

УДК 534.321.9:621.762

УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ (обзор)

С. И. Пугачев, Е. Ю. Рытов

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
кафедра физики

Рассмотрены физические и технические аспекты процесса формообразования пьезокерамических материалов системы цирконата-титаната свинца (ЦТС), применяемой для изготовления пьезокерамических элементов (ПКЭ), и керамики на основе оксида цинка (ОЦК), являющейся основой оксидно-цинковых варисторов (ОЦВ). Представлены результаты экспериментальных исследований отечественных и зарубежных авторов по ультразвуковому формообразованию (УЗФ) изделий из указанных материалов. Проведен анализ теоретических представлений о механизме уплотнения металлических и керамических порошков при одновременном воздействии статического давления прессования и ультразвука. Представлены результаты расчетов, выполненных авторами при моделировании процесса формообразования пьезокерамики и оксидно-цинковой керамики.

Ключевые слова: *ультразвук, формообразование, уплотнение порошков, пьезокерамика, оксидно-цинковая керамика*

1. Введение. Формообразование – процесс уплотнения порошковой массы с целью получения из нее консолидированного тела, называемого заготовкой, с определенными размерами и формой, а также плотностью и механической прочностью. В технологическом цикле производства изделий из порошков формообразование относится к процессам, в наибольшей степени определяющим свойства уплотняемых материалов и изготавливаемых из них изделий. В самом общем виде процессы формообразования разделяют на статические и динамические. В настоящей работе выделены способы формообразования, применяемые в производстве изделий из электрофизической керамики: пьезокерамических элементов и оксидно-цинковых варисторов. При этом основное внимание уделено ультразвуковому формообразованию (УЗФ), под которым будем понимать совместное воздействие на обрабатываемую среду статического механического и ультразвукового полей. Рассмотрение результатов экспериментальных и технологических исследований УЗФ изделий из указанных материалов, а также результатов физического и математического моделирования процесса УЗФ изделий из

мелкодисперсных керамических порошков, и составляет основное содержание настоящей работы.

2. Статические способы формообразования

2.1. Статическое прессование в закрытой пресс-форме.

Порошковый материал засыпают в полость металлической пресс-формы, установленной на траверсах пресса, чаще всего гидравлического типа. Формообразование осуществляется воздействием давления, создаваемого прессом, на подвижные элементы пресс-формы. Схемы приложения давления различны, самая простая используется в одностороннем прессовании, при котором давление действует в одном направлении вдоль оси симметрии формуемой заготовки [1, 2]. В этом случае неподвижным элементом пресс-формы является заполняемая порошком матрица, подвижным элементом – пуансон, закрывающий матрицу и перемещающийся относительно ее стенок под действием давления прессования. В данной схеме прессования форму заготовки определяют внутренняя поверхность матрицы и контактирующая с порошком поверхность пуансона.

Одностороннее прессование применяют для получения малогабаритных заготовок простой формы (дисков, колец) с отношением высоты заготовки к ее поперечному размеру (диаметру) не более единицы. С увеличением указанного отношения возрастает степень неравномерности распределения плотности материала вдоль высоты заготовки. Неравномерность обусловлена в основном действием сил внешнего трения между уплотняемым порошком и стенками пресс-формы. Применение смазки внутренней поверхности пресс-формы перед ее засыпкой порошком, хотя и уменьшает внешнее трение, но к полному его устранению не приводит.

Для уменьшения разброса плотности, а также для формообразования более протяженных изделий применяют двустороннее прессование, когда на уплотняемый материал воздействует давление с двух противоположных сторон. Процесс двустороннего прессования осуществляется различными способами [1, 2]. Например, в одном из них под действием давления верхний и нижний пуансоны одновременно совершают противоположные перемещения относительно стационарной матрицы. Другой пример – прессование с так называемой плавающей матрицей. В этом случае в результате перемещения верхнего пуансона уплотняемый порошок за счет сил внешнего трения вовлекает в движение матрицу. Совершаемое матрицей перемещение относительно нижнего пуансона приводит к нижней подпрессовке порошка.

Влияние внешнего, а также и внутреннего (между частицами порошка) трения на процесс статического прессования значительно возрастает при формообразовании изделий сложной конфигурации.

Например, это изделия с резкими перепадами по высоте или поперечному сечению, протяженные тонкостенные изделия и другие. Трудности, связанные с получением однородных заготовок в этом случае, ограничивают применение статического прессования к изготовлению изделий подобной формы.

Преимуществами статического прессования в сравнении с другими способами уплотнения порошков являются высокая производительность и простота процесса и оборудования, высокая точность размеров получаемых заготовок и хорошая чистота их поверхности. Кроме того, применение статического прессования позволяет полностью механизировать и автоматизировать процесс формообразования.

Статическое прессование является основным промышленным способом формообразования изделий из пьезокерамики простой формы [3], а также широко используется для изготовления оксидно-цинковых варисторов в форме диска [4]. Отметим также способ изготовления варистора, основанный на применении двустороннего прессования с двумя перемещающимися навстречу друг другу пуансонами [5]. Указанным способом были получены крупногабаритные заготовки с диаметром 105 мм и высотой до 52 мм при плотности $2,87...3,02 \text{ г/см}^3$.

2.2. Изостатическое прессование. Изостатическое формообразование основано на приложении всестороннего давления, оказываемого рабочей средой на уплотняемый материал, помещенный в эластичную оболочку. Различают 1) гидростатическое и 2) квазиизостатическое прессование [1, 2, 6]. В первом случае в качестве рабочей среды используются жидкости: водные эмульсии различных масел, глицерин, вода с добавками ингибитора ржавчины. Эластичную оболочку изготавливают из резины, полиуретана или металлической фольги. Второй способ – формообразование в толстостенной эластичной оболочке, одновременно являющейся средой, оказывающей на порошок изостатическое давление. Оболочку изготавливают из твердых эластомеров: резины, синтетического каучука и других материалов.

Процесс гидростатического прессования осуществляется в камерах высокого давления, заполняемых жидкостью. Предварительно оболочку, помещаемую в камеру, заполняют порошком с применением вибрации, после чего оболочку вакуумируют и герметично закрывают. Применение вибрации позволяет достигнуть наиболее равномерного распределения плотности порошка в оболочке, иначе различия в плотности исходной засыпки приводят к существенным отклонениям от заданной формы заготовки. Вакуумирование, уменьшая содержание воздуха в порошке, снижает вероятность возникновения дефектов или

разрушения вследствие сильного увеличения давления запрессованного воздуха.

Квазиизостатическое прессование осуществляется на гидравлических и других прессах, т. е. на тех же установках, что и статическое прессование [7]. В металлическую пресс-форму помещают эластичную оболочку, сжимаемую во время процесса формообразования подвижными элементами пресс-формы. При заполнении порошком оболочки, так же как и в гидростатическом прессовании, может применяться вибрация.

Всестороннее давление исключает влияние внешнего трения на процесс уплотнения, и после изостатического прессования заготовки обладают высокой степенью равномерности распределения плотности. Кроме того, средняя плотность заготовок выше, чем в случае их статического прессования. При этом изостатическое прессование позволяет изготавливать изделия любой сложной формы, а также крупногабаритные изделия.

Основным недостатком изостатического прессования является сложность получения точных размеров и формы заготовок, что приводит к увеличению расходов на механическую обработку. Кроме того, для гидростатического прессования необходимо использовать сложную систему оборудования, включающую гидронасосы, вакуумный насос, компрессор, различные трубопроводы и другие устройства. Поэтому гидростатическое прессование является весьма дорогостоящим способом формообразования.

Применение гидростатического прессования для изготовления пьезокерамