,8	4,4
Прямоугольник	$\sigma_{0,2}$, МПа	550	560	605	640	610
	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	590	600	645	675	650
	δ , %	2,4	2,5	3,5	7,2	4,2

Заключение

Результаты исследований, представленные в табл. 4, показывают, что применение прессованного профиля с прямоугольным поперечным сечением в качестве заготовки под штамповку позволяет значительно повысить механические свойства поковок в высотном (1в), продольном (2) и поперечном (3) направлениях. Кроме того, использование такой заготовки обеспечивает

гарантированное соответствие механических свойств штампованных поковок требованиям технических условий.

Список литературы

- Гаривов Г.С. Металлургия гранул – основа создания перспективных авиационных двигателей // Технология легких сплавов. 2007. № 1. С. 66–78.
- Конкевич В.Ю., Лебедева Т.И. Развитие металловедения гранулируемых алюминиевых сплавов и технологии их производства // Технология легких сплавов. 2013. № 4. С. 113–123.
- Полькин Е.С. Перспективы развития гранульной металлургии титановых сплавов // Технология легких сплавов. 2011. № 4. С. 5–10.
- 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.
- 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.
- Кинематика старения гранулированных алюминиевых сплавов 01969 и 01995 / В.Н. Мироненко [и др.] // Тезисы докладов II Всесоюзной конференции по металловедению гранул. М.: ВИЛС, 1987. С. 133–134.
- Оптимизация параметров штамповки гранулированных алюминиевых сплавов на основе исследования их реологических характеристик / Н.В. Шепельский [и др.] // Тезисы докладов II Всесоюзной конференции по металловедению гранул. М.: ВИЛС, 1987. С. 130–132.
- Смирнов-Аляев Г.А., Чикидовский В.П. Экспериментальные методы в обработке металлов давлением. Л.: Машиностроение, 1972. 360 с.
- Чиченев Н.А., Кудрин А.Б., Полухин П.И. Методы исследования процессов обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1977. 311 с.
- Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1986. 688 с.
- Шепельский Н.В., Корнилов В.Н., Белокопытов В.И. Аналитическое прогнозирование анизотропии сопротивления разрушению прессовок из сферических порошков // Порошковая металлургия. 1990. № 1. С. 62–65.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

SELECTING BLANKS FOR STAMPING FORGINGS FROM PELLETS OF ALUMINUM ALLOYS

Belogopytov Vasily Ivanovich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. Phone: +7 (391) 294-23-28. E-mail: VBelokopytov@sfu-kras.ru.

Abstract. This paper presents an analytical evaluation of the degree of shear strain during stamping of blanks. Maximum values of the degree of shear strain were established in the horizontally stamped thin wall and sidewalls of the forging, which resulted in micro-discontinuities in the form of laminations in the granulated material and adversely affected mechanical properties of products. It is recommended to use extruded rectangular cross-sectional profiles as a blank for stamping. Such blanks, having a reduced level of anisotropy of strength properties, provides for a guaranteed compliance of mechanical properties of forgings with technical requirements.

Keywords: Granulated materials, forgings, quality, mechanical properties, structure, technology.

References

- Garibov G.S. Metallurgy of granules – the basis of the creation of advanced aircraft engines. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of light alloys]. 2007, no. 1, pp. 66–78.
- Konkевич V.Yu., Lebedeva T.I. The development of material science of granulated aluminum alloys and their production technology. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of light alloys]. 2013, no. 4, pp. 113–123.
- Polkin E.S. Prospects of development of pellet metallurgy of titanium alloys. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of light alloys]. 2011, no. 4, pp. 5–10.
- Osintsev O.E., Konkевич V.Yu. High-strength rapidly crystallized aluminum alloys of Al – Zn – Mg and Al – Zn – Mg – Cu systems. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of light alloys]. 2010, no. 1, pp. 157–163.

