

тГТУ, 1997. 120 с.

3. Шандров Б.В. Прогрессивные технологии автомобилестроения. / Журнал автомобильных инженеров, № 6. 2004.
4. Шандров Б.В., Вартаков М.В. Новые технологии автомобилестроения. / Наука производству, № 4. 2005.
5. Максимов Ю.В., Анкин А.В., Ветрова Е.А. Зависимость глубины резания от погрешности формы поперечного сечения при комбинированной обработке нежестких деталей тип полый цилиндр. Известия МГТУ «МАМИ», № 2(8), 2009, с. 188-192.

### **Современные методы получения полых металлических микросфер**

к.т.н. Петров М.А., д.т.н. проф. Баст Ю.Л., к.т.н. доц. Петров П.А., д.т.н. проф. Шейпак А.А.

*Университет машиностроения, ТУ Фрайбергская Горная Академия, МГИУ*  
[petroff@imb.tu-freiberg.de](mailto:petroff@imb.tu-freiberg.de), [bast@imb.tu-freiberg.de](mailto:bast@imb.tu-freiberg.de), [p.petrov@mami.ru](mailto:p.petrov@mami.ru), [asheyp@msiu.ru](mailto:asheyp@msiu.ru)

*Аннотация.* Энерго- и ресурсосбережение являются для многих стран ключевыми факторами при выборе метода производства при разработке и реализации какой-либо технологии. В данной статье приведен обзор технологий получения полых металлических сфер, которые могут быть использованы в качестве конструкционного материала для облегченных металлоконструкций. Полые сферы, собранные в объем, обеспечивают надежную шумо- и теплоизоляцию, а также защиту от вибраций. Полые сферы могут быть применены как в объеме [1], так и по отдельности, при этом последние наполняются газовой смесью и служат в качестве мишеней для извлечения новых видов энергии [2, 3]. Методы изготовления микросфер могут быть разделены на химические методы, методы порошковой металлургии и диспергационные. Диспергационные методы основаны на работе расширения замкнутого газа и охлаждения металлической оболочки, выделенной из расплава металла (металлургический метод). Металлургический метод требует точного соблюдения параметров процесса, поскольку основывается на природных свойствах металлов, без использования дополнительных материалов и применения органических носителей (например, метод по газифицированным моделям).

*Ключевые слова:* полые металлические микросферы, диспергационные методы, металлургические методы, методы порошковой металлургии, метод по газифицированным моделям, легкие металлоконструкции, металлические пены, крэш-элементы

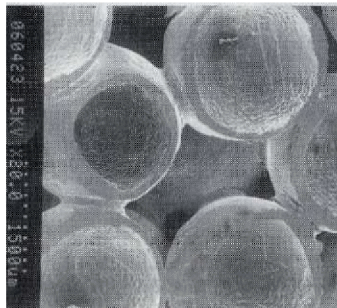
Применение облегченных металлоконструкций во всех отраслях промышленности делает данную отрасль науки популярной. Она помогает решить ряд проблем в машиностроении по энерго- и материалосбережению при развитии новых производственных технологий. Развитие технологий приводит к тому, что современные машины и оборудование должны быть максимально энергоэффективными. Поэтому новые материалы и композиты на их основе, а также поиск новых направлений их использования являются актуальной задачей.

Данная статья рассматривает методы получения полых металлических микросфер с целью их дальнейшего применения для облегчения металлоконструкций. Выбор метода изготовления зависит от требуемых свойств (внешний радиус, внутренний радиус, отклонение от соосности, соотношение толщины стенки к наружному радиусу, предел прочности и т.д.) отдельной микросферы, определяемых на этапе разработки концепта дальнейшего использования микросфер. Преимуществами применения конструкционных деталей из полых микросфер является высокая шумо- и звукоизоляция, а также защита от вибраций и поглощение энергии, вызванной пластической деформацией материала. Отдельные наполненные газовой смесью полые микросферы применяются при исследовании физических явлений [2, 3].

