

УДК 621.763

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КОНСОЛИДАЦИИ ГРАНУЛ ВЫСОКОПРОЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ В ОСНАСТКЕ ТЕРМОУПРУГИХ ПРЕССОВ

Микова А.А., студентка гр. М6О-105БВ-23, I курс
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования "Московский авиационный институт
(Национальный исследовательский университет)"
г. Москва

Введение. Современное машиностроение, ракетостроение, современная авиационная промышленность, отрасли производства, связанные с изготовлением космических аппаратов постоянно требуют от технологов создания новых материалов с повышенными прочностными и эксплуатационными свойствами. К материалам ракетной, авиационной и космической промышленности предъявляются повышенные требования по работоспособности в условиях сверхвысоких и сверхнизких температур (например, диапазон рабочих температур материала ответственных деталей может быть от $+800^{\circ}\text{C}$ в камере сгорания современного газотурбинного двигателя до -200°C при работе корпусов изделий в открытом космосе), по низкой плотности (от этого зависит вес летательного аппарата), по прочностным характеристикам, по износостойкости, по жаропрочности и жаростойкости и т.д. Одним из перспективных направлений создания новых материалов является металлургия гранул. Методами металлургии гранул сначала получают гранулы различных сплавов, которые затем консолидируют в компактные изделия. Принципиально важным здесь является то, что гранулы, затвердевающие из жидкого состояния расплава с гораздо большей скоростью охлаждения и кристаллизации формируют материал с уникальной мелкодисперсной структурой, с пересыщенным твердым раствором легирующих элементов, которые при обычной кристаллизации слитка выпадают в виде вторичных фаз [1]. Созданные таким образом материалы обладают уникальными эксплуатационными характеристиками. Важным является то, что при последующей консолидации гранул с получением готового изделия необходимо сохранить эти уникальные характеристики материала гранул.

Исследование состояния вопроса. Металлургия гранул алюминиевых сплавов в нашей стране довольно хорошо развита. Гранулированием получают материалы различных систем, например, систем Al-Zn-Mg-Cu, Al-Mg, Al-Cu-Mg, Al-Ce, Al-Cr-Zr, Al-Si и многих других. Разработаны различные технологии гранулирования позволяющие получать материал гранул с уникальными прочностными характеристиками, достичь которые

обычным легированием алюминиевых сплавов невозможно [2]. Как правило, для получения гранул алюминиевых сплавов в Российской Федерации используют капельный или вибрационный метод, которые по технологии очень похожи между собой и метод центрифугирования расплава. В зарубежной практике в основном используют метод газовой атомизации [3]. Крайне важным здесь является тот факт, что методом газовой атомизации получают гораздо меньшие по размерам частицы, которые по своим параметрам ближе к порошинкам, а не к гранулам. Существует ГОСТ 17359-82 "Порошковая металлургия. Термины и определения", согласно которому объект диаметром менее 1,0 мм называется порошинкой или частицей порошка, а диаметром более 1,0 мм – гранулой. Даже несмотря на тот факт, что эти объекты могут быть получены по одинаковой технологии. С учетом меньших размеров частиц порошка получаемых газовой атомизацией имеем, тот факт, что выше будет их скорость кристаллизации. И, следовательно, будут выше их прочностные характеристики [4].

Однако, сами по себе полученные гранулы являются только промежуточным полуфабрикатом. Конечной целью является получение готовых изделий. При этом крайне важно, чтобы материал изделий сохранял свои уникальные эксплуатационные свойства, полученные по гранульной технологии. Существует несколько принципиально разных методов консолидации гранул алюминиевых сплавов в компактный материал готовой продукции. Среди этих методов выделяют прессование заранее сформированных брикетов гранул на горизонтальных гидравлических прессах, газостатическое изотермическое прессование (ГИП), спекание (рис. 1).



Рисунок 1 – Классификация методов консолидации гранул алюминиевых сплавов [5]

В последнее время появились сообщения о возможности консолидации гранул методами аддитивных технологий, то есть последовательного

наращивания слоев при использовании в качестве расходного (аддитивного) элемента гранул ряда алюминиевых сплавов. Однако, в разработанной технологии по идентичности механизма консолидации, данный метод соединения гранул можно отнести к спеканию. Важным моментом во всех технологиях консолидации является не только формирование прочного и надежного твердофазного соединения между гранулами, но и так же недопустимость протекания процессов рекристаллизации [5].

Температура рекристаллизации для алюминиевых сплавов довольно низкая (порядка 400 °C), поэтому превышение температуры выше этих отметок, если и может иметь место, то оно должно быть крайне кратковременным, чтобы избежать самой возможности протекания процессов рекристаллизации. В рамках проводимых исследований предлагается использовать технологию консолидации гранул алюминиевых сплавов в термокомпрессионном устройстве. Механизм консолидации гранул подобен механизму при методе ГИП, однако не требует газовой среды. Предлагаемый способ имеет преимущества перед спеканием, так как используется не только механизм диффузионного взаимодействия на поверхности гранул (диффузионная сварка), но и механизм совместной пластической деформации гранул, позволяющий получить более качественное твердофазное соединение и безпористую структуру материала. Кроме того, при использовании штамповой оснастки внутри термоупругих прессов из гранул формируется уже окончательно готовое изделие, не требующее последующей механической обработки [6].

Методика проведения экспериментов. Для исследования возможности консолидации гранул алюминиевых сплавов в готовое изделие использовался термоупругий пресс, схема которого представлена на рис. 2. Пресс состоит из следующих основных элементов. Основой рассматриваемого оборудования является теплозащитный кожух (1), изготовленный из асбоцементных плит, предназначенный для изоляции температуры внутри установки от окружающей среды, а также массивные внешняя (2) и внутренняя (4) деформирующие оболочки. Вся конструкция крепится на опорной раме (9). В зазор между внешней деформирующей оболочкой (2) и штамповой оснасткой (3) засыпаются гранулы или порошок.

Представленный на схеме (рис. 2) термоупругий пресс работает следующим образом. Нагрев системы осуществляется с помощью встроенных трубчатых электронагревателей (11), к которым подается электрический ток по сети (12). Контроль температуры нагрева, которая также определяет ход деформирующей оснастки и скорость деформирования осуществляется термopарами с помощью системы автоматизированного управления (7). При нагреве ТЭНов (11) нагревается система деформирующих оболочек (2, 4) и за счет термического расширения осуществляют всестороннее сжатие засыпанного между ними пористого материала. Стопорное кольцо (5) осуществляет фиксацию всех подвижных элементов в корпусе устройства (1). После окончания деформационной операции сжатия во входной па-

трубок системы охлаждения (8) подается вода, которая охлаждает внутренний сердечник (10) и деформирующую оболочку (4). Уменьшаются размеры деталей (10, 4, 2). Снимается стопорное кольцо (5) и извлекается изделие (6) в виде конусной замкнутой обечайки с продольно-поперечным оребрением.

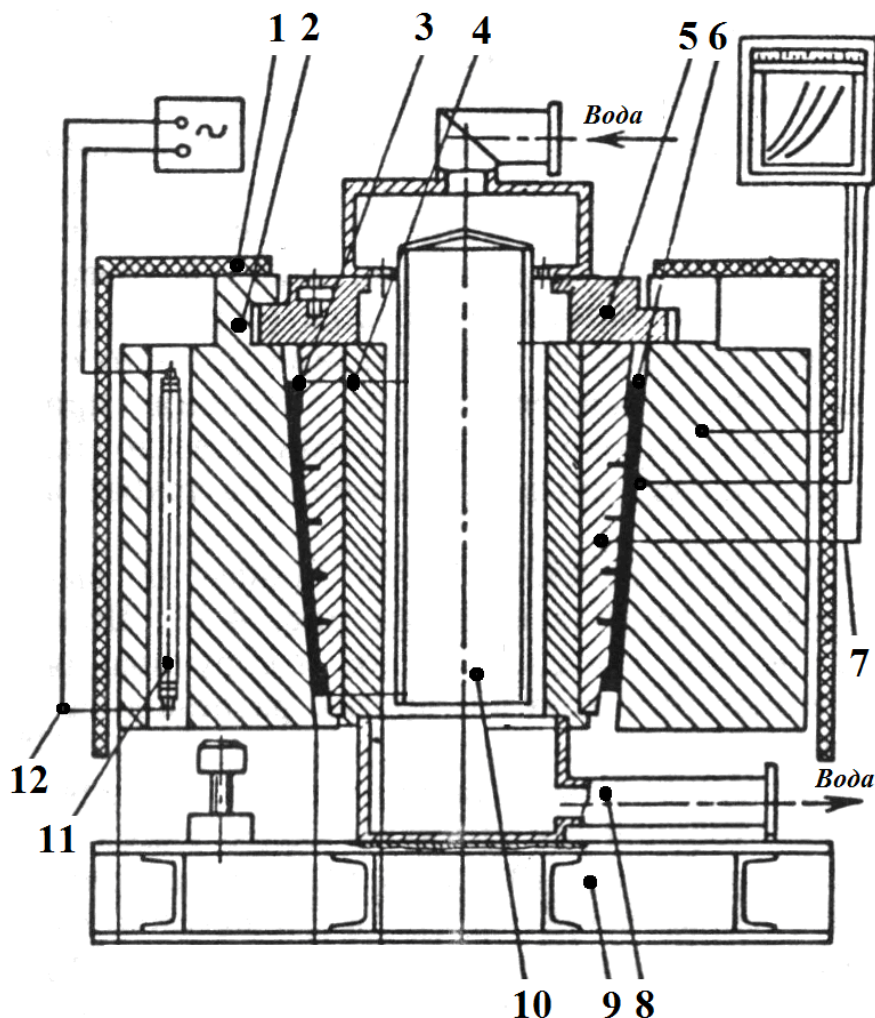


Рисунок 2 – Классическая схема термоупругого пресса

В качестве материала исследований использовались гранулы алюминиевых сплавов Д1 и Д16 стандартного химического состава, полученные по технологии гранулирования при повышенных скоростях кристаллизации. Более подробно технология получения используемых гранул рассмотрена в [5].

Температура обработки варьировалась в диапазоне от 300 до 550 °С. Ход деформирующего инструмента варьировался в диапазоне от 10 до 20 мм. Для управления скоростью деформирования применялась автоматизированная информационно-управляющая система, подробно описанная в [7]. Из полученных компактных изделий вырезались стандартные образцы для испытаний на растяжение. Исследование механических свойств материалов проводилось по стандартным методикам [8]. Исследование микроструктуры гранулированного материала проводилось с использованием оптического микроско-

па Olympus GX-51. Для решения проблемы инертности автоматизированной системы управления применялись стандартные протоколы, хорошо зарекомендовавшие себя при работе с термоупругим деформационным оборудованием [9].

Обсуждение результатов исследований. Первые проблемы возникли уже на этапе засыпки гранул алюминиевых сплавов марок Д1 и Д16 в штамповую оснастку. Проблема заключалась в сложности уплотнения сыпучего материала. Если в случае брикетирования или спекания в форме возможно уплотнение вибрационным воздействием на саму форму, то в рассматриваемом случае засыпка производится внутрь оборудования. Использовать вибрационные устройства для уплотнения сыпучей массы было невозможно. Образование пустот при засыпке внутри штамповой оснастки приводило к формированию пустот внутри тела готового изделия. Для решения данной проблемы пришлось тщательно сортировать гранулы по их качеству: в первую очередь по сферичности и однородности размеров. Другое решение данной проблемы заключалось в применении ударного воздействия на внутреннюю (доступную) поверхность деформационной обоймы, совмещенной со штамповой оснасткой. Вторая проблема заключалась в том, что за счет маленькой скорости деформирования и большой длительности процесса (~30 мин.) при температурах обработки 430°C начинались процессы рекристаллизации внутри структуры консолидированных гранул. Начинали расти новые рекристаллизованные зерна больших размеров, терялась мелкодисперсность структуры, распадался пересыщенный твердый раствор с выпадением вторичных фаз.

Были определены оптимальные температуры для получения штампованных изделий типа конических обечаек с ребрами жесткости с внутренней стороны изделия. Температура штамповки ~ 380-400°C. Время штамповки изделий ~ 60 мин. Механические испытания показали довольно высокие характеристики полученного гранулированного материала по сравнению с прочностными характеристиками традиционного материала деформированных полуфабрикатов из сплавов Д1 и Д16 (см. табл.).

Таблица

Сравнение прочностных характеристик гранулированного материала сплавов Д1 и Д16

№	Материал	Предел прочности σ_b , МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %
1	Д1 (традиционная технология; прессованный полуфабрикат)	410	250	15,0
2	Д1 (гранулированный материал, спрессованный по рассматриваемому методу)	550-570	360-380	11,0-12,0
3	Д16 (традиционная технология; прессованный полуфабрикат)	450	400	16,0
4	Д16 (гранулированный материал, спрессованный по рассматриваемому методу)	580-610	430-460	10,0-11,5

Помимо этого, установлено, что наиболее рациональным применением оборудования типа термоупругих прессов является использование его для компактирования гранул труднодеформируемых материалов, таких как гранулы алюминидов никеля NiAl , Ni_3Al и жаропрочных никелевых сплавов [10, 11].

