

Ультразвуковое формообразование изделий из мелкодисперсных порошков

С. И. Пугачев¹, Е. Ю. Рытов²✉

¹ АО «Концерн «МПО-Гидроприбор», Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный морской
технический университет, Санкт-Петербург, Россия

✉ physics_spbmtu@mail.ru

Аннотация. Рассматривается современное состояние физики и техники процесса ультразвукового формообразования (УЗФ) изделий из мелкодисперсных металлических и неметаллических порошков. Обоснована актуальность комплексного рассмотрения процесса, представлены конструктивно-технологические схемы его реализации, приведены типы источников ультразвука – ультразвуковых преобразователей и ультразвуковых генераторов, а также конструкции и методы расчета концентраторов (трансформаторов) ультразвуковых колебаний. Анализируются результаты экспериментальных исследований процесса УЗФ применительно к мелкодисперсным порошкам различной физико-химической природы. Приводятся и обсуждаются физические модели процесса УЗФ.

Ключевые слова: ультразвук, формообразование порошков, ультразвуковой генератор, магнитоstrictionный преобразователь, пьезокерамический преобразователь, концентратор колебаний.

Для цитирования: Пугачев С. И., Рытов Е. Ю. Ультразвуковое формообразование изделий из мелкодисперсных порошков // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 2. С. 24–46. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-2-24-46.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Ultrasonic Molding of Products from Finely Dispersed Powders

S. I. Pugachev¹, E. Yu. Rytov²✉

¹JSC «Concern «Sea Underwater Weapons – Gidropribor», Saint Petersburg, Russia

² St. Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

✉ physics_spbmtu@mail.ru

Abstract. The article deals with the current state of the physics and technology of the process of ultrasonic molding (USM) of products from finely dispersed metal and non-metal powders. The relevance of a comprehensive consideration of the process is substantiated, structural and technological schemes for its implementation are presented, types of ultrasound sources – ultrasonic transducers and ultrasonic generators, as well as designs and methods for calculating concentrators (transformers) of ultrasonic vibrations are given. The results of experimental studies of the USM process as applied to fine powders of various physical and chemical nature are analyzed. Physical models of the USM process are presented and discussed.

Keywords: ultrasound, powder molding, ultrasonic generator, magnetostriction transducer, piezoceramic transducer, oscillation concentrator.

For citation: Pugachev S. I., Rytov E. Yu. Ultrasonic Molding of Products from Finely Dispersed Powders // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2024. Vol. 17, no. 2. P. 24–46. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-2-24-46.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Для изготовления изделий различных классов в промышленности широко используются мелкодисперсные порошки с размерами частиц 1...10 мкм. В большинстве случаев технология изготовления таких изделий основана на многооперационном процессе порошковой металлургии, в котором важная роль отводится операции формообразования. На этой операции в большой степени закладываются эксплуатационные характеристики изделий, а также изменение этих характеристик во времени (старение). По современным представлениям, формообразование – сложный многофакторный процесс, физико-химическая природа которого требует для своего изучения комплекса экспериментальной техники и сложного математического моделирования. Постоянное усиление требований, предъявляемых к изделиям, обусловленное в первую очередь обеспечением стойкости к дестабилизирующим воздействиям, вынуждает исследователей и инженеров к разработке новых высокоэффективных технологий формообразования изделий из порошков.

Актуальность разработки ультразвукового формообразования (УЗФ). В промышленности реализуются различные способы формообразования изделий из порошков. Выбор способа зависит от физико-механических свойств формуемого материала, требований, предъявляемых к характеристикам готовых изделий, от геометрической формы и размеров изделий. Условно способы разделяют на статические [1], [2] и динамические [3], [4]. К статическим способам относят статическое прессование в закрытых пресс-формах, изостатическое прессование, шликерное литье, горячее прессование. В производстве длинномерных изделий используют прокатку порошка и мундштучное формообразование. К динамическим способам относят импульсное и вибрационное формообразование.

Статическое прессование порошков осуществляют с применением гидравлического или другого типа пресса. Самая простая схема процесса представляет собой одноосное прессование. Порошок помещается в матрицу пресс-формы, а его формообразование (уплотнение) происходит под действием верхнего или верхнего и нижнего пуансонов пресса, передающих порошку статическое давление, развиваемое прессом. Процесс характеризуется высокой производительностью, простотой применяемого оборудования, высокой точностью размеров получаемых заготовок, хорошей чистотой их поверхности. К основным недостаткам

процесса относят сложность достижения равномерной плотности заготовок сложной конфигурации, что связано в основном с потерями статического давления на преодоление внешнего трения между порошком и стенками пресс-формы.

Изостатическое формообразование порошка производят в эластичной или деформируемой оболочке под действием всестороннего сжатия со стороны жидкости (гидростатическое прессование) или газа (газостатическое прессование). Процесс осуществляют в камерах высокого давления (гидростатах или газостатах). К изостатическому прессованию относят формообразование в толстостенных оболочках или квазиизостатическое прессование. В этом случае средой, оказывающей всестороннее давление на уплотняемый материал, служит сама оболочка, помещаемая в матрицу пресс-формы, а процесс формообразования осуществляют на таком же оборудовании, как и при статическом прессовании.

Благодаря всестороннему сжатию исключается влияние внешнего трения на процесс формообразования и достигается сравнительно равномерное распределение плотности заготовки. К недостаткам процесса относят большую длительность рабочего цикла, низкую производительность, сложность оборудования, расходы на проектирование и изготовление оболочек.

Шликерное литье – процесс заполнения шликером пористой формы, обеспечивающей удаление из шликера жидкости. Шликером служит суспензия порошка, включающая твердую фазу (частицы порошка), жидкую фазу (связующее вещество) и добавки, улучшающие свойства шликера (текучесть, устойчивость и ряд других). Способ позволяет получать заготовки с равномерной по объему плотностью, поэтому его используют для изготовления изделий сложной формы. Основные недостатки способа – большая длительность процесса, наличие сушильного оборудования.

Горячее прессование совмещает формообразование и спекание, в нем нет необходимости использовать пластифицирующую связку. В производстве изделий сложной формы применяют горячее изостатическое прессование. Способ позволяет создавать изделия высокой плотности, однако он весьма затратен.

При импульсном формообразовании порошок уплотняют ударными волнами в течение времени ≤ 1 с. Ударные волны формируют высокие давления и увеличивают скорость деформирования порошка. Это позволяет получать заготовки высо-

кой плотности даже из высокопрочных малопластичных материалов. В зависимости от вида энергии, преобразуемой в энергию ударных волн, выделяют взрывное, магнитно-импульсное и пневмомеханическое формообразование. Основным недостатком импульсных способов служит эмпирический подход к проектированию технологических схем формообразования.

Вибрационные способы формообразования основаны на использовании механических колебаний инструмента прессования и передачи колебаний порошку. Колебательные движения инструмента и частиц порошка снижают внешнее трение между порошком и инструментом. Уменьшаются и силы внутреннего трения между частицами порошка. Разрушаются арочные образования и исчезают крупные полости, образовавшиеся при засыпке порошка в пресс-форму. В результате необходимая и равномерно распределенная по объему заготовки плотность порошка достигается при пониженных статических давлениях и меньшем содержании пластифицирующей связки.

Вибрационное формообразование применяют в производстве изделий из малопластичных материалов, в том числе изделий сложной формы. Его способы различаются схемой приложения давления прессования и возбуждения колебаний. В зависимости от частоты колебаний способы разделяют на вибрационные низкочастотные (с частотой до 15 кГц) и ультразвуковые (выше 15 кГц).

Низкочастотное формообразование осуществляется на специализированных вибропрессах, вибрационных столах и виброударных установках. Используемое в этих случаях оборудование более сложное, чем для статического прессования. Кроме того, к деталям, составляющим вибрационную установку и работающим в динамическом режиме, предъявляются более высокие требования к их

прочности. В ряде случаев необходимо использование виброизолирующих устройств.

Ультразвуковое формообразование (УЗФ) основано на уплотнении порошка одновременным воздействием на него статического давления прессования и ультразвуковых колебаний (УЗК), сообщаемых уплотняемому материалу через элементы пресс-формы. Приведенные преимущества вибрационных способов характерны и для УЗФ. Однако при УЗФ используют прессовое оборудование, предназначенное и для статического прессования. Таким образом, УЗФ совмещает преимущества статического и вибрационного прессования, поэтому при создании ряда изделий сложной формы служит альтернативой дорогостоящим способам формообразования.

Конструктивно-технологические схемы УЗФ.

В состав установки для УЗФ входят (рис. 1): пресс, ультразвуковой генератор УЗГ и колебательная система КС, предназначенная для возбуждения УЗК в пресс-форме и порошке. В состав КС входят: источник – ультразвуковой преобразователь УЗК, пресс-форма, а также элементы, предназначенные для трансформации колебаний от преобразователя к пресс-форме.

В зависимости от типа КС в элементах пресс-формы возбуждаются продольные (осевые), поперечные (радиальные), крутильные колебания или одновременно колебания различных типов. Кроме того, колебания сообщаются либо матрице, либо пуансону (пуансонам), либо и матрице, и пуансону. Продольные колебания совершаются вдоль направления давления прессования. Направление поперечных колебаний перпендикулярно направлению давления. Крутильные колебания совершаются в плоскости, перпендикулярной направлению давления, вокруг продольной оси пресс-формы.

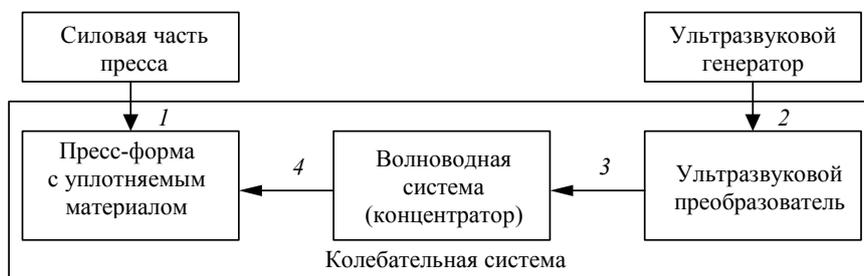


Рис. 1. Блок схема установки для УЗФ: 1 – передача статического давления прессования; 2 – передача электромагнитных колебаний ультразвуковой частоты; 3 – передача УЗК; 4 – передача преобразованных (трансформированных) УЗК
Fig. 1. Block diagram of the device for USM: 1 – transmission of static pressing pressure; 2 – transmission of electromagnetic oscillations of ultrasonic frequency; 3 – ultrasonic transmission; 4 – transmission of converted (transformed) ultrasonic vibrations

Эффективность воздействия УЗК в процессе формообразования зависит от согласования между отдельными элементами КС. Наибольший эффект достигается, если КС возбуждается на резонансной частоте, поэтому размеры всех элементов КС определяют таким образом, чтобы их резонансные частоты совпадали [5]. В публикациях [6]–[8] представлены основы теории и инженерные расчеты КС с возбуждением колебаний одного типа. Такие системы получили широкое распространение в ультразвуковых технологических установках различного назначения, в том числе и для УЗФ.

В качестве примера на рис. 2 представлены схемы УЗФ со стержневой КС продольного типа. УЗК возбуждаются магнитострикционным преобразователем и через конический концентратор передаются либо матрице пресс-формы (рис. 2, а), либо верхнему пуансону (рис. 2, б). Подобные КС использовались для УЗФ-изделий из порошков на основе карбида вольфрама [9], оксидно-цинковых и пьезокерамических порошков [10], [11] и ряда других.

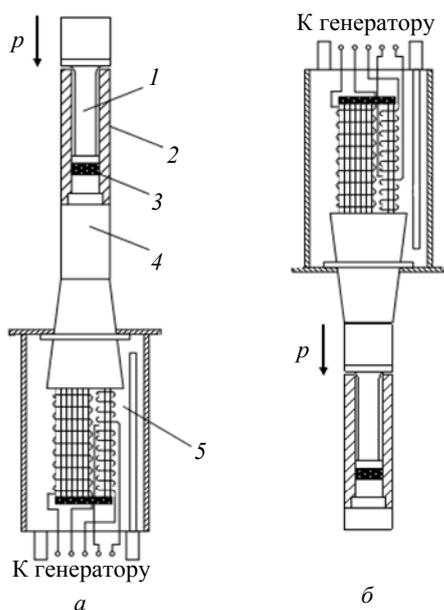


Рис. 2. Конструктивно-технологическая схема УЗФ с продольной колебательной системой:

- 1 – верхний пуансон; 2 – матрица; 3 – уплотняемый порошок; 4 – концентратор; 5 – магнитострикционный преобразователь;
 p – статическое давление прессования
 Fig. 2. Structural and technological scheme of USM with a longitudinal oscillatory system
 1 – upper punch; 2 – matrix; 3 – compacted powder; 4 – concentrator; 5 – magnetostriction transducer;
 p – static pressing pressure

В колебательных системах радиального типа для возбуждения УЗК используют стержневые преобразователи, присоединяемые к внешней цилиндрической поверхности элемента пресс-формы вдоль его радиального направления. Так, для УЗФ-порошков из вольфрама и магнитомягкого композита к матрице пресс-формы подключали 6 пьезокерамических преобразователей типа Ланжевена, расположенных в одной плоскости, перпендикулярной продольной оси матрицы (рис. 3) [12], [13]. В установке [14] соединение стержневого магнитострикционного преобразователя с матрицей выполнялось через концентратор колебаний (рис. 4).

В КС, предназначенных для возбуждения крутильных колебаний, наиболее часто используют четное количество стержневых преобразователей продольных колебаний [8]. Для создания крутящего момента преобразователи подключают к инструменту по касательной к его поверхности. Например, в способе формообразования, предложенном в [15], центральная часть внешней поверхности матрицы охвачена хомутом (рис. 5). С двух диаметрально противоположных сторон к хомуту подключены концентраторы, соединенные с магнитострикционными преобразователями. Продольные колебания, возбуждаемые преобразователями и передаваемые через концентраторы к хомуту, вызывают в нем колебательные перемещения вокруг продольной оси матрицы. Колебательные перемещения хомута в указанном направлении и приводят к возникновению крутильных колебаний в матрице.

Эффективность процесса УЗФ повышают использованием КС комбинированного типа. Так, в [16]–[18] предложено возбуждать колебания с разными частотами, а также в различных направлениях, создавая в уплотняемом материале трехмерное акустическое поле.

Для УЗФ цилиндрических заготовок была разработана продольно-поперечная КС [19]. Продольные колебания в матрице возбуждаются от волновода, соединенного со стержневым магнитострикционным преобразователем (рис. 6). Поперечные колебания сообщают матрице от кольцевого магнитострикционного преобразователя. Подводимые к матрице УЗК имеют одинаковые частоты и фазы, но амплитуда поперечных колебаний составляет 0.2...0.35 от амплитуды продольных колебаний. В результате формируется результирующее колебание, отклоненное от продольной оси матрицы на угол от 10 до 20°.

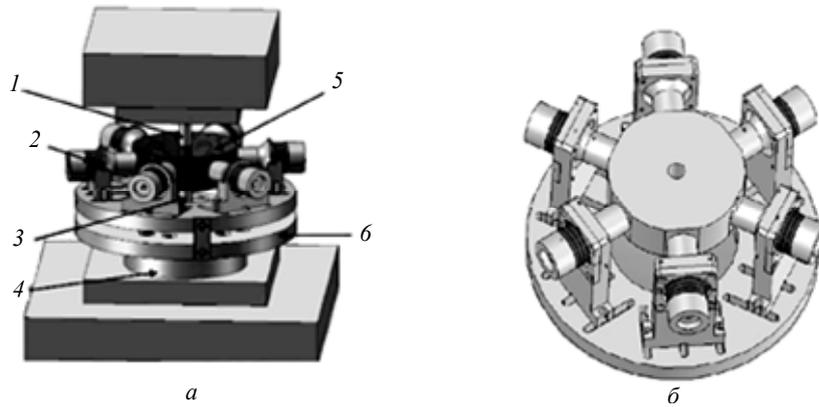


Рис. 3. Схема радиальной колебательной системы для ультразвукового формообразования [13]: а – устройство для формообразования; б – собранная ультразвуковая пресс-форма с опорным креплением; 1 – верхний пуансон; 2 – пьезокерамический преобразователь; 3 – нижний пуансон; 4 – нагрузочный элемент; 5 – матрица; 6 – крепление

Fig. 3. Scheme of a radial oscillatory system for ultrasonic molding [13]: а – device for molding; б – assembled ultrasonic compaction mold system with supporting fixture; 1 – upper punch; 2 – piezoceramic transducer; 3 – lower punch; 4 – load cell; 5 – matrix; 6 – fixture

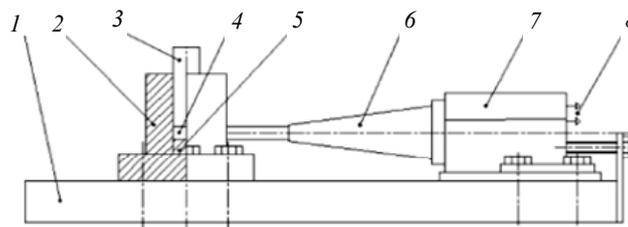


Рис. 4. Конструктивно-технологическая схема УЗФ с радиальными колебаниями [14]: 1 – плита для крепления; 2 – матрица; 3 – верхний пуансон; 4 – уплотняемый порошок; 5 – нижний пуансон; 6 – ультразвуковой концентратор; 7 – магнитострикционный преобразователь; 8 – подсоединение ультразвукового генератора

Fig. 4. Structural and technological scheme of USM with radial vibrations [14]: 1 – plate for fastening; 2 – matrix; 3 – upper punch; 4 – compacted powder; 5 – lower punch; 6 – ultrasonic concentrator; 7 – magnetostriction transducer; 8 – connection of the ultrasonic generator

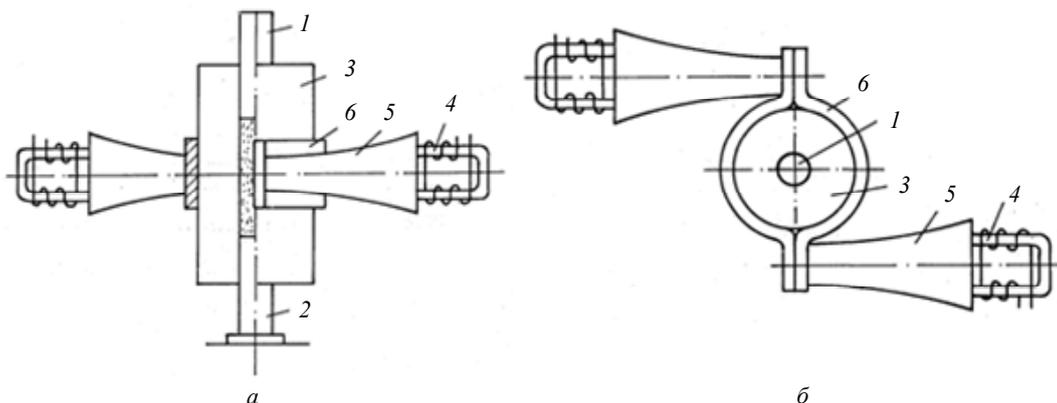


Рис. 5. Устройство для УЗФ-изделий из порошков [15]: а – общий вид; б – вид сверху; 1 – верхний пуансон; 2 – нижний пуансон; 3 – матрица; 4 – магнитострикционные преобразователи; 5 – концентраторы продольных колебаний; 6 – хомут

Fig. 5. Device for USM of products from powders [15]: а – general view; б – top view; 1 – upper punch; 2 – lower punch; 3 – matrix; 4 – magnetostriction transducers; 5 – concentrators of longitudinal vibrations; 6 – clamp

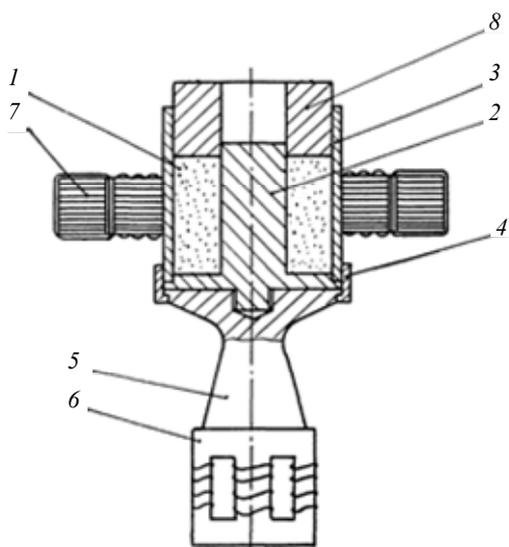


Рис. 6. Устройство УЗФ изделий из порошка [19]:
 1 – порошок; 2 – центральный стержень матрицы;
 3 – наружный цилиндрический корпус матрицы;
 4 – кольцо; 5 – излучатель УЗК; 6 – стержневой
 магнитострикционный преобразователь;
 7 – кольцевой (радиальный) магнитострикционный
 преобразователь; 8 – верхний пуансон

Fig. 6. Device for USM of products from powder [19]:
 1 – powder; 2 – central rod of the matrix; 3 – outer
 cylindrical body of the matrix; 4 – ring; 5 – ultrasonic
 vibrator; 6 – rod magnetostriction transducer; 7 – ring
 (radial) magnetostriction transducer; 8 – upper punch

В [20], [21] предложена колебательная система с возбуждением в матрице крутильно-радиальных колебаний. Магнитострикционные преобразователи подключают к матрице в плоскости, перпендикулярной направлению статического давления прессования, что обеспечивает возбуждение в матрице радиальных УЗК. При этом матрица данной системы включает в себя 4 концентратора, которые имеют форму логарифмической

спирали (рис. 7). Внутренняя и наружная спиральные поверхности концентраторов имеют разные длины. Благодаря этому в матрице одновременно присутствуют крутильные и радиальные колебания.

Ультразвуковые преобразователи. Источниками УЗК служат в основном магнитострикционные и пьезокерамические преобразователи [22], [23].

Магнитострикционный преобразователь для ультразвуковых технологических установок кроме активного элемента (самого преобразователя колебаний) содержит и пассивный – излучающую диафрагму или концентратор колебаний. Преобразователи с диафрагмами используются для ультразвукового воздействия на процессы, протекающие в жидких средах (например, в ультразвуковых ваннах), а преобразователи с концентраторами – в инструменте для механической обработки, включая и процессы формообразования различных материалов. В табл. 1 представлен модельный ряд преобразователей отечественного производства.

В качестве примера рассмотрим магнитострикционный преобразователь ПМС-1,0/22. К основным элементам преобразователя относятся: активный элемент, концентратор (согласующий волновод), датчик акустической обратной связи, система охлаждения активного элемента, состоящая из стального стакана с двумя штуцерами для входа и выхода воды. Активный элемент имеет вид замкнутого магнитопровода из О-образных пластин железокобальтового сплава (пермендюра). На магнитопровод намотана обмотка возбуждения, подключаемая к УЗГ. Концентратор представляет собой стальной стержень, состоящий из двух цилиндрических участков. Торец концентратора большего диаметра соединен с активным элемен-

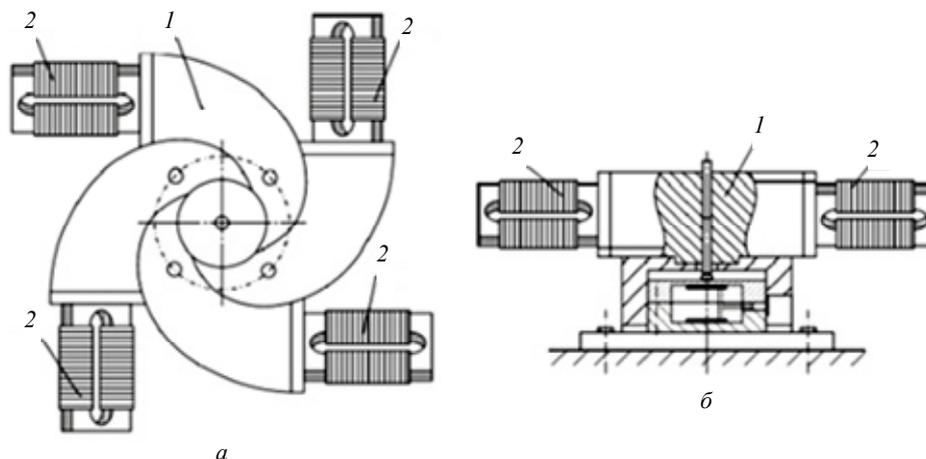


Рис. 7. Схема колебательной системы с крутильно-радиальными УЗК [20]: а – вид сверху;
 б – вид сбоку; 1 – матрица-концентратор, 2 – ультразвуковые преобразователи

Fig. 7. Scheme of an oscillatory system with torsion-radial USV [20]: а – top view; б – side view;
 1 – matrix-concentrator, 2 – ultrasonic transducers

Табл. 1. Стержневые магнитострикционные преобразователи производственного назначения
Tab. 1. Rod magnetostriction transducers for industrial use

Наименование, модель	Потребляемая мощность, кВт	Амплитуда колебаний, мкм	Рабочая частота, кГц
ПМС-0,1/44	0.40	10	44
ПМС-0,63/22	0.63	20	22
ПМС-1,0/22 (с цилиндрическим волноводом)	1.0	25	22
ПМС-1,0/22 (с коническим волноводом)	1.0	15	22
ПМС-1,0/22 (с коническим волноводом)	1.0	15	22
ПМС-2,0/22	2.0	15	22
ПМС-4,0/22	4.0	25	22
ПМС-5,0/22	5.0	30	10

том, а торец меньшего диаметра имеет резьбовое отверстие для соединения его с выходным волноводом или другим инструментом.

От генератора на обмотку подаются два напряжения: постоянное и переменное. Под воздействием постоянного напряжения в обмотке протекает постоянный ток подмагничивания. Постоянный и переменный магнитные потоки, вызванные токами в обмотке, приводят к возбуждению механических продольных колебаний магнитопровода, передаваемых согласующему волноводу. Через него колебания передаются рабочему инструменту.

Отметим, что к недостаткам магнитострикционных преобразователей относится необходимость использования системы охлаждения, невысокий КПД, ограниченность по частоте излучения (не превышает 100 кГц).

Пьезокерамические преобразователи используются для возбуждения УЗК как на низких, так и на высоких частотах, превышающих 100 кГц. Активными элементами преобразователей служат пьезокерамические элементы, изготовленные из пьезокерамики системы цирконата-титана-свинца (ЦТС). Отечественными производителями пьезокерамических элементов являются АО «НИИ „Элла“» в Зеленограде и ООО «Аврора-ЭЛМА» в Волгограде.

Ультразвуковые колебательные системы рассчитывают таким образом, чтобы пьезокерамические преобразователи, входящие в систему, работали на частоте основного резонанса. Так, в публикациях [12], [13] по УЗФ порошков использовались пьезокерамические преобразователи Ланжевена. Излучающую накладку изготавливают из дюралюминия или титановых сплавов. Материалом отражающей накладки служит сталь.

Концентраторы колебаний. Для УЗФ в основном применяют стержневые концентраторы продольных колебаний. Такой концентратор представляет собой стержень переменного сече-

ния, торец которого с большей площадью соединяют с ультразвуковым преобразователем. Концентраторы различаются геометрической формой как продольного, так и поперечного сечений (рис. 8 и 9). В зависимости от закона изменения площади поперечного сечения стержня вдоль его продольной оси выделяют ступенчатые, конические, экспоненциальные, катеноидальные, ампульные и концентраторы составного (комбинированного) типа. Исходя из формы поперечного сечения, концентраторы разделяют на сплошные круглого, прямоугольного или многоугольного сечения, а также на концентраторы ножевого и трепанобразного типов [8], [24].

Основной характеристикой концентраторов служит коэффициент усиления по амплитуде k , равный отношению амплитуды колебательного смещения на выходе концентратора (на узком торце) к амплитуде на входе (на широком торце). Коэффициент усиления зависит от геометрической формы концентратора и его размеров. Среди концентраторов простой формы (не относящиеся к комбинированному типу) наибольшим коэффициентом усиления обладают ступенчатые концентраторы. Но в рабочем режиме в них возникают высокие механические напряжения. Конические, экспоненциальные и катеноидальные концентраторы отличаются большей надежностью в эксплуатации и выдерживают значительные механические напряжения в течение длительного времени.

Задачи о расчетах концентраторов простой формы (рис. 8) имеют аналитические решения. В табл. 2 и 3 приведены основные расчетные формулы, где приняты следующие обозначения: $N = D_1/D_2$ – отношение диаметров входного и выходного торцов концентратора; D_3 – максимальный диаметр ампульной части; f_0 – частота колебаний; $\omega = 2\pi f_0$ – циклическая частота; c – скорость распространения волны в материале

концентратора; $\lambda = c/f_0$ – длина волны; z_H – импеданс нагрузки; r_H и x_H – приведенные значения активной и реактивной составляющих импеданса нагрузки соответственно; k и k_{Π} – волновые числа для волн, распространяющихся в стержнях постоянного и переменного сечений соответственно. Резонансная длина концентратора при $z \neq 0$ представляет собой корень уравнения

$$A \operatorname{tg}^2(k_{\Pi} l_p) + B \operatorname{tg}(k_{\Pi} l_p) + C = 0,$$

где A , B и C – функции, представленные в табл. 3.

Проектированию оптимального профиля концентратора, а также расчетам более сложных

концентраторов с отверстиями и составного типа посвящен целый ряд публикаций, например [25]–[28]. Для расчетов используют метод конечных элементов и другие численные методы. Например, для УЗФ в [29] проведено трехмерное проектирование нижнего пуансона, выполняющего также роль концентратора колебаний. Для расчетов методом конечных элементов трехступенчатый концентратор разбили на малые элементы в форме тетраэдра (рис. 10). Предполагалось, что концентратор однороден, а материалом для него был выбран алюминий с известными значениями плотности, модуля Юнга и коэффициента Пуассона. В процессе моделирования определены раз-

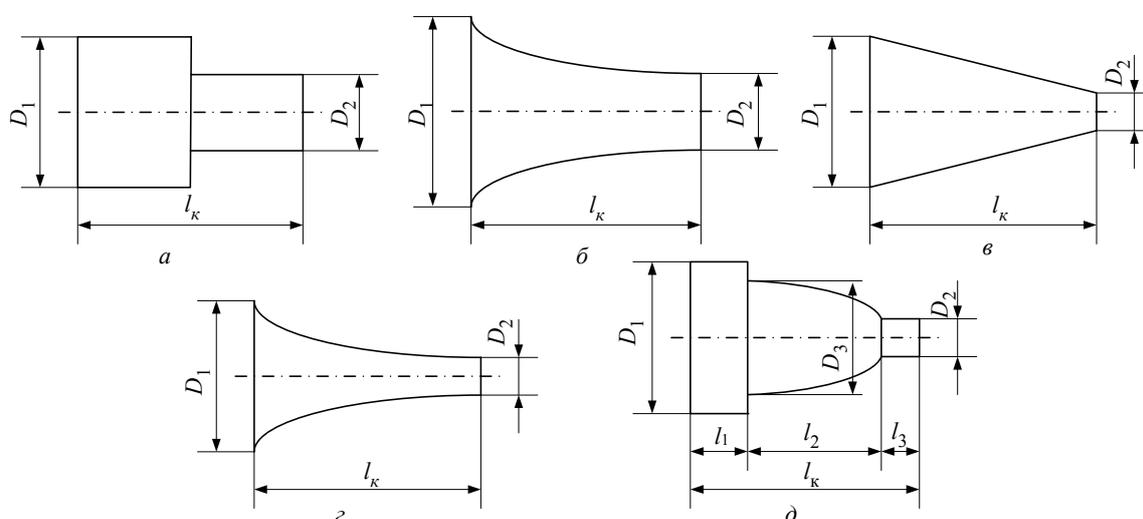


Рис. 8. Основные типы стержневых ультразвуковых концентраторов: а – ступенчатый; б – экспоненциальный; в – конусный; з – катеноидальный; д – ампульно-цилиндрический; D_1 и D_2 – диаметры входного и выходного торцов концентратора соответственно, l_k – длина концентратора

Fig. 8. Main types of rod ultrasonic concentrators: а – stepped; б – exponential; в – conical; з – catenoidal; д – ampoule-cylindrical; D_1 and D_2 – diameters of the inlet and outlet ends of the concentrator, respectively, l_k – length of the concentrator



Рис. 9. Внешний вид концентраторов для ультразвукового оборудования различного назначения: а – экспоненциальный концентратор; б – прямоугольный ступенчатый концентратор; в – многоугольный конусный концентратор; з – круглый ступенчатый концентратор; д – прямоугольный конусный концентратор с отверстиями; е – концентратор ножевого типа

Fig. 9. Appearance of concentrators for ultrasonic equipment for various purposes: а – exponential concentrator; б – rectangular stepped concentrator; в – polygonal cone concentrator; з – round stepped concentrator; д – rectangular conical concentrator with holes; е – knife-type concentrator

Табл. 2. Расчетные формулы стержневых концентраторов [24], [30]
Tabl. 2. Calculation formulas for rod concentrators [24], [30]

Тип концентратора	Закон изменения диаметра концентратора по его длине	Теоретический (расчетный) коэффициент усиления	Резонансная длина l_p концентратора при $z_n = 0$
Конусный (конический)	$D_x = D_1(1 - \alpha x),$ $\alpha = \frac{D_1 - D_2}{D_1 l_p}$	$k = \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi l_p}{\lambda}\right)^2},$ $k < N$	$l_p = (\lambda/2)(\vartheta/\pi),$ где ϑ – наименьший положительный корень уравнения $\operatorname{tg} \vartheta = \frac{\vartheta}{\frac{\vartheta^2 N}{(1-N)^2} + 1}$
Экспоненциальный	$D_x = D_1 \exp(-\beta x),$ $\beta = \frac{\omega}{c} \frac{\ln N}{\sqrt{\pi^2 + (\ln N)^2}}; \quad N = \frac{D_1}{D_2}$	$k = D_1/D_2 = N$	$l_p = \frac{c}{2f_0} \sqrt{1 + \left(\frac{\ln N}{\pi}\right)^2}$
Катеноидальный	$D_x = D_2 \operatorname{ch} v(l_p - x),$ $v = \frac{1}{l_p} \operatorname{arch} N$	$k = \frac{N}{\cos(k'l_k)}, \quad k > N;$ $k' = \sqrt{(2\pi f_0/c)^2 - v^2}$	$l_p = \frac{\lambda}{2} \sqrt{\frac{\vartheta^2 + (\operatorname{arch} N)^2}{\pi^2}},$ где ϑ – наименьший положительный корень уравнения $\vartheta + \operatorname{tg} \vartheta = -\sqrt{1 - 1/N^2} \operatorname{arch} N$
Ступенчатый	$D_x = D_1 \text{ при } 0 \leq x \leq l_p/2,$ $D_x = D_2 \text{ при } l_p/2 \leq x \leq l_p$	$k = (D_1/D_2)^2 = N^2$	$l_p = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f_0}$
Ампульно-цилиндрический	$D_x = D_1, \text{ при } 0 \leq x \leq l_1;$ $D_x = D_3 \exp\left[-\frac{1}{4}\left(\frac{\omega}{c}x\right)^2\right]$ при $l_1 \leq x \leq l_1 + l_2;$ $D_x = D_2 \text{ при } l_1 + l_2 \leq x \leq l_p$	$k = \left(\frac{D_1}{D_3}\right)^2 \sqrt{1 + 4 \ln \frac{D_3}{D_2}}$	$l_1 = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4f_0};$ $l_2 = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\ln \frac{D_3}{D_2}};$ $l_3 = \frac{\lambda}{2\pi} \operatorname{arccctg} \left(\frac{\omega}{c} l_2\right)$

меры концентратора так, чтобы его собственная частота продольных колебаний составляла 20 кГц.

Ультразвуковые генераторы. Ультразвуковые генераторы преобразуют энергию электрических колебаний промышленной частоты в энергию электрических колебаний ультразвуковой частоты. Они предназначены для питания электроакустических преобразователей магнитострикционного или пьезоэлектрического типа. Генераторы для магнитострикционных преобразователей содержат дополнительный блок для источника тока подмагничивания.

По своим техническим возможностям УЗГ могут быть универсальными или специализированными. Универсальные рассчитаны на работу с различными технологическими устройствами и имеют широкий диапазон выходных параметров (мощности, частоты) и условий согласования с преобразователем. Специализированные генераторы рассчитаны на питание одного или нескольких определенных преобразователей и имеют узкий диапазон выходных параметров.

Ультразвуковые генераторы характеризуются электрическими и неэлектрическими параметрами. К основным электрическим параметрам относятся рабочая частота (или диапазон частот), выходная мощность, КПД генератора и выходное напряжение. Под выходной мощностью генератора понимают электрическую мощность, подводимую к нагрузке. КПД генератора равен отношению выходной мощности ко всей потребляемой мощности.

Дополнительными электрическими параметрами УЗГ являются стабильность частоты и выходного напряжения, уровень промышленных сетевых и радиопомех, точность, быстродействие, диапазон работы системы авторегулирования и другие в зависимости от типа генератора и его режимов работы. К неэлектрическим параметрам относятся конструктивные – габариты, вес, коэффициент унификации, параметры систем охлаждения, теплостойкость, степень защиты от попадания в конструкцию различных предметов и влаги, а также эксплуатационные (надежность и уровень автоматизации) и экономические (стоимость генератора, потребляемая им энергия, расход воды) [31].

Табл. 3. Расчетные формулы стержневых концентраторов (продолжение) [24], [30]
 Tab. 3. Calculation formulas for rod concentrators (continued) [24], [30]

Тип концентратора	Координата узла смещения	Координата пучности напряжения	Резонансная длина l'_p при $z_H \neq 0$
Конусный (конический)	$x_0 = \frac{l_p}{2} \operatorname{arctg} \frac{\vartheta}{\alpha l_p}$	x_m – решение уравнения $\frac{\pi}{l_p} \left(1 - \frac{N-1}{N l_p} x \right) + \frac{N-1}{N l_p} \operatorname{tg} \frac{\pi}{l_p} x = 0$	$A = \frac{2(N-1)^2}{(kl_p)^2 N} x_H - \frac{N-1}{kl_p N} r_H^2 - \frac{N-1}{kl_p N} x_H^2 +$ $+ x_H - \frac{N-1}{kl_p} - \frac{(N-1)^3}{(kl_p)^3 N}; B = r_H^2 + x_H^2 -$ $- \frac{2(N-1)}{kl_p N} x_H - 1 - \frac{2(N-1)}{kl_p} x_H -$ $- \frac{2(N-1)^2}{(kl_p)^2 N} + \frac{(N-1)^2}{(kl_p)^2}; C = -x_H + \frac{N-1}{kl_p} - \frac{N-1}{kl_p N}$
Экспоненциальный	$x_0 = \frac{l_p}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{\ln N}{\pi}$	$x_m = \frac{l_p}{\pi} \operatorname{arctg} \left(-\frac{\ln N}{\pi} \right)$	$A = \frac{2(\ln N)^2}{(k_n l_p)^2} x_H - \frac{(\ln N)^3}{k_n^2 k l_p^3} - \frac{k \ln N}{k_n^2 l_p} x_H^2 +$ $+ x_H - \frac{k \ln N}{k_n^2 l_p} r_H^2 - \frac{\ln N}{kl_p}; B = \frac{k}{k_n} x_H^2 + \frac{k}{k_n} r_H^2 -$ $- \frac{k_n}{k_n} - \frac{(\ln N)^2}{k_n k l_p^2}; C = -x_H; k_n = \frac{1}{l_p} \sqrt{(kl_p)^2 - (\ln N)^2}$
Катеноидальный	$x_0 = \frac{1}{k'} \times$ $\times \operatorname{arctg} \left(\frac{k'}{v} \operatorname{cthv} l_p \right)$	–	$A = - \left[\frac{k \operatorname{arch} N}{k_n^2 l_p} \operatorname{th}(\operatorname{arch} N) \right] (r_H^2 + x_H^2) + x_H; B = \frac{k}{k_n} \times$ $\times (r_H^2 + x_H^2) - \frac{k_n}{k} + \frac{2 \operatorname{arch} N}{k_n l_p} \operatorname{th}(\operatorname{arch} N) x_H; C = -x_H -$ $- \frac{\operatorname{arch} N}{kl_p} \operatorname{th}(\operatorname{arch} N); k_n = \frac{1}{l_p} \sqrt{(kl_p)^2 - (\operatorname{arch} N)^2}$
Ступенчатый	$x_0 = \frac{l_p}{2} = \frac{c}{4f_0}$	$x_m = \frac{l_p}{2} = \frac{c}{4f_0}$	$r_H = 0;$ $l'_p = \frac{2}{k} \operatorname{arctg} \left(\frac{N+1 + \sqrt{(N+1)^2 + 4N x_H^2}}{2N x_H} \right)$
Ампульно-цилиндрический	$x_0 = l_1$	На участке l_2 механические напряжения максимальны и постоянны	–