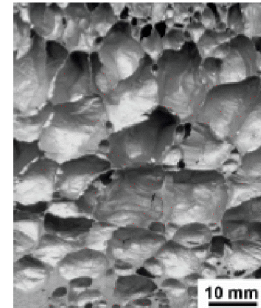
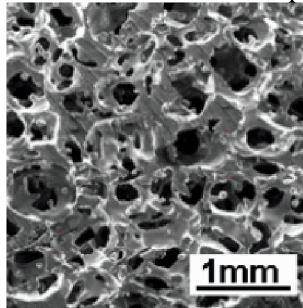
Полые сферы могут быть использованы в качестве отдельных компонентов, а также частично заменить закрытые и открытые металлические пены [4, 5], тем самым улучшив го-

могенность свойств материала, т.е. устранить анизотропию свойств, вызванную неравномерным размером ячеек (рисунок 1).

Полые структуры не всегда находят применение в ответственных конструкциях, поскольку их прочность может оказаться неудовлетворительной. Однако снижение веса конструкции при использовании известных конструкционных металлов возможно лишь за счет искусственного снижения их плотности, т.е. создания пористых структур. Так, например, было исследовано положительное влияние металлических пен в крш-элементах автомобилей [6].



а) структура из полых микросфер [9]



б) открытая (слева) и закрытая (справа) металлическая пена [13]

**Рисунок 1 – Макроснимки ячеистых структур**

Альтернативным решением является заполненный алюминиевый или магниевый профиль полыми сферами одноименного материала, который может поглощать большое количество энергии в результате пластической деформации, что приводит к повышению пассивной безопасности автомобиля. Подобные наполненные профили с металлическими пенами используются и в конструкциях автомобильных кранов (рисунок 2) [7].



**Рисунок 2 – Профиль с алюминиевой пеной [7]**

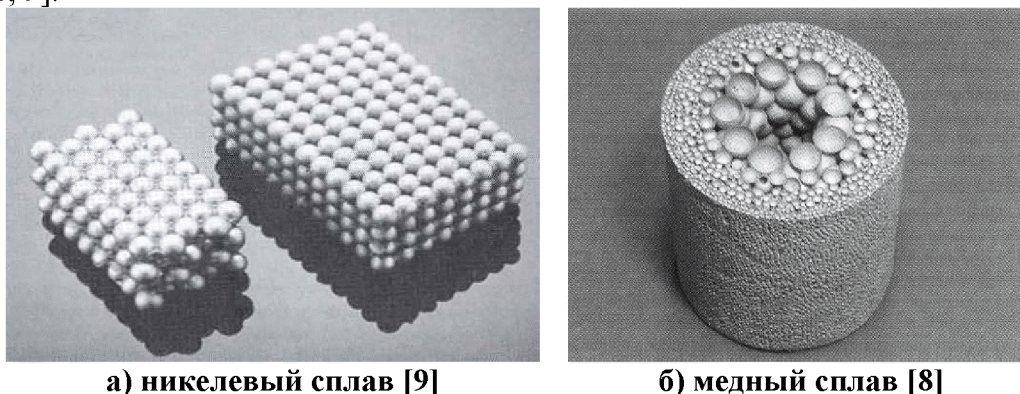
Методы изготовления микросфер могут быть разделены на методы порошковой металлургии, химические и диспергационные.

Химический метод – метод цементации – может быть использован при изготовлении медных микросфер и основан на растворении железа в сульфате меди (медный купорос –  $\text{CuSO}_4$ ). Гальваническое нанесение металлического слоя на органический носитель (например, полистирол) позволяет получать микросферы с малой и равномерной толщиной стенки (рисунок 3а), однако данный способ является весьма дорогостоящим и реализуется на дорогих материалах, например никель и его сплавы.

При реализации методов порошковой металлургии образуются сферы микро- и макро-размеров. В качестве органического носителя применяются полистирольные шарики, на поверхность которых наносится порошковая смесь. Органический носитель удаляется после того, как металлическая суспензия (смесь) сформировала сферу путем нагрева выше точки сгорания носителя (метод по газифицированным моделям). Далее проводится спекание полученных отдельных хрупких полых сфер, в процессе которого также происходит залечивание пор, оставленных после выхода газа, образованного при сжигании полистирола.

Следующая зарекомендовавшая себя схожая схема производства заключается в нанесении порошка на органический носитель методом окунания в суспензию с малой вязкостью

(рисунок 3б). Дальнейшая обработка производится в соответствии с вышеописанным процессом [8, 9].



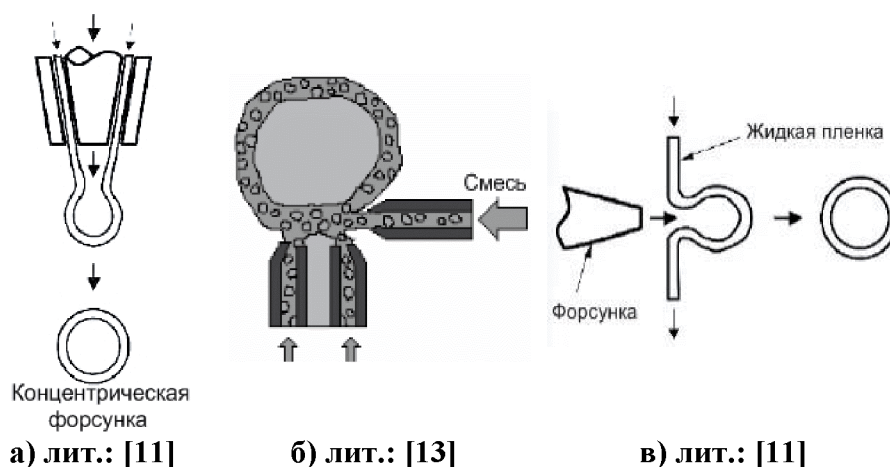
а) никелевый сплав [9]

б) медный сплав [8]

**Рисунок 3 – Изготовленные структуры методом гальванического покрытия (а) и порошковой металлургии (б)**

В исследованиях [5, 10] материалом служила суспензия, приготовленная из металлического порошка и связующего агента. После формообразования так называемых «зеленых» сфер связующий агент удалялся при помощи термического процесса.

Металлургические методы являются «умными» методами производства, они превосходят по трудоемкости проведение процесса, поскольку требуют рассмотрения многих физических параметров в интервале температур. Прямые методы основаны на физических свойствах жидкости. В них также не применяется органический носитель. Результат зависит только от правильного выбора технологических параметров и математического описания процессов, протекающих при формировании микросфер.



а) лит.: [11]

б) лит.: [13]

в) лит.: [11]

**Рисунок 4 – Известные методы изготовления**

Рассмотренные в работах [11, 12, 13] методы подходят как для металлических материалов (металлы и их сплавы, рисунок 4а), так и неметаллических материалов (стекло и керамика, рисунок 4б и в). Основной принцип действия процесса – выдувание оболочек через соосно расположенную к форсунке иглу газом. При этом материал может представлять собой раствор (рисунок 4а) или суспензию (порошковый материал + добавки, рисунок 4б и в).

В известных работах исследовались схемы соосного истечения на таких материалах, как алюминий, олово и оловянно-свинцовые сплавы [14 – 18]. Максимальный диаметр полученной микросферы составлял 3 мм. Данные диспергационные процессы основывались на методе неустойчивости Реллея, в соответствии с которым сферы отделяются от несущей струи в результате ее колебания на определенном расстоянии от форсунки L. Полость образовывалась в результате соосной подачи газа в расплав материала.

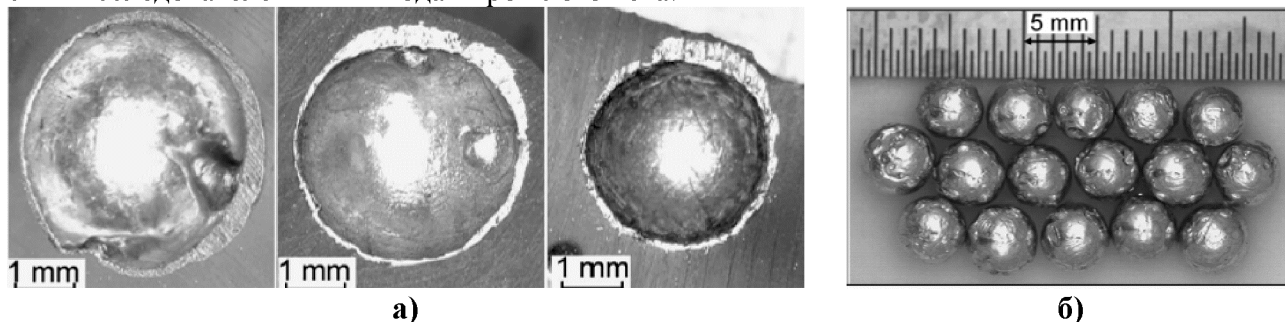
Хорошо известно, что на образование пузырей (процесс нуклеации) в расплаве металла влияет изменение рабочих условий: температуры, давления, смачиваемости со стенками тиг-



ля и т.д. В случае гомогенной или гетерогенной нуклеации газ в расплаве расширяется, и образовавшийся пузырь начинает расти. Если учитывать тот факт, что пузыри образуются в объеме металла, а также взаимодействуют друг с другом (коллидируют, растут, лопаются), то адаптация данного феномена в качестве разработки производственной технологии становится трудной задачей. Примером трудноуправляемого процесса может служить синтез полых сфер из плазмы, где металл находится в газообразном состоянии [19], или в результате резкой разгерметизации системы, находящейся под высоким давлением и температурой [20]. Такие процессы далеки от производственного внедрения, поскольку представляют собой комплекс сложных физических процессов, в котором металл из газообразного состояния в считанные секунды переводится в твердое состояние с выделением большого количества тепла и повышением давления.

Вместо этого был исследован феномен неустойчивости Реллея и работа расширения газа (рисунок 4а и в), которые легли в основу технологии экстракции полых сфер из расплава металла в работах [14 – 18]. Для исследования схем по методу неустойчивости Реллея требуется разработка высоких башен свободного падения, в которых сфера проходит поочередно зоны уравнивания динамических сил, возникающих в результате действия силы тяжести, работы газа, заключенного внутри и растягивающего еще незатвердевшую оболочку, охлаждение и при необходимости термообработка для улучшения микроструктуры [14, 17]. Полученная таким образом микросфера имеет диаметр, который может отличаться от диаметра форсунки в большую сторону (максимально +2 мм). Данная производственная схема гарантирует высокую соосность сфер и улучшенные механические свойства в результате измельчения микроструктуры. Для повышения производительности путем сокращения расстояния  $L$  при распаде струи прибегают к созданию дополнительных механизмов, которые уменьшают длину волны и тем самым способствуют отделению сферы почти у форсунки. Так, например, применение электромагнитного, акустического или вибрационного поля может значительно уменьшить расстояние  $L$  (рисунок 4б).

Ограничительным фактором внедрения технологии в массовое производство остается сложность контроля процесса. Кроме того, по данной проблеме накоплен небольшой опыт (в открытой литературе), основанный преимущественно на достижениях советских и американских исследователей в 70-х годах прошлого века.



**Рисунок 5 – Исследование макроструктуры [18]**

В последнее время подобного рода исследования проводились японскими учеными и более подробно освещены в работе [18]. Проведенные ими исследования показали, что образование полых микросфер из эвтектического расплава олова возможно по схеме, предложенной в работе [21]. В отличие от исследований [14, 17] отделение полый микросферы происходит непосредственно у форсунки за счет ее сдувания газом после образования. Максимальный диаметр изготовленной сферы составил 4 мм. Как видно из рисунка 5, сферы обладают неравномерной толщиной стенки в диаметральной сечении, что затрудняет ее использование в высоконагруженных конструкциях, т.к. это приводит к неравномерности распределения напряжений по сечениям конструкционной детали. Кроме того, поверхностные дефекты (рисунок 5б) могут стать местом концентрации напряжений в ячеистой структуре и причиной выхода из строя конструкционной детали.

К установленным преимуществам и недостаткам процессов прямой экстракции из рас-

плава относятся следующие:

Преимущества	Недостатки
<ul style="list-style-type: none"> <li>• минимальное число подготовительных операций;</li> <li>• малые производственные затраты.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• трудоемкий сбор и обработка информации в ходе реализации процесса;</li> <li>• требуется высокая степень чистоты эксперимента;</li> <li>• прерывность процесса: хорошо подходит для лабораторных и плохо для промышленных масштабов.</li> </ul>

Рассмотренные методы позволяют получать микросферы с диаметром внутренней полости, равным размеру отдельной ячейки металлической пены (таблица 1). Как видно из приведенных данных, для полых сфер и металлических пен существует общий интервал 0,5 – 10 мм. Предельные значения одной ячейки, которые могут быть достигнуты при изготовлении металлических пен (мин. – 0,3 мм и макс. – 15 мм) пока не могут быть реализованы существующими технологиями производства полых сфер из расплава.

В известных и упомянутых работах отсутствует информация о системах управления при реализации схем подобного процесса как со стороны оборудования, так и в отношении применяемых материалов. Схематическое исполнение установок (преимущественно вертикального типа) приводится, однако не оговариваются отдельные элементы исполнения. Кроме того, если предположить, что при изменении технологии, меняются технологические условия, а значит, и конструктивное исполнение установки, то можно сказать об отсутствии единого подхода при рассмотрении установок для данного процесса.

Таблица 1

**Сравнение размеров отдельных элементов ячеистых структур на основе металлической пены и полых микросфер**

Ячеистые структуры на основе:	Макс. размер одной ячейки, мм	Способ получения
полых микросфер	1,5 – 10	Порошковая металлургия
	0,5 – 0,75	Химические методы
	0,5 – 6	Металлургические методы
металлических пен	0,3 – 5	Порошковая металлургия
	1 – 15	Металлургические методы

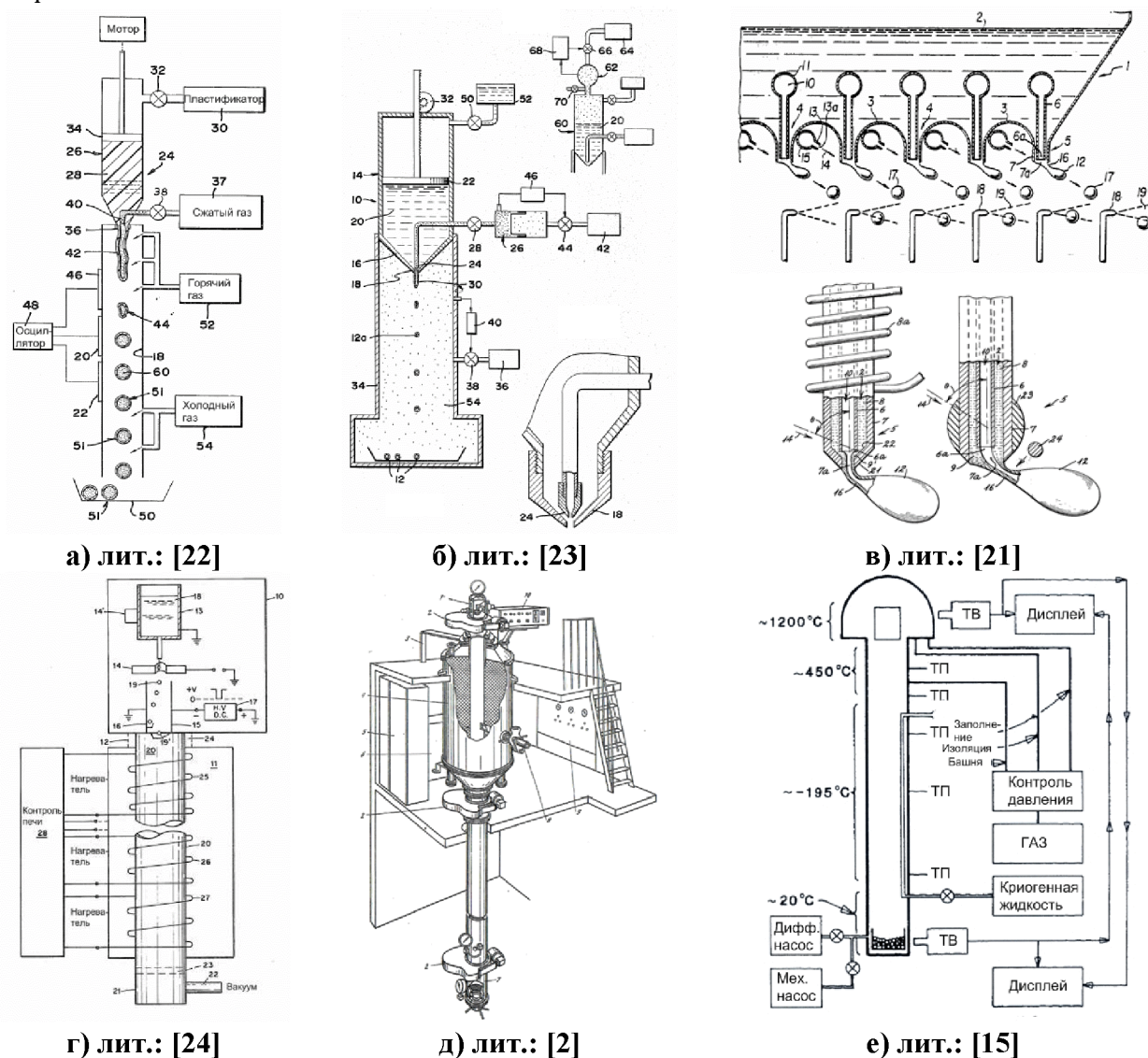
На рисунке 6 приведены различные варианты исполнения установок для разных методов изготовления и различных материалов микросфер. Отсутствие информации о мехатронных системах можно объяснить и тем, что в работах исследуются физические явления, а не ставится целью создание конструкции промышленного оборудования.