5. Osintsev O.E., Konkevich V.Yu. On the role of main components and transition metals in high-strength rapidly crystallized Al – Zn – Mg – Cu alloys. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of light alloys]. 2014, no. 2, pp. 57–64.
6. Mironenko V.N. et al. Kinematics of aging of granular aluminum alloys 01969 and 01995. *Tezisy dokladov II Vsesoyuznoj konferentsii po metallurgii granul* [Abstracts of papers presented at the 2nd All-Union Conference on Metallurgy of Granules]. Moscow: VILS, 1987, pp. 133–134.
7. Shepelskiy N.V. et al. Optimization of stamping parameters for granular aluminum alloys based on a study of their rheological properties. *Tezisy dokladov II Vsesoyuznoj konferentsii po metallurgii granul* [Abstracts of papers presented at the 2nd All-Union Conference on Metallurgy of Granules]. Moscow: VILS, 1987, pp. 130–132.
8. Smirnov-Alyaev G.A., Chikidovskiy V.P. *Ekspериментальные методы в обработке металлов давлением* [Experimental methods in metal forming]. Leningrad: Mechanical Engineering, 1972, 360 p.
9. Chichenev N.A., Kudrin A.B., Polukhin P.I. *Методы исследования процессов обработки металлов давлением* [Research methods for metal forming processes]. Moscow: Metallurgy, 1977, 311 p.
10. Kolmogorov V.L. *Mekhanika obrabotki metallov давлением* [Mechanics of metal forming]. Moscow: Metallurgy, 1986, 688 p.
11. Shepelskiy N.V., Kornilov V.N., Belokopytov V.I. Analytical prediction of the anisotropy of the fracture strength of compacts from spherical powders. *Poroshkovaya metallurgiya* [Powder metallurgy]. 1990, no. 1, pp. 62–65.

Белокопытов В.И. Выбор прессованной заготовки для штамповки поковок из гранул алюминиевых сплавов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №3. С. 64–70.

Belokopytov V.I. Selecting blanks for stamping forgings from pellets of aluminum alloys. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 3, pp. 64–70.

УДК 669.784: 519.87

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПИРОЛИЗА ПРИ ПРОКАЛКЕ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Герасименко Т.Е., Мешков Е.И., Чибашвили А.В.

Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия

Аннотация. Представлены результаты идентификации математических моделей отгонки летучих веществ из четырёх основных типов углеродных материалов в условиях квазистатического процесса прокалки. Определены адекватные величины коэффициентов и энергий активации функций выхода летучих веществ. Показана возможность прогнозирования выделения летучих веществ в промышленных печах.

Ключевые слова: углеродные материалы, прокалка, квазистатический режим, летучие вещества, пиролиз, математическая модель, энергия активации, идентификация, интегральная и дифференциальная функции распределения.

Введение

Прокаливание углеродных материалов является одним из основных процессов в электродном производстве, поскольку во многом определяет качественные показатели готовой продукции. При нагревании углеродных материалов протекает комплекс сложных физико-химических превращений, в том числе выделение газообразных летучих веществ в результате пиролиза органических соединений. Моделирование этих процессов имеет большое значение для исследования и совершенствования процесса прокалки вычислительным экспериментом.

Теоретические основы пиролиза органики в процессе термообработки углеродного сырья рассмотрены в работах [1–4]. Известно [5, 6], что в результате пиролиза органики при температурах выше 600°C образуются в основном газообразные продукты, содержащие кроме насыщенных и ненасыщенных углеводородов неорганические соединения (H₂, N₂, H₂O, CO, CO₂).

Целью настоящей статьи является разработка

аналитических выражений, описывающих зависимость выхода летучих веществ от температуры термообработки различных типов углеродных материалов. Эти выражения в дальнейшем использованы в составе комплексной математической модели прокалки углеродных материалов в барабанной вращающейся печи, а модель учитывает совокупность определяющих условий и протекающих в печи процессов, в том числе отгонку и горение летучих веществ.

Разрабатываемые математические модели пиролиза обеспечивают возможность расчёта распределения по длине печи: выхода летучих веществ, тепловых потоков от их горения и, в конечном итоге, температурного поля и показателей прокалки.

Методы исследования

Для разработки математических моделей отгонки летучих веществ во время прокалки различных углеродных материалов использованы данные квазистатического объёмного выхода продуктов термического разложения [7]. В этой работе исследованы четыре основные типа угле-