Известно, что одной из наиболее серьезных проблем современного машиностроения является разная производительность оборудования, последовательно задействованного в реализации сложных технологических процессов. Термоупругие прессы являются крайне медленным и наименее производительным оборудованием. Поэтому были проведены работы по имитационному моделированию участка компактирования и последующей механической обработки. Моделирование осуществлялось с применением программной среды AnyLogic версии 6.3.1, которая является наиболее перспективной программой отечественной (русской) разработки [12]. Имитационное моделирование позволило подобрать нужное количество оборудования с минимальными объемами межоперационных запасов.

Заключение.

Таким образом, в результате проведенного комплекса исследований разработана схема компактирования гранул алюминиевых сплавов Д1 и Д16, полученных по технологии гранулирования со сверхвысокими скоростями кристаллизации. Сущность предлагаемой технологии заключается в применении термического и компрессионного воздействия с использованием термоупругих прессов.

При этом исключается необходимость дополнительной операции брикетирования гранул и обеспечивается получение готового изделия, не требующего дополнительной механической или термической обработки. В процессе проведенных исследований определены оптимальные температурные и временные параметры процесса компактирования в штамповой оснастке термоупругого прессы, позволяющие избежать возникновения и протекания процессов рекристаллизации ультрадисперсной структуры обрабатываемого материала.

Список литературы:

1. Добаткин В.И., Елагин В.И. Гранулируемые алюминиевые сплавы. М.: Металлургия, 1981. – 176 с.
2. Mullis A., Farrell L., Cochrane R., Adkins N. J. E. Estimation of cooling rates during close-coupled gas atomization using secondary dendrite arm spacing measurement. Metallurgical and materials transactions 2013. В 44 (4) doi:10.1007/s11663-013-9856-2.
3. Zeoli N., Sai G., Kamnis S. Numerical modelling of metal droplet cooling and solidification. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2008. No 51 (15-16). P: 4121-4131. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.11.044.
4. Бобылева К.А. Исследование технологий гранулирования алюминиевых сплавов в условиях значительной интенсификации теплоотвода и увеличения

скоростей кристаллизации. // Научные исследования: итоги и перспективы. 2024. № 1.

5. Жаров М.В. Исследование свойств гранулированных материалов системы Al-Cu-Mg, прессуемых из гранул, полученных с применением технологии центрифугования при сверхвысоких скоростях охлаждения // Технология машиностроения, 2021. № 4 (№ 226). с. 5-9. doi: 10.34641/TM.2021.226.4.011.

6. Atxaga G., Arroyo A., Canflanca B. Hot stamping of aerospace aluminium alloys: Automotive technologies for the aeronautics industry. Journal of manufacturing processes. Volume 81, September 2022, pp. 817-827. doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.07.032.

7. Жаров М.В. Информационно-измерительная система для управления производственным процессом на термокомпрессионном технологическом оборудовании // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2018. № 63. с. 116-121. doi: 10.21667/1995-4565-2018-63-1-116-121

8. ГОСТ 1497–84 (ИСО 6892–84). Металлы. Методы испытаний на растяжение. М.: Стандартинформ, 2008. 22 с.

9. Жаров М.В. Система автоматизированного управления работой термоупругих прессов: решение проблемы инерционности системы // Автоматизация в промышленности. 2021. № 4. с. 31-36. doi: 10.25728/avtprom.2021.04.07

10. Жаров М.В. Анализ технологических процессов производства сферических порошков и гранул моноалюминида никеля NiAl для нужд отечественного двигателестроения // Вопросы материаловедения. 2022. № 3 (111). с. 29-40. doi: 10.22349/1994-6716-2022-111-3-29-40.

11. Xu G.H., Zhang K.F., Huang Z.Q. The synthesis and characterization of ultrafine grain NiAl intermetallic // Advanced Powder Technology. 2012. Vol. 23. pp. 366–371.

12. Жаров М.В. Моделирование оптимизации для организации производств цехов машиностроения в программной среде AnyLogic // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2020. № 71. с. 151-161. doi: 10.21667/1995-4565-2020-71-151-161.