При изготовлении методами диспергирования в установках предусматриваются отдельные зоны: зона предварительного нагрева, нагрева, предварительного охлаждения, охлаждения, ускорения распада струи, сбора готовых изделий и т.д. (рисунок 6 а, б, г, д и е). В каждой зоне предусмотрена система подачи газа, нагрева или охлаждения. Сама система сбора и управления процессом приводится схематично. Исполнение форсунок может быть как съемное (рисунок 6 б), так и стационарное (рисунок 6 в).

Съемное исполнение форсунок гарантирует универсальность оборудования и изготовление сфер различного диаметра. Отсутствие информации об использованных сенсорах не дает представления о том, какая управляющая функция могла быть положена в основу управления той или иной установкой.

Приведенный на рисунке 6 небольшой обзор лабораторных и запатентованных установок показывает основные возможные производственные техники, рассмотренные в данной статье. Мехатронные системы, включающие сбор информации, анализ и контроль процесса являются ключевыми при внедрении схем в производственный процесс и неполно освещены в приведенных работах. Создание системы контроля для данного процесса остается трудной

задачей, которая включает в себя выбор измерительной аппаратуры, контроль процесса и онлайн коррекцию, что обусловлено изменяющимися физическими свойствами металла в рассматриваемом температурном интервале. При изменении системы материала система управления оборудованием должна распознавать и автоматически перенастраивать параметры, которые отвечают за качество конечного продукта: геометрию микросферы и микроструктуру материала.



**Рисунок 6 – Оборудование для изготовления полых микросфер**

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного контракта № 16.740.11.0744.

### Литература

1. Pippan R. Handbook of cellular metals. Material Properties., ed. by H. P. Degischer and B. Kriszt, Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, 2002, pp. 179 – 183 (на английском).
2. Басов Н. Лазерные термоядерные мишени и сверхпрочные микробаллоны. т. 220, с. 199.
3. <https://lasers.llnl.gov/programs/nic/icf/> (по состоянию на 26.03.2012)
4. [www.hollomet.com](http://www.hollomet.com) (по состоянию на 26.03.2012)
5. Ashby M.F., Evans A.G., Fleck N.A., Gibson L.J., Hutchinson J.W., Wadley H.N.G., Metal Foams: A design Guide, Butterworth – Heinemann, USA, p. 251 (на английском)
6. Rausch G., Stöbener K., Improving structural crashworthiness using metallic foams, Porous metals and metal forming technology. Proceedings of METFOAM 2005, The Japan University of metals, 2006, Japan, pp. 1 – 4 (на английском)
7. Seeliger H. – W, Aluminium foam sandwich (ASF) ready for market introduction, Advanced

- Engineering Materials, № 6, 2004, pp. 448 – 451 (на английском)
8. <http://www.ifam-dd.fraunhofer.de> (по состоянию на 26.03.2012)
9. Andersen O., Stephani G., Handbook of cellular metals. Solid – state and deposition methods, ed. by H. P. Degischer and B. Kriszt, Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, 2002, pp. 56 – 70 (на английском)
10. Torobin L., Method for making hollow porous microspheres, US Patent № 4671909 (на английском)
11. Ericson R. Syntactic metals: flight weight materials, Advanced materials & Processes, December, 2002, pp. 44 – 47 (на английском)
12. [www.recemat.com/en/index.html](http://www.recemat.com/en/index.html) (по состоянию на 26.03.2012)
13. [www.msm.cam.ac.uk/mmc/people/old/dave/](http://www.msm.cam.ac.uk/mmc/people/old/dave/) (по состоянию на 26.03.2012)
14. Kendall J.M., Lee M.C., Wang T.G. Metal shell technology based upon hollow jet instability, Journal of Vacuum Science and Technology, vol. 20, April, 1982, pp. 1091 – 1093 (на английском)
15. Lee M.C. Metal shell technology. SAMPLE Journal, November/December, 1983, pp. 7 – 11 (на английском)
16. Lee M., Kendall M., Wang T. Investigation of metallic and metallic glass hollow spheres for fusion target application, Materials processing in the reduced gravity environment of space, 1982, pp. 105 – 113 (на английском)
17. Дороготовцев В., Меркульев Ю. Методы изготовления полых микросфер-микробаллонов, Препринт // Физический институт им. Лебедева, 1989, стр. 57
18. Truong V., Takakura H., Wells J., Minemoto T. Production of hollow spheres of eutectic tin-lead solder through a coaxial nozzle, Journal of solid mechanics and materials engineering, Vol. 4, No. 10, 2010 (на английском)
19. Bulina N.V., Gromyko A.I., Bondarenko G.V., Marachevsky A.V., Chekanova L.A., Prokofjev D.E., Churilov G.N. The physics of metals and Metallography, Vol. 102, Suppl. 1, 2006, pp. S94-S95 (на английском)
20. Eitel W., Physikalische Chemie der Silikate. 1941, S. 826 (на немецком)
21. Torobin L.B. Method and apparatus for producing hollow metal microspheres and microspheroids, US Patent № 4415512 (на английском)
22. Frosch R.A. Method and apparatus for producing concentric hollow spheres, US Patent № 4279632 (на английском)
23. Beggs J.M. Method and apparatus for producing gas-filled hollow spheres, US Patent № 4344787 (на английском)
24. Hendricks C.D. Method for producing small hollow spheres, US Patent № 4133854 (на английском)

***Применение осесимметричной жесткопластической безмоментной конечноэлементной модели для определения коэффициентов трения в процессах формоизменения листовых металлов***

к.т.н. доц. Петров В.К., к.т.н. доц. Михайлова В.Л., д.т.н. проф. Сухомлинов Л.Г.  
Университет машиностроения  
8(495)223-05-23, доб. 1318

*Аннотация.* Излагаются результаты расчетно-экспериментальных исследований по применению осесимметричной жесткопластической безмоментной конечноэлементной модели для определения коэффициентов трения в процессах листовой штамповки. Используются данные по формовке исследуемого листового металла сферическим пуансоном. Возможности методики демонстрируются на примерах с различными условиями трения.

*Ключевые слова:* осесимметричная жесткопластическая безмоментная ко-