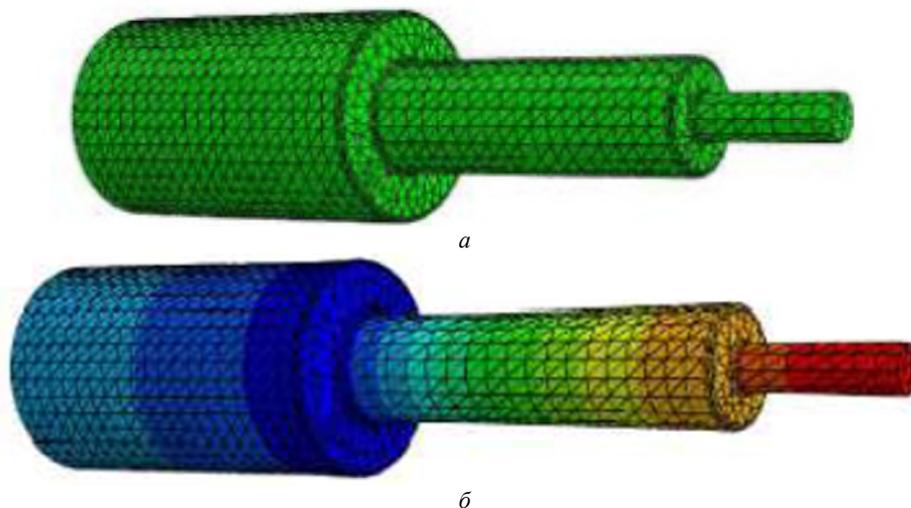


Рис. 10. Модель трехступенчатого концентратора [29]:

a – недеформированное состояние, b – деформированное состояние

Fig. 10. Model of a three-stage concentrator [29]: a – undeformed state, b – deformed state

Современные УЗГ производят на основе полупроводниковых элементов – транзисторов или тиристоров. Принципиально они могут быть выполнены по схеме либо с независимым возбуждением, либо с самовозбуждением (автогенераторной). Генератор с независимым возбуждением состоит из задающего генератора, определяющего диапазон генерируемых частот и их стабильность, и каскадов усиления колебаний. Диапазон частот зависит от основных параметров колебательного контура задающего генератора. Схема контура, число каскадов усиления и принципиальная электрическая схема генератора выбирается с учетом характеристик генератора: назначения, габаритных размеров, массы, КПД, общей стоимости, наличия серийного выпуска комплектующих изделий и т. п. В основу расчета генератора берется мощность, которая должна выделяться на нагрузке. Для поддержания резонансного режима работы колебательной системы генераторы с независимым возбуждением снабжают устройствами автоматической подстройки частоты и автоматической подстройкой или стабилизацией амплитуды.

Генератор с самовозбуждением отличается от рассмотренного наличием положительной обратной связи, охватывающей весь тракт выходного усилителя генератора и колебательной системы. Благодаря обратной связи в ультразвуковой установке возникают автоколебания на резонансной частоте колебательной системы, что позволяет ей работать с максимальным КПД. В сравнении с генераторами с независимым возбуждением генераторы с самовозбуждением могут иметь более простую конструк-

тивную схему, так как не содержат устройств автоматической подстройки. В то же время последние генераторы имеют существенные недостатки. Во-первых, при смене колебательной системы такой генератор необходимо перенастраивать. Во-вторых, существуют трудности в регулировании выходных параметров генератора [31].

Отечественные производители УЗГ в настоящее время – это ООО «Ультразвуковая техника – ИНЛАБ» (Санкт-Петербург); ООО «Ультразвуковые технологии и оборудование» (Санкт-Петербург) и ООО «Ультра-резонанс» (Екатеринбург). Ряд отечественных генераторов представлены в табл. 4, где приняты условные обозначения: АПЧ – автоматическая подстройка частоты, АСА – автоматическая стабилизация амплитуды, ИА – индикатор амплитуды, ПРМ – плавная регулировка мощности, СРМ – ступенчатая регулировка мощности, ВПО – воздушное принудительное охлаждение, П – пьезо-керамический преобразователь, М – магнито-стрикционный преобразователь, ИП – источник тока подмагничивания, И – импульсный.

Приведем ряд и зарубежных производителей ультразвукового оборудования: «Beijing Ultrasonic», «Branson Ultrasonics», «Hangzhou Altrasonic Technology», «Herrmann Ultraschall», «KKS Ultraschall», «Martin Walter Ultraschalltechnik», «SONIC ITALIA SRL», «Sonic Power», «soniKKs Ultrasonics Technology», «SONOTRONIC Nagel», «UCE Ultrasonic», «Weber Ultrasonics». Генераторы, выпускаемые за рубежом, имеют рабочую частоту от 15 до 1000 кГц и мощность до 8 кВт. Отметим, что в зарубежном оборудовании в качестве источников УЗК в основном используют пьезо-керамические преобразователи.

Табл. 4. Основные характеристики отечественных ультразвуковых генераторов [32]
Tab. 4. Main characteristics of domestic ultrasonic generators [32]

Тип генератора	Конструктивные особенности, исполнение, нагрузка	Мощность, кВт	Рабочая частота, кГц
УЗГ13-01/22	АПЧ, АСА, ИА, ПРМ, П	0.1	18; 22
УЗГ15-01/22П	АПЧ, СРМ, П	0.1	18; 22
УЗГ15-01/44М	УЗ-паяльник УЗП2-0,025, АПЧ, СРМ, М, ИП	0.25	44
УЗГ7-0,25/22ПИ, разработка	АПЧ, АСА, ИА, П, И	0.25	22
УЗГ5-1,0/22М	АПЧ, ИА, СРМ, МП, ИП	1.0	18; 22
УЗГ5-1,0/22П	АПЧ, ИА, СРМ	1.0	18; 22
УЗГ17-2,0/22М	АПЧ, ИА, СРМ, ВПО, М, ИП	2.0	18; 22
УЗГ17-2,0/22П	АПЧ, ИА, СРМ, ВПО, П	2.0	18; 22
УЗГ18-2,0/22ПИ, разработка	АПЧ, АСА, ПРМ, ВПО, П, И	2.0	15; 20
УЗГ5-4,0/16Ц, цифровой	АПЧ, ИА, ПРМ, ВПО, М, ИП	4.0	16; 18; 22
УЗГ6-4,0/16	ИА, СРМ, ВПО, М, ИП	4.0	16; 18; 22
УЗГ1-10,0/16	ИА, СРМ, ВПО, ИП, М – 2 шт.	4.0×2	16; 18; 22
УЗГ1-16,0/16	ИА, СРМ, ВПО, ИП, М – 4 шт.	4.0×4	16; 18; 22
УЗГ4-25,0/16	ИА, СРМ, ВПО, ИП, М – 6 шт.	4.0×6	16; 18; 22

Экспериментальное исследование УЗФ. Положительный эффект воздействия УЗФ на свойства изделий из порошков подтвержден экспериментами применительно к порошкам различной природы – металлическим, керамическим, полимерным, фармацевтическим [10], [33]–[35]. В данной статье ограничимся рассмотрением публикаций по УЗФ металлических и керамических порошков, выделив следующие направления исследований:

- 1) анализ влияния УЗФ на среднюю плотность заготовок, а также на физико-механические и эксплуатационные характеристики готовых изделий;
- 2) анализ распределения плотности по высоте (по объему) заготовок;
- 3) анализ особенностей формообразования изделий сложной геометрической формы;
- 4) анализ изменения напряженно-деформированного состояния заготовок под воздействием УЗК;
- 5) анализ эффективности различных способов УЗФ;
- 6) анализ методов оптимизации УЗФ.

Эксперименты показали, что по сравнению с традиционной технологией прессования наложение УЗК приводит к повышению средней плотности прессованных заготовок, а также заготовок, подвергнутых высокотемпературному обжигу, при одних и тех же значениях статического давления. Кроме того, отмечено, что изделия, изготовленные с применением УЗФ, обладают более высокими значениями физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик. В [9] показано, что УЗФ порошков карбида вольфрама привело к снижению

пористости заготовок на 10...12 % и к увеличению их твердости на 20...30 %. В экспериментах по УЗФ пьезокерамических порошков [36] достигнуто снижение пористости заготовок на 8...25 %, уменьшение размеров крупных пор в 1.5...2.0 раза, а также улучшение на 10...25 % электрофизических параметров пьезокерамических элементов.

Основные технологические параметры процесса УЗФ – это давление прессования, амплитуда и время воздействия УЗК, которое проявляется уже в первые секунды процесса [37]. Увеличение времени воздействия УЗК не приводит к увеличению плотности заготовки (рис. 11). В ряде экспериментов установлена высокая эффективность УЗФ при относительно низких значениях статического давления прессования. В [38] показано, что при формообразовании цилиндров из железного порошка NC 100.24 приращение средней плотности заготовки в области давлений прессования 350...500 МПа составляло примерно 7 %. При давлениях выше 500 МПа влияние УЗК на среднюю плотность понижалось (рис. 12).

Анализ зависимости плотности заготовок от амплитуды УЗК показал ее рост с ростом амплитуды. Установлено влияние амплитуды УЗК на распределение плотности по высоте заготовок: в [39] наиболее равномерное распределение получено при максимальной амплитуде, равной 11 мкм (рис. 13). В то же время эксперименты, проведенные в более широком (40 мкм) диапазоне амплитуд [37], показали, что, пройдя максимум, плотность снижается (рис. 14).

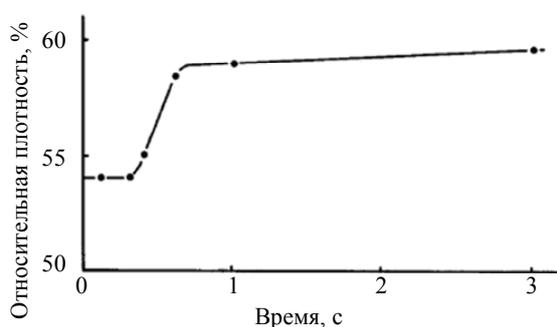


Рис. 11. Зависимость относительной плотности от длительности воздействия УЗК [37] давление прессования 27.6 МПа, частота УЗК 20 кГц, амплитуда 20 мкм

Fig. 11. Dependence of the relative density on the duration of exposure to USV [37]: pressing pressure 27.6 MPa, ultrasonic frequency 20 kHz, amplitude 20 μm

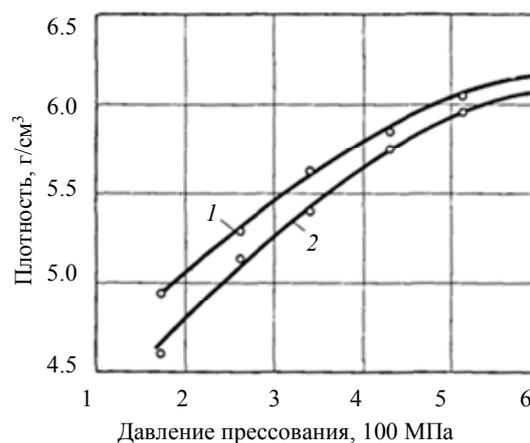


Рис. 12. Зависимость плотности от статического давления прессования [38]: масса порошка 26 г; 1 – УЗФ, амплитуда колебаний матрицы 10 мкм; 2 – статическое прессование

Fig. 12. Dependence of density on static pressing pressure [38]: powder weight 26 g; 1 – USM, amplitude of vibrations matrix 10 μm ; 2 – static pressing

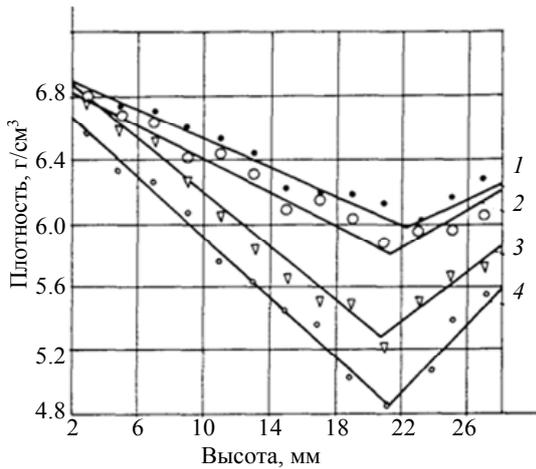


Рис. 13. Влияние амплитуды A радиальных колебаний матрицы на распределение плотности вдоль высоты спеченной заготовки [39]: 1 – $A = 11$ мкм; 2 – $A = 7.5$ мкм; 3 – $A = 5$ мкм; 4 – $A = 0$
Fig. 13. Influence of amplitude A of radial vibrations of the matrix on the density distribution along the height of the sintered compacts [39]: 1 – $A = 11$ μm ; 2 – $A = 7.5$ μm ; 3 – $A = 5$ μm ; 4 – $A = 0$

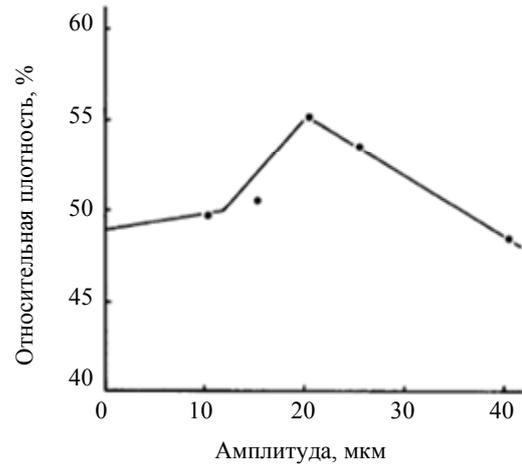


Рис. 14. Зависимость относительной плотности от амплитуды УЗК [37]: давление прессования 13.8 МПа, частота УЗК 20 кГц, длительность воздействия 1 с
Fig. 14. Dependence of relative density on amplitude of USV [37]: pressing pressure 13.8 MPa, ultrasonic frequency 20 kHz, exposure duration 1 s



Рис. 15. Распределение плотности вдоль высоты спеченной заготовки [40]: 1 – УЗФ, амплитуда колебаний 10 мкм; 2 – статическое прессование; давление прессования $P = 400$ МПа, толщина стенки $s = 2$ мм
Fig. 15. Density distribution along the height of the sintered compacts [40]: 1 – USM, vibration amplitude 10 μm ; 2 – static pressing; pressing pressure $P = 400$ MPa, wall thickness $s = 2$ mm.

Сильное влияние УЗК на плотность и на распределение плотности по объему заготовки обнаружено при формообразовании тонкостенных цилиндров с кольцевыми выступами [40]. УЗФ проводилось при возбуждении в матрице радиальных колебаний с частотой 22 кГц и амплитудой 10 мкм. Полученные зависимости (рис. 15) показали значительное уменьшение степени неоднородности материала в области перехода от большего диаметра изделия к малому.

Преимущества УЗФ перед статическим прессованием показано в [41], [42], в которых исследован процесс изготовления пьезокерамических элементов (ПКЭ) сложной конфигурации – тонкостенных протяженных цилиндров. Применение

УЗФ привело к улучшению основных электрофизических параметров ПКЭ при одновременном снижении (в среднем на 20...30 %) разброса значений параметров в партиях ПКЭ. Испытания ПКЭ в сильном электрическом поле показали, что они характеризуются большей механической прочностью, чем ПКЭ, изготовленные статическим прессованием. Кроме того, уменьшение толщины стенки заготовки привело к снижению на 30 % расхода пьезокерамического материала, уменьшению стоимости и продолжительности механической обработки.

Для исследования напряженно-деформированного состояния прессуемых заготовок в пресс-форму встраиваются устройства для измерения

давления. В [43] измерен перепад осевого давления между верхним и нижним пуансонами, а также определены зависимости между боковым давлением и давлением прессования. Давление, воспринимаемое штифтами, встроенными в пуансоны и матрицу, измерялось мембранно-пленочными датчиками. В процессе формования получали цилиндрические пьезокерамические заготовки с диаметром 20 мм и высотой от 20 до 40 мм. Результаты эксперимента показали, что при статическом прессовании перепад давления достигает 50...85 % в зависимости от высоты заготовки. При использовании УЗФ перепад давлений снижается до 15...30 %, при этом воздействие УЗК приводит к увеличению бокового давления на 20...25 %.

Для оценки напряженно-деформированного состояния формуемого материала применялся также метод голографической интерферометрии. В [44] показано, что воздействие УЗК вызывает появление в порошке остаточных деформаций, приводящих к уплотнению или разуплотнению, или к локальному перераспределению плотности. Отмечено, что положительный эффект действия УЗК на формуемый материал достигается при относительно низких статических давлениях, когда в процессе формования превалируют структурные деформации порошка. Из анализа голограмм интерференционных полос следует также, что воздействие УЗК уменьшает силы внешнего трения и способствует равномерному распределению деформаций по высоте заготовки.

В [45]–[47] рассматривалось влияние способов воздействия УЗК на формование дисков из медного порошка. Колебания подводились к верхнему и нижнему пуансонам, а также к матрице. К каждому из них в радиальном направлении через трансформаторы колебаний подсоединялись 6 или 8 пьезокерамических преобразователей. В верхнем и нижнем пуансонах возбуждались продольные колебания с одинаковой частотой 20 кГц, при этом колебания пуансонов были или синфазными, или противофазными. По другому способу в пуансонах одновременно возбуждались УЗК разных частот: в верхнем – 27 кГц, в нижнем – 20 кГц. В матрице возбуждались колебания трех видов: 1) продольные колебания частотой 20 кГц; 2) радиальные (поперечные) колебания частотой 27 кГц; 3) колебания с частотой 27 кГц, имеющие продольную и радиальную составляющие. В ходе эксперимента были опреде-

лены зависимости плотности заготовки от давления прессования (рис. 16). Кроме того, исследованы зависимости плотности заготовки, силы внешнего трения (как разности сил давлений верхнего и нижнего пуансонов) и силы выталкивания при распрессовке от амплитуды УЗК. Отмечено, что наибольшая плотность дисков достигнута при синфазных колебаниях пуансонов с одновременными колебаниями матрицы в радиальном и продольном направлениях.



Рис. 16. Зависимость плотности образцов из медного порошка (масса порошка 7 г) от статического давления прессования [46]: 1 – радиальные колебания матрицы с амплитудой 3.5 мкм, продольные колебания пуансонов с частотами 27 и 20 кГц; 2 – продольные колебания пуансонов с частотами 27 и 20 кГц; 3 – продольные колебания пуансонов с частотой 20 кГц и амплитудой 8.7 мкм; 4 – продольные колебания пуансонов с частотой 27 кГц и амплитудой 4.75 мкм; 5 – без колебаний

Fig. 16. Dependence of the density of samples from copper powder (powder weight 7 g) on the static pressing pressure [46]: 1 – radial vibrations of the matrix with an amplitude of 3.5 μm , longitudinal vibrations of punches with frequencies of 27 and 20 kHz; 2 – longitudinal vibrations of punches with frequencies of 27 and 20 kHz; 3 – longitudinal vibrations of punches with a frequency of 20 kHz and an amplitude of 8.7 μm ; 4 – longitudinal vibrations of punches with a frequency of 27 kHz and amplitude 4.75 μm ; 5 – no vibrations

Оптимизация технологии УЗФ проводилась в различных направлениях. В [48] рассмотрено влияние вакуумирования матрицы на процесс УЗФ медных и пьезокерамических порошков. Внутренняя полость матрицы соединялась с вакуумным насосом, и УЗК к матрице не подводилась. С использованием преобразователей Ланжевена в верхнем и нижнем пуансонах возбуждались продольные УЗК с частотой 20 кГц. Показано (рис. 17), что наибольшее приращение плотности в сравнении со статическим прессованием достигается при синфазных колебаниях пуансонов с максимальной амплитудой и одновременным вакуумированием матрицы. Установлено

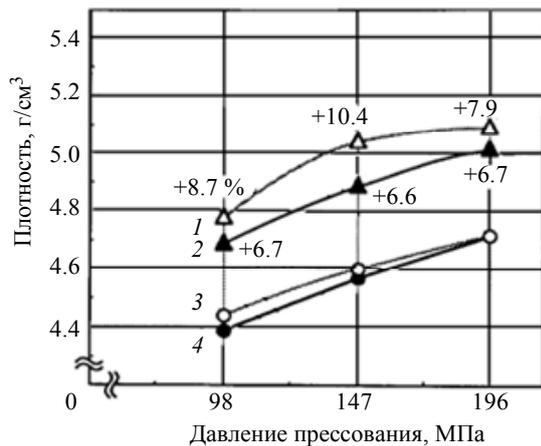


Рис. 17. Зависимость плотности пьезокерамических заготовок от статического давления прессования при синфазных колебаниях пуансонов с амплитудой 6 мкм [48]: масса порошка 6 г; длительность процесса 10 с; отношение высоты заготовки к диаметру $H/D = 0.37$; 1 и 3 – с применением вакуумирования матрицы; 2 и 4 – без вакуумирования; 3 и 4 – без колебаний пуансонов

Fig. 17. Density dependence of piezoceramic compacts from static pressing pressure at in-phase vibrations of punches with an amplitude of 6 μm [48]: powder weight 6 g; process duration 10 s; compacts height to diameter ratio $H/D = 0.37$;

1 and 3 – using matrix vacuuming; 2 and 4 – without vacuuming; 3 and 4 – no vibrations of punches

также значительное, более чем в два раза, увеличение твердости образцов.

В [49], [50] предложено предварять процесс УЗФ пьезокерамического порошка ультразвуковой обработкой в жидкости под давлением, превышающим в несколько раз атмосферное. Из сравнения образцов, изготовленных по различным способам формообразования, установлено, что подобная обработка обеспечивает наименьшую пористость образцов.

Вариантом положительного влияния предварительной обработки может служить нагревание порошка. Так, в [51] рассмотрено УЗФ порошка алюминия, нагретого до 300 °С.

Еще одним направлением оптимизации процесса УЗФ служит применение многоместной пресс-формы, предназначенной для УЗФ тонкостенных протяженных пьезокерамических цилиндров (рис. 18) [52]. Применение такой пресс-формы повышает производительность процесса формообразования и эффективность работы пресса.

Физические модели процесса УЗФ. В задачи физико-математического моделирования процесса уплотнения порошковых материалов входит

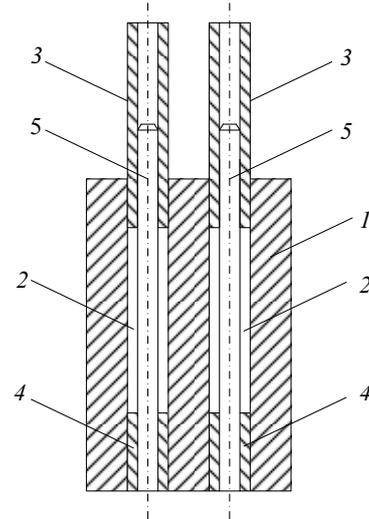


Рис. 18. Четырехместная пресс-форма [52]: 1 – матрица; 2 – формообразующая полость; 3 – верхний пуансон; 4 – нижний пуансон; 5 – стержень

Fig. 18. Quadruple press form [52]: 1 – matrix; 2 – shaping cavity; 3 – upper punch; 4 – lower punch; 5 – rod

описание механизма исследуемого процесса и определение закономерностей в напряженно-деформированном состоянии обрабатываемого материала. Одна из основных задач также заключается в установлении зависимости плотности материала и ее распределения по объему формируемой заготовки от давления прессования и других технологических факторов.

Физический механизм процесса уплотнения зависит от способа формообразования. Наиболее изучен механизм, протекающий при статическом прессовании. В этом случае в процессе уплотнения выделяют три характерные стадии. На первой стадии происходит преимущественно структурная деформация материала. Частицы порошка смещаются друг относительно друга в объеме, ограниченном внутренними поверхностями пресс-формы. Разрушаются арочные образования, представляющие собой поры с размерами, превосходящими максимальные размеры частиц порошка. На второй стадии начинают преобладать упругие деформации. Частицы порошка оказывают сопротивление дальнейшему сжатию материала. Но при этом возникают и локальные области с пластической деформацией частиц. На третьей стадии пластическая деформация охватывает весь объем уплотняемого материала. Прекращаются смещения контактов между частицами, образуются и расширяются зоны фиксированных контактов.

В теории формообразования изделий из порошков рассматриваются два основных направления, связанные с дискретно-контактным и континуальным подходами. Первое направление основано на методах статистической механики и анализе контактных взаимодействий частиц порошка, второе – на механике сплошной среды и анализе деформации материала без учета взаимодействий частиц.

Первые систематические исследования физических аспектов процесса формообразования с позиций дискретно-контактного подхода были проведены М. Ю. Бальшиным [53]. К настоящему времени отечественными и зарубежными исследователями предложен ряд моделей формообразования [54], [55]. В наибольшей степени развиваются феноменологические теории, использующие континуальный подход. Основным различием этих теорий служит различная функциональная форма поверхности (или кривой) текучести.

Механизм процесса УЗФ порошков рассматривается в основном на качественном уровне. Это объясняется прежде всего сложностью исследуемых явлений, обусловленных распространением ультразвуковых волн в неоднородной среде с изменяющимися физическими свойствами. Кроме того, не получили развития специальные методы исследования влияния УЗК на динамику процесса УЗФ, а эффективность воздействия УЗК оценивается по свойствам готовых изделий.

Общие положения качественного механизма УЗФ приведены в [33]. Возбуждаемые в матрице или пуансоне УЗК передаются частицам порошка. За счет колебательного движения происходят перемещения частиц и их утряска. Более мелкие частицы заполняют пространство между крупными частицами, разрушаются крупные поры внутри образования. Между частицами происходит расширение зоны контактов. Колебания уменьшают силы внешнего и межчастичного трения, что способствует уменьшению пористости и более равномерному распределению плотности в заготовке. Кроме того, колебания способствуют более раннему, т. е. при меньших статических давлениях, наступлению пластической деформации частиц порошка.

В [56], [57] применительно к процессу УЗФ предложены уравнения прессования – функциональные зависимости средней плотности заготовки от давления прессования, представляющие собой модификацию уравнений, приведенных в цитированной публикации М. Ю. Бальшина, а также в [58]. Модификация состояла в добавле-

нии в исходное уравнение приращения плотности, обусловленного воздействием УЗК. К сожалению, в модифицированных уравнениях отсутствует распределение плотности по объему заготовки. Кроме того, они предназначены для ограниченного интервала значений давления и плотности.

В физической модели [59] кроме приращения средней плотности за счет УЗК рассмотрено распределение плотности вдоль высоты цилиндрической заготовки. Воздействие УЗК учитывалось уменьшением коэффициента внешнего трения, благодаря чему уменьшается и перепад плотности. Показано, что наложение УЗК наиболее эффективно на начальной стадии процесса формообразования при пониженных статических давлениях, с увеличением давления прессования эффективность действия УЗК снижается.

Наиболее полная физическая модель процесса УЗФ мелкодисперсных порошков, по нашему мнению, – это модель формообразования оксидно-цинковой керамики [60]. Моделирование осуществлялось с позиций теории упруговязкопластического неадиабатического течения. Основу модели составляла система уравнений равновесия и изменения объема. Для решения системы использовался метод конечных элементов. Уравнение равновесия определялось из вариационного принципа, называемого началом виртуальных скоростей. Из принципа следует равенство мощностей внутренних и внешних сил (напряжений), записываемое в виде уравнения

$$\int_V \sigma_{ij} \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV = \int_S p_i \delta U_i dS$$

или

$$\int_V S_{ij} \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV + \int_V \sigma_0 \delta \dot{\epsilon}_0 dV = \int_S p_i \delta U_i dS, \quad (1)$$

где σ_{ij} – тензор напряжений в объеме тела V ; δ – знак вариации; $\dot{\epsilon}_{ij}$ – тензор скоростей деформации; p_i – компоненты внешних сил на поверхности S ; U_i – компоненты скорости перемещения; S_{ij} – девиатор напряжений; σ_0 – гидростатическое давление; $\dot{\epsilon}_0$ – скорость объемной деформации.

Тензор $\dot{\epsilon}$ имеет три составляющие: скорости упругой $\dot{\epsilon}_{ij}^e$, пластической $\dot{\epsilon}_{ij}^p$ и температурной $\dot{\phi}$ деформаций

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^p + \delta_{ij} \dot{\phi}.$$

Здесь δ_{ij} – символ Кронекера. Три компоненты и у тензора $\dot{\epsilon}_0$, равного сумме

$$\dot{\epsilon}_0 = \dot{\epsilon}_0^e + \dot{\epsilon}_0^p + 3\dot{\phi} = \frac{\dot{\sigma}_0}{K} + \frac{\sigma_0}{K^p} + 3\dot{\phi},$$

где K – модуль объемной деформации; K^p – скорость объемной деформации.

Для численного решения задачи производные заменяют конечными разностями за малые интервалы времени $\Delta\tau$. Исходя из этого условие изменения объема записывают в виде

$$\int_V \delta\sigma_0 \left(\dot{\epsilon}_0 - 3 \frac{\Delta\phi}{\Delta\tau} \right) dV = \int_V \delta\sigma_0 \left(\frac{\sigma_0}{K\Delta\tau} + \frac{\sigma_0}{K^p} - \frac{\sigma_0^*}{K\Delta\tau} \right) dV. \quad (2)$$

Знаком «*» отмечаем значения, достигнутые на предыдущем временном промежутке.

При решении системы интегралы в уравнениях (1) и (2) заменяют суммами интегралов по конечным элементам. Система решается поэтапно за интервалы $\Delta\tau$. На каждом этапе определяются все компоненты σ_{ij} и $\dot{\epsilon}_{ij}$, а также вычисляется значение достигнутой плотности материала по формуле

$$\rho = \rho^* / \exp(\dot{\epsilon}_0^p \Delta\tau).$$

Переход к следующему этапу осуществляется только после проверки условия пластичности. Исходя из результатов исследований [61], в данной модели за условие пластичности принято уравнение предельного состояния материала в виде

$$\frac{T^2}{\tau_s^2} + A\sigma_0 + B\sigma_0^2 + C\sigma_0^3 = 0. \quad (3)$$

Здесь $T = \sqrt{(S_{ij}S_{ij})/2}$ – интенсивность касательных напряжений; τ_s – предел текучести при пластическом сдвиге. Коэффициенты при σ_0 равны

$$A = \frac{p_s(2p_s - 3c)}{c(p_s - c)^2}; \quad B = \frac{p_s^2 - 3c^2}{c^2(p_s - c)^2};$$

$$C = \frac{p_s - 2c}{c^2(p_s - c)^2},$$

где p_s – предел текучести при гидростатическом сжатии; c – предел уплотнения. Значения величин p_s , τ_s и c определяются экспериментально.

Моделирование уплотнения оксидно-цинкового порошка проводилось применительно к заготовкам в форме диска диаметром 56 и высотой 6...10 мм. В этом случае влияние трения на общее давление прессования не превышает 2...3 %, т. е. находится в пределах точности измерений. Поэтому в моделируемом процессе влияние УЗК на снижение давления прессования не связано с изменением внешнего трения. Воздействие УЗК оценивалось как дополнительное давление, приводящее к достижению той же плотности. Для этого экспериментально определили значения относительной плотности в зависимости от давления прессования при статическом прессовании и при УЗФ (с частотой 18 кГц и амплитудой колебаний 15 мкм). Затем рассчитали зависимости от относительной плотности $\Delta\sigma_z$ – дополнительного осевого давления и $\Delta\sigma_0$ – дополнительного гидростатического давления (рис. 19).

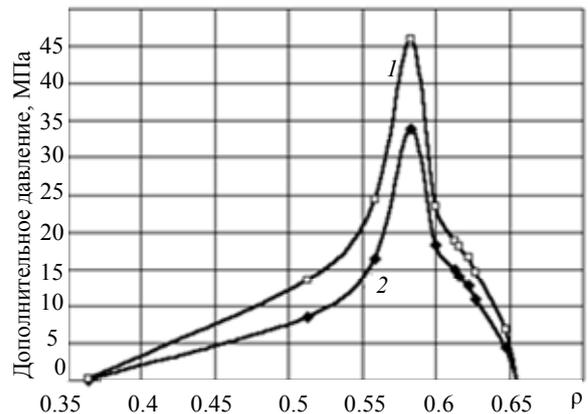


Рис. 19. Дополнительное давление от воздействия ультразвука в зависимости от относительной плотности [60]: 1 – $\Delta\sigma_z(\rho)$; 2 – $\Delta\sigma_0(\rho)$

Fig. 19. Additional pressure from exposure to ultrasound depending on relative density [60]: 1 – $\Delta\sigma_z(\rho)$; 2 – $\Delta\sigma_0(\rho)$

Приведенные зависимости (рис. 19) носят немонотонный характер. Одно и то же воздействие УЗК дает максимальное дополнительное давление в очень узком диапазоне изменения плотности $\rho = 0.56...0.62$. С увеличением плотности растет модуль упругости и, следовательно, звуковое давление, но возрастание функций $\Delta\sigma_z(\rho)$ и $\Delta\sigma_0(\rho)$ происходит только в диапазоне $\rho = 0.36...0.58$.

При $\rho > 0.65$ воздействие УЗК либо не вызывает ожидаемого эффекта, либо приводит даже к некоторому разуплотнению материала. Это явление можно объяснить, обратившись к кривым текучести (рис. 20), построенным по (3). Небольшое увеличение гидростатического давления

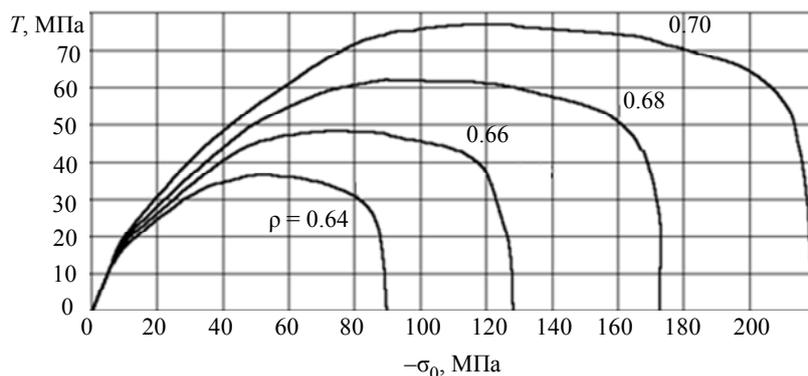


Рис. 20. Кривые текучести в области относительной плотности $\rho = 0.64 \dots 0.70$ [60]

Fig. 20. Yield curves in the region of relative density $\rho = 0.64 \dots 0.70$ [60]

должно вызвать переход точки с кривой $\rho = 0.66$ в направлении кривой $\rho = 0.68$, соответствующей большей плотности. При этом точка оказывается на части кривой предельного состояния, соответствующей положительной объемной деформации, – разрыхлению материала. Поэтому уплотнить материал свыше $\rho = 0.66$ не удастся ни воздействием УЗК, ни увеличением усилия пресса.

При достижении определенной плотности (для данного материала $\rho = 0.55 \dots 0.6$) влияние УЗК не приводит к дальнейшему уплотнению материала. Гидростатическое давление, вызванное воздействием УЗК, продолжает возрастать, что должно приводить к повышению плотности; вместе с тем, предел уплотнения (c) смещается вдоль гидростатической оси в сторону меньших значений, а рост интенсивности касательных напряжений (T) вызывает эффект разрыхления. Здесь наглядно проявляется дилатансия – зависимость между характеристиками сдвиговой и объемной деформаций.

Выводы и заключение. Результаты экспериментов показывают, что процесс УЗФ наиболее эффективен для изготовления металлических и

керамических изделий сложной конфигурации. Технично-экономическая эффективность процесса УЗФ обусловлена также возможностью использования прессового оборудования малой мощности. В то же время, потенциальные возможности нового процесса далеко не использованы. Для их реализации целесообразно вести исследования в следующих основных направлениях:

- постановка и проведение многофакторного эксперимента УЗФ порошков с использованием методов математического планирования и компьютерного моделирования;
- использование наряду с непрерывным импульсным режимом работы ультразвукового оборудования с возможностью реализации процесса в широком диапазоне частот ультразвука;
- использование прецизионных методов анализа структуры образцов, изготовленных с применением УЗФ;
- по результатам экспериментальных и технологических исследований построение обобщенной физической модели УЗФ порошков различной физико-химической природы.

Список литературы

1. Клячко Л. И., Уманский А. М., Бобров В. Н. Оборудование и оснастка для формования порошковых материалов. М.: Металлургия, 1986. 336 с.
2. Попильский Р. Я., Пивинский Ю. Е. Прессование порошковых керамических масс. М.: Металлургия, 1983. 176 с.
3. Миронов В. А. Магнитно-импульсное прессование. Рига: Зинатне, 1980. 196 с.
4. Прессование порошков взрывом / В. И. Лысак, А. В. Крохалев, С. В. Кузьмин, В. Д. Рогозин, А. М. Каунов. М.: Машиностроение, 2015. 252 с.
5. Костин Л. Г., Бучек Л. Т., Шкиль В. М. Схемы ультразвукового прессования порошковых материа-

- лов и инженерные методы расчета акустической системы // Порошковая металлургия. 1971. № 4. С. 13–17.
6. Теумин И. И. Ультразвуковые колебательные системы. М.: Машгиз, 1959. 331 с.
7. Физика и техника мощного ультразвука. Т. 1. Источники мощного ультразвука / под ред. Л. Д. Розенберга. М.: Наука, 1967. 379 с.
8. Казанцев В. Ф. Источники ультразвука. М.: Технополиграфцентр, 2010. 259 с.
9. Влияние ультразвуковых колебаний на изменение пористости и твердости при прессовании твердосплавных порошковых смесей / Л. Г. Костин, Л. Т. Бучек, В. М. Шкиль, Н. Н. Суманев, М. Е. Грена-

дер, В. А. Старков // Порошковая металлургия. 1975. № 9. С. 26–29.

10. Красавина М. А., Пугачев С. И., Рытов Е. Ю. Ультразвуковое формообразование оксидно-цинковой керамики. СПб.: Изд-во СПбПУ, 2011. 182 с.

11. Прессование порошков титаната бария с наложением ультразвуковых колебаний / В. В. Клубович, В. К. Высоцкий, Г. С. Бобровская, В. В. Рубаник, В. С. Стрижнев // Весці АН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. н. 1994. № 3. С. 16–19.

12. Cha H. R. Densification of the nanopowder by using ultrasonic vibration compaction // Rev. on Advanced Materials Sci. 2011. № 28 (1). P. 90–93.

13. Densification mechanism of soft magnetic composites using ultrasonic compaction for motors in EV platforms / M. H. Hwang, H. S. Lee, J. H. Han, D. H. Kim, H. R. Cha // Materials. 2019. № 12. 824. doi: 10.3390/ma12050824.

14. Исследование процесса уплотнения при ультразвуковом воздействии на увлажненную порошковую среду / А. И. Рудской, С. Ю. Кондратьев, В. Н. Кокорин, Н. А. Сизов // Науч.-техн. ведомости Санкт-Петербургского гос. политех. ун-та. 2013. № 3 (178). С. 148–155.

15. Авт. св. СССР № 1184605 / Е. И. Ухов, Г. В. Терещенко. Устройство для прессования изделий из порошков. Заявл. 29.04.84; опубл. 15.10.85. Бюл. № 38. 2 с.

16. Пат. 2100313 (RU) / А. А. Ерофеев, Г. М. Иманов, М. А. Красавина, С. А. Панов, Н. М. Попов, С. И. Пугачев, Н. Г. Семенова. Способ изготовления изделий из порошка. Заявл. 06.12.1994; опубл. 27.12.1997. 10 с.

17. Пат. 2171177 (RU) / А. А. Ерофеев, М. А. Красавина, Ф. Ф. Лёгуша, Н. М. Попов, С. И. Пугачев, Н. Г. Семенова, Д. О. Харитонов, Тэ Ан Сун. Способ формования изделий из дисперсных материалов. Заявл. 29.11.1999; опубл. 27.07.2001. Бюл. № 21. 9 с.

18. Пат. 2183532 (RU) / А. А. Ерофеев, М. А. Красавина, Ф. Ф. Лёгуша, Н. М. Попов, С. И. Пугачев, Н. Г. Семенова, Тэ Ан Сун. Способ формообразования изделий из многофазных материалов. Заявл. 14.06.2000; опубл. 20.06.2002, Бюл. № 17. 10 с.

19. Авт. св. СССР № 954184 / М. Н. Печатников, В. И. Гриневиц, Г. С. Батков, Т. В. Хитрова, В. Г. Волков. Способ вибрационного формования изделий из порошка. Заявл. 12.01.81; опубл. 30.08.82, Бюл. № 32. 4 с.

20. Христафорян С. Ш, Артунян А. В. Особенности процесса прессования материалов в закрытых объемах с использованием различных схем наложения УЗК // Междунар. сб. науч. тр. «Прогрессивные технологии и системы машиностроения». Вып. 31. Донецк. 2006. С. 305–310.

21. Артунян А. В. О возможности получения различных напряжений по высоте прессовки использованием сложнопостепенных ультразвуковых колебаний // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2006. Т. LIX. № 3. С. 479–483.

22. Подводные электроакустические преобразователи (Расчет и проектирование): Справочник / В. В. Богородский, Л. А. Зубарев, Е. А. Корепин, В. И. Якушев. Л.: Судостроение, 1983. 248 с.

23. Пьезокерамические преобразователи: Справочник / В. В. Ганопольский, Б. А. Касаткин, Ф. Ф. Лёгуша, Н. И. Прудько, С. И. Пугачев. Л.: Судостроение, 1984. 256 с.

24. Донской А. В., Келлер О. К., Кратыш Г. С. Ультразвуковые электротехнологические установки. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоиздат. Ленингр. отделение., 1982. 208 с.

25. Тихонравов А. В. Об оптимальной форме концентраторов ультразвуковых колебаний // Акуст. журн. 1980. Т. XXVI. № 2. С. 274–280.

26. Богомолов С. И., Симсон Э. А. Оптимальное проектирование концентраторов ультразвуковых колебаний // Акуст. журн. 1981. Т. XXVII, № 4. С. 491–499.

27. Вьюгинова А. А. Моделирование двумерных ультразвуковых технологических волноводов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2012. № 2. С. 72–77.

28. Степаненко Д. А., Бунчук К. А. Моделирование составных кольцевых ультразвуковых волноводов с помощью метода конечных элементов // Наука и техника. 2021. Т. 20, № 6. С. 476–481. doi: 10.21122/2227-1031-2021-20-6-476-481.

29. Design of ultrasonic compaction tool for powder metallurgy / Y. Daud, N. A. Raman, S. A. Aziz, K. R. Jamaludin // Appl. Mechanics and Materials. 2014. Vol. 465–466. P. 1016–1020.

30. Колешко В. М. Ультразвуковая микросварка. Минск: Наука и техника, 1977. 328 с.

31. Петушко И. В. Оборудование для ультразвуковой обработки. СПб.: Андреев. изд. дом, 2005. 166 с.

32. Петушко И. В. Ультразвуковые генераторы // Материалы междунар. науч. конф. «Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы». Витебск, 2016. С. 126–128.

33. Агранат Б. А., Гудович А. П., Нежевенко Л. Б. Ультразвук в порошковой металлургии. М.: Металлургия, 1986. 166 с.

34. Levina M., Rubinstein M. H., Rajabi-Siahboomi A. R. Principles and application of ultrasound in pharmaceutical powder compression // Pharmaceutical Research. 2000. Vol. 17. № 3. P. 257–265.

35. Negrov D. A., Eremin E. N. The influence of ultrasonic exposure on polytetrafluoroethylene structure modified with boron nitride // J. of Phys.: Conf. ser. 2017. Vol. 858. № 1. P. 012021. doi: 10.1088/1742-6596/858/1/012021.

36. Ультразвуковое формообразование тонких пьезокерамических дисков / Ф. Ф. Лёгуша, Н. М. Попов, С. И. Пугачев, Д. О. Харитонов // Тр. IV междунар. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-98. Новосибирск, 1998. Т. 15. С. 26–27.

37. Powder compaction with ultrasonic assistance / E. Emeruwa, J. Jarrige, J. Mexmain, M. Billy, K. Bouzouita // J. of materials sci. 1990. Vol. 25. № 2. Pt. B. P. 1459–1462.

38. Siwkiewicz Z., Filipowicz W., Stolarz S. Untersuchungen über den Einfluß von Ultraschallschwingungen beim Pressen von Eisenpulver // Planseeberichte für Pulvermetallurgie. 1977. Vol. 25, № 4. S. 255–262.

39. Siwkiewicz Z., Stolarz S. The effect of ultrasonic vibrations of the die on the density distributions of slender iron powder compacts // Powder Metallurgy Intern. 1986. Vol. 18, № 6. P. 407–408.
40. Filipowicz W., Siwkiewicz Z. Effect of the iron powder pressing in ultrasound field on density distribution of the slender compacts of compound shapes // Powder Metallurgy Intern. 1986. Vol. 18, № 2. P. 61–62.
41. Ультразвуковое формообразование пьезокерамики / Н. М. Попов, С. И. Пугачев, Е. Ю. Рытов, Н. Г. Семенова // Тр. 6-й междунар. конф.: «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». СПб., 2002. С. 270–273.
42. Рытов Е. Ю. Ультразвуковое формообразование тонкостенных пьезокерамических цилиндров // Науч.-техн. конф.: «Кораблестроительное образование и наука-2003». СПб., 2003. Т. 2. С. 420–425.
43. Исследование процесса прессования пьезокерамики с применением емкостных датчиков давления / Г. М. Иманов, Р. И. Мешкова, С. И. Пугачев, В. А. Синицкий // Технология судостроения. 1974. № 7. С. 54–55.
44. Исследование влияния ультразвуковых колебаний на процесс уплотнения порошков методами голографической интерферометрии / А. Н. Буханов, В. И. Петухов, В. Г. Бахтин, А. Б. Кудрин // Тем. сб. науч. тр. «Интенсификация технологических процессов в ультразвуковом поле»; отв. ред. П. И. Полухин. М.: Металлургия, 1986. С. 62–66.
45. Tsujino J., Yabuzaki M., Ueoka T. Studies on ultrasonic vibration press of powder by longitudinal vibration punches and various vibration mode dies // Japanese J. of Appl. Phys. 1987. Vol. 26. P. 209–211.
46. Some recent applications of high power ultrasonics using multiple transducers and vibration systems / J. Tsujino, T. Ueoka, M. Yabuzaki, H. Suzuki, T. Horikoshi, M. Nagura, M. Kobayashi // Ultrasonic Symp. 1986. P. 593–598.
47. Studies on ultrasonic vibration press of powder with a complex vibration die and longitudinal vibration punches / J. Tsujino, M. Yabuzaki, T. Ueoka, M. Ishii, H. Ishiwata, M. Nagura, M. Kobayashi // Ultrasonics Intern. 85: Conf. Proc. London, UK, 1985. P. 710–715.
48. Ultrasonic vibration press of metal and ceramic powders using complex vibration and vacuum condition // Ultrasonic Symp. IEEE, 1991. P. 973–978. doi: 10.1109/ultsym.1991.234260
49. Получение керамики барий-цирконат-титанат свинца с использованием высокоэнергетического ультразвукового воздействия / В. В. Клубович, В. В. Рубаник А. Д. Шилин, В. В. Рубаник мл., М. В. Шилина // Материалы междунар. науч.-тех. конф. «Инновационные технологии в машиностроении». Новополюк, 2015. С. 124–126.
50. Рубаник В. В., Фролов В. К., Колодинская Н. С. Ультразвуковая механоактивация порошка пьезокерамики $\text{Na}_0.5\text{Bi}_0.5\text{TiO}_3$. // Материалы междунар. науч. конф. «Актуальные проблемы прочности». Минск: УП «ИВЦ Минфина», 2022. С. 406–408.
51. Vibratory powder consolidation: заявка на пат. № US 20100003158A1 США. Teiichi Ando & Co. Опубл. 07.01.10. 9 с.
52. Пат. (полезная модель) 204778 (RU) / Ф. Ф. Легуша, Г. И. Паничев, С. И. Пугачев, Е. Ю. Рытов, А. Б. Смирнов. Устройство для формирования изделий из порошкового материала. Заявл. 18.01.21; опубл. 09.06.21. Бюл. № 16. 9 с.
53. Бальшин М. Ю. Порошковое металловедение. М.: Металлургиздат, 1948. 332 с.
54. Modelling of powder die compaction – (Engineering materials and processes) / P. R. Brewin, O. Coube, P. Doremus, J. H. Tweed. Springer, 2008. 329 p.
55. Цеменко В. Н. Деформирование порошковых сред. СПб.: Изд. СПбГТУ, 2001. 104 с.
56. Коновалов Е. Г., Жданович В. М. Влияние ультразвуковых колебаний на уплотняемость металлических порошков // Докл. Академии наук БССР. 1971. Т. XV. № 3. С. 219–221.
57. Бучек Л. Т. Исследование эффективности прессования смесей на основе карбида вольфрама с наложением ультразвуковых колебаний: автореф. дис. ... канд. тех. наук. Киев, 1977. 20 с.
58. Кунин Н. Ф., Юрченко Б. Д. Закономерности прессования порошков различных материалов // Порошковая металлургия. 1963. № 6. С. 3–10.
59. Пугачев С. И., Рытов Е. Ю., Семенова Н. Г. Физическая модель ультразвукового формообразования изделий из керамических порошков // Сб. тр. XIII сессии РАО. М., 2003. Т. 2. С. 233–238.
60. Разработка модели уплотнения оксидноцирконковой керамики при прессовании / М. А. Красавина, Н. М. Попов, Е. Ю. Рытов, С. И. Пугачев, Ю. И. Рыбин, В. Н. Цеменко, А. Э. Александров // Металлообработка. 2006. № 5-6 (35-36). С. 53–58.
61. Рыбин Ю. И., Цеменко В. Н., Александров А. Э. Математическая модель уплотнения порошковых металлических материалов // Металлообработка. 2004. № 6 (24). С. 45–49.

Информация об авторах

Пугачев Сергей Иванович – д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, АО «МПО-Гидроприбор», Большой Сампсониевский пр., 24, Санкт-Петербург, 194044, Россия.
E-mail: spugachev@bk.ru

Рытов Евгений Юрьевич – канд. техн. наук, кафедра физики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, ул. Лощманская, 3, Санкт-Петербург, 190121, Россия.
E-mail: physics_spbmtu@mail.ru

References

1. Kljachko L. I., Umanskij A. M., Bobrov V. N. Oborudovanie i osnastka dlja formovanija poroshkovykh materialov. M.: Metallurgija, 1986. 336 s. (In Russ.).
2. Popil'skij R. Ja., Pivinskij Ju. E. Pressovanie poroshkovykh keramicheskikh mass. M.: Metallurgija, 1983. 176 s. (In Russ.).
3. Mironov V. A. Magnitno-impul'snoe pressovanie. Riga: Zinatne, 1980. 196 s. (In Russ.).
4. Pressovanie poroshkov vzryvom / V. I. Lysak, A. V. Krohalev, S. V. Kuz'min, V. D. Rogozin, A. M. Kaunov. M.: Mashinostroenie, 2015. 252 s. (In Russ.).
5. Kostin L. G., Buchek L. T., Shkil' V. M. Shemy ul'trazvukovogo pressovanija poroshkovykh materialov i inzhenernye metody rascheta akusticheskoy sistemy // Poroshkovaja metallurgija. 1971. № 4. S. 13–17. (In Russ.).
6. Teumin I. I. Ul'trazvukovyje kolebatel'nye sistemy. M.: Mashgiz, 1959. 331 s. (In Russ.).
7. Fizika i tehnika moshhnogo ul'trazvuka. T. 1. Istochniki moshhnogo ul'trazvuka / pod red. L. D. Rozenberga. M.: Nauka, 1967. 379 s. (In Russ.).
8. Kazancev V. F. Istochniki ul'trazvuka. M.: Tehnopoligrafcentr, 2010. 259 s. (In Russ.).
9. Vlijanie ul'trazvukovykh kolebanij na izmenenie poristosti i tverdosti pri pressovanii tverdosplavnykh poroshkovykh smesey / L. G. Kostin, L. T. Buchek, V. M. Shkil', N. N. Sumaneev, M. E. Grenader, V. A. Starkov // Poroshkovaja metallurgija. 1975. № 9. S. 26–29. (In Russ.).
10. Krasavina M. A., Pugachev S. I., Rytov E. Ju. Ul'trazvukovoe formoobrazovanie oksidno-cinkovoj keramiki. SPb.: Izd-vo SPbPU, 2011. 182 s. (In Russ.).
11. Pressovanie poroshkov titanata barija s nalozheniem ul'trazvukovykh kolebanij / V. V. Klubovich, V. K. Vysockij, G. S. Bobrovskaja, V. V. Rubanik, V. S. Strizhnev // Vesci AN Belarusi. Ser. fiz.-tjehn. n. 1994. № 3. S. 16–19. (In Russ.).
12. Cha H. R. Densification of the nanopowder by using ultrasonic vibration compaction // Rev. on Advanced Materials Sci. 2011. № 28 (1). P. 90–93.
13. Densification mechanism of soft magnetic composites using ultrasonic compaction for motors in EV platforms / M. H. Hwang, H. S. Lee, J. H. Han, D. H. Kim, H. R. Cha // Materials. 2019. № 12. 824. doi: 10.3390/ma12050824.
14. Issledovanie processa uplotnenija pri ul'trazvukovom vozdejstvii na uvlazhnennuju poroshkovuju sredu / A. I. Rudskoj, S. Ju. Kondrat'ev, V. N. Kokorin, N. A. Sizov // Nauch.-tehn. vedomosti Sankt-Peterburgskogo gos. politeh. un-ta. 2013. №3 (178). S. 148–155. (In Russ.).
15. Avt. sv. SSSR № 1184605 / E. I. Uhov, G. V. Tereshhenko. Ustrojstvo dlja pressovanija izdelij iz poroshkov. Zajavl. 29.04.84; opubl. 15.10.85, Bjul. № 38. 2 s. (In Russ.).
16. Pat. 2100313 (RU) / A. A. Erofeev, G. M. Imanov, M. A. Krasavina, S. A. Panov, N. M. Popov, S. I. Pugachev, N. G. Semenova. Sposob izgotovlenija iz-delij iz poroshka. Zajavl. 06.12.1994; opubl. 27.12.1997. 10 s. (In Russ.).
17. Pat. 2171177 (RU) / A. A. Erofeev, M. A. Krasavina, F. F. Legusha, N. M. Popov, S. I. Pugachev, N. G. Semenova, D. O. Haritonov, Tje An Sun. Sposob formovanija izdelij iz dispersnykh materialov. Zajavl. 29.11.1999; opubl. 27.07.2001. Bjul. № 21. 9 s. (In Russ.).
18. Pat. 2183532 (RU) / A. A. Erofeev, M. A. Krasavina, F. F. Legusha, N. M. Popov, S. I. Pugachev, N. G. Semenova, Tje An Sun. Sposob formoobrazovanija izdelij iz mnogofaznykh materialov; Zajavl. 14.06.2000; opubl. 20.06.2002. Bjul. № 17. 10 s. (In Russ.).
19. A. S. SSSR № 954184 / M. N. Pechatnikov, V. I. Grinevich, G. S. Batkov, T. V. Hitrova, V. G. Volkov. Sposob vibracionnogo formovanija izdelij iz poroshka; Zajavl. 12.01.81; opubl. 30.08.82. Bjul. № 32. 4 s. (In Russ.).
20. Hristaforjan S. Sh., Artunjan A. V. Osobennosti processa pressovanija materialov v zakrytykh ob'emah s ispol'zovaniem razlichnykh shem nalozhenija UZK // Mezhdunar. sb. nauch. trudov «Progressivnye tehnologii i sistemy mashinostroenija». Vyp. 31. Doneck. 2006. S. 305–310. (In Russ.).
21. Artunjan A. V. O vozmozhnosti poluchenija razlichnykh naprjazhenij po vysote pressovki ispol'zovaniem slozhnoprostranstvennykh ul'trazvukovykh kolebanij // Izv. NAN RA i GIUA. Ser. TN. 2006. T. LIX. № 3. S. 479–483. (In Russ.).
22. Podvodnye jelektroakusticheskie preobrazovateli (Raschet i proektirovanie): spravochnik / V. V. Bogorodskij, L. A. Zubarev, E. A. Korepin, V. I. Jakushev. L.: Sudostroenie, 1983. 248 s. (In Russ.).
23. P'ezokeramicheskie preobrazovateli: Spravochnik / V. V. Ganopol'skij, B. A. Kasatkin, F. F. Legusha, N. I. Prud'ko, S. I. Pugachev. L.: Sudostroenie, 1984. 256 s. (In Russ.).
24. Donskoj A. V., Keller O. K., Kratysh G. S. Ul'trazvukovyje jelektrotehnologicheskie ustanovki. 2-e izd., pererab. i dop. L.: Jenergoizdat. Leningr. otd-nie, 1982. 208 s. (In Russ.).
25. Tihonravov A. V. Ob optimal'noj forme koncentratorov ul'trazvukovykh kolebanij // Akust. zhurn. 1980. T. XXVI. № 2. S. 274–280. (In Russ.).
26. Bogomolov S. I., Simson Je. A. Optimal'noe proektirovanie koncentratorov ul'trazvukovykh kolebanij // Akust. zhurn. 1981. T. XXVII, № 4. S. 491–499. (In Russ.).
27. V'juginova A. A. Modelirovanie dvumernykh ul'trazvukovykh tehnologicheskikh volnovodov // Izv. SPbGJeTU «LjeTI». 2012. № 2. S. 72–77. (In Russ.).
28. Stepanenko D. A., Bunchuk K. A. Modelirovanie sostavnykh kol'cevnykh ul'trazvukovykh volnovodov s pomoshh'ju metoda konechnykh jelementov // Nauka i tehnika. 2021. T. 20, № 6. S. 476–481. doi: 10.21122/2227-1031-2021-20-6-476-481. (In Russ.).
29. Design of ultrasonic compaction tool for powder metallurgy / Y. Daud, N. A. Raman, S. A. Aziz, K. R. Jamaludin // Appl. Mechanics and Materials. 2014. Vol. 465–466. P. 1016–1020.
30. Koleshko V. M. Ul'trazvukovaja mikrosvarka. Minsk: Nauka i tehnika, 1977. 328 s. (In Russ.).
31. Petushko I. V. Oborudovanie dlja ul'trazvukovoj obrabotki: monografija. SPb.: Andreev. izd. dom, 2005. 166 s. (In Russ.).

32. Petushko I. V. Ul'trazvukovye generatory // *Materialy mezhdunar. nauch. konf. «Tehnicheskaja akustika: razrabotki, problemy, perspektivy»*. Vitebsk, 2016. S. 126–128. (In Russ.).
33. Agranat B. A., Gudovich A. P., Nezhevenko L. B. Ul'trazvuk v poroshkovej metallurgii. M.: Metallurgija, 1986. 166 s. (In Russ.).
34. Levina M., Rubinstein M. H., Rajabi-Siahboomi A. R. Principles and application of ultrasound in pharmaceutical powder compression // *Pharmaceutical Research*. 2000. Vol. 17, № 3. P. 257–265.
35. Negrov D. A., Eremin E. N. The influence of ultrasonic exposure on polytetrafluoroethylene structure modified with boron nitride // *J. of Phys.: Conf. series*. 2017. Vol. 858, № 1. P. 012021. doi: 10.1088/1742-6596/858/1/012021
36. Ul'trazvukovoe formoobrazovanie tonkih p'ezokeramicheskikh diskov / F. F. Legusha, N. M. Popov, S. I. Pugachev, D. O. Haritonov // *Tr. IV mezhdunar. konf. «Aktual'nye problemy jelektronnogo priborostroenija» APJeP-98*. Novosibirsk, 1998. T. 15. S. 26–27. (In Russ.).
37. Powder compaction with ultrasonic assistance / E. Emeruwa, J. Jarrige, J. Mexmain, M. Billy, K. Bouzouita // *J. of materials sci.* 1990. Vol. 25, № 2. Pt. B. P. 1459–1462. (In Russ.).
38. Siwkiewicz Z., Filipowicz W., Stolarz S. Untersuchungen über den Einfluß von Ultraschallschwingungen beim Pressen von Eisenpulver // *Planseeberichte für Pulvermetallurgie*. 1977. Vol. 25, № 4. S. 255–262.
39. Siwkiewicz Z., Stolarz S. The effect of ultrasonic vibrations of the die on the density distributions of slender iron powder compacts // *Powder Metallurgy Intern.* 1986. Vol. 18, № 6. P. 407–408.
40. Filipowicz W., Siwkiewicz Z. Effect of the iron powder pressing in ultrasound field on density distribution of the slender compacts of compound shapes // *Powder Metallurgy International*. 1986. Vol. 18, № 2. P. 61–62.
41. Ul'trazvukovoe formoobrazovanie p'ezokeramiki / N. M. Popov, S. I. Pugachev, E. Ju. Rytov, N. G. Semenova // *Tr. 6-j mezhdunar. konf.: «Prikladnye tehnologii gidroakustiki i gidrofiziki»*. SPb, 2002. S. 270–273. (In Russ.).
42. Rytov E. Ju. Ul'trazvukovoe formoobrazovanie tonkostennykh p'ezokeramicheskikh cilindrov // *Nauch.-tehn. konf.: «Korablestroitel'noe obrazovanie i nauka-2003»*. SPb, 2003. T. 2. S. 420–425. (In Russ.).
43. Issledovanie processa pressovanija p'ezokeramiki s primeneniem emkostnykh datchikov davlenija / G. M. Imanov, R. I. Meshkova, S. I. Pugachev, V. A. Sinickij // *Tehnologija sudostroenija*. 1974. № 7. S. 54–55. (In Russ.).
44. Issledovanie vlijanija ul'trazvukovykh kolebanij na process uplotnenija poroshkov metodami golograficheskoj interferometrii / A. N. Buhanov, V. I. Petuhov, V. G. Bahtin, A. B. Kudrin // *Tem. sb. nauch. tr. «Intensifikacija tehnologicheskikh processov v ul'trazvukovom pole»* / otv. red. P. I. Poluhin. M.: Metallurgija, 1986. S. 62–66. (In Russ.).
45. Tsujino J., Yabuzaki M., Ueoka T. Studies on ultrasonic vibration press of powder by longitudinal vibration punches and various vibration mode dies // *Japanese J. of Appl. Phys.* 1987. Vol. 26. P. 209–211.
46. Some recent applications of high power ultrasonics using multiple transducers and vibration systems / J. Tsujino, T. Ueoka, M. Yabuzaki, H. Suzuki, T. Horikoshi, M. Nagura, M. Kobayashi // *Ultrasonic Symp.* 1986. P. 593–598.
47. Studies on ultrasonic vibration press of powder with a complex vibration die and longitudinal vibration punches / J. Tsujino, M. Yabuzaki, T. Ueoka, M. Ishii, H. Ishiwata, M. Nagura, M. Kobayashi // *Ultrasonics Intern.* 85: Conf. Proc. London, UK, 1985. P. 710–715.
48. Ultrasonic vibration press of metal and ceramic powders using complex vibration and vacuum condition / J. Tsujino, T. Ueoka, H. Suzuki, S. Shinuchi, K. Hashimoto // *Ultrasonic Symp. IEEE*, 1991. P. 973–978. doi: 10.1109/ultsym.1991.234260
49. Poluchenie keramiki barij-cirkonat-titanat svinca s ispol'zovaniem vysokojenergeti-cheskogo ul'trazvukovogo vozdejstvija / V. V. Klubovich, V. V. Rubanik, A. D. Shilin, V. V. Rubanik ml., M. V. Shilina // *Materialy mezhdunar. nauch.-tehn. konf. «Innovacionnye tehnologii v mashinostroenii»*. Novopolock, 2015. S. 124–126. (In Russ.).
50. Rubanik V. V., Frolov V. K., Kolodinskaja N. S. Ul'trazvukovaja mehanoaktivacija poroshka p'ezokeramiki Na_{0.5}Bi_{0.5}TiO₃ // *Materialy mezhdunar. nauch. konf. «Aktual'nye problemy prochnosti»*. Minsk: UP «IVC Minfina», 2022. S. 406–408. (In Russ.).
51. Vibratory powder consolidation: zajavka na pat. № US 20100003158A1 SShA. Teiichi Ando & Co. Opubl. 07.01.10. 9 s. (In Russ.).
52. Pat. (poleznaja model') 204778 (RU) / Legusha F. F., Panichev G. I., Pugachev S. I., Rytov E. Ju., Smirnov A. B. Ustrojstvo dlja formirovanija izdelij iz poroshkovogo materiala. Zajavl. 18.01.21; opubl. 09.06.21. Bjul. № 16. 9 s. (In Russ.).
53. Bal'shin M. Ju. Poroshkovoe metallovedenie. M.: Metallurgizdat, 1948. 332 s. (In Russ.).
54. Modelling of powder die compaction (Engineering materials and processes) / P. R. Brewin, O. Coube, P. Doremus, J. H. Tweed. Springer, 2008. 329 p. (In Russ.).
55. Cemenko V. N. Deformirovanie poroshkovykh sred. SPb: Izd. SPbGTU, 2001. 104 s. (In Russ.).
56. Konovalov E. G., Zhdanovich V. M. Vlijanie ul'trazvukovykh kolebanij na uplotnjaemost' metallicheskikh poroshkov // *Dokl. Akademii nauk BSSR*. 1971. T. XV, № 3. S. 219–221. (In Russ.).
57. Buchek L. T. Issledovanie jeffektivnosti pressovanija smesej na osnove karbida vol'frama s nalozheniem ul'trazvukovykh kolebanij: avtoref. dis. ... kand. teh. nauk. Kiev, 1977. 20 s. (In Russ.).
58. Kunin N. F., Jurchenko B. D. Zakonomernosti pressovanija poroshkov razlichnykh materialov // *Poroshkovaja metallurgija*. 1963. № 6. S. 3–10. (In Russ.).
59. Pugachev S. I., Rytov E. Ju., Semenova N. G. Fizicheskaja model' ul'trazvukovogo formoobrazovanija izdelij iz keramicheskikh poroshkov // *Sb. tr. XIII sessii RAO*. M., 2003. T. 2. S. 233–238. (In Russ.).

60. Razrabotka modeli uplotnenija oksidnociinkovoj keramiki pri pressovanii / M. A. Krasavina, N. M. Popov, E. Ju. Rytov, S. I. Pugachev, Ju. I. Rybin, V. N. Cemenko, A. Je. Aleksandrov // Metalloobrabotka. 2006. № 5–6 (35–36). S. 53–58. (In Russ.).

61. Rybin Ju. I., Cemenko V. N., Aleksandrov A. Je. Matematicheskaja model' uplotnenija poroshkovyh metallicheskih materialov // Metalloobrabotka. 2004. № 6 (24). S. 45–49. (In Russ.).

Information about the authors

Sergey I. Pugachev – Dr Sci. (Eng.), Professor, the Leading Researcher, JSC «Concern «Sea Underwater Weapons – Hidropribor», Bolshoj Sampsonievskij Av., 24, St. Petersburg, 194044, Russia.

E-mail: spugachev@bk.ru

Evgeny Yu. Rytov – Ph. D. (Eng.), Department of Physics, St. Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya St., 3, St. Petersburg, 190121, Russia.

E-mail: physics_spbmtu@mail.ru

Статья поступила в редакцию 08.08.2023; принята к публикации после рецензирования 10.12.2023; опубликована онлайн 26.02.2024.

Submitted 08.08.2023; accepted 10.12.2023; published online 26.02.2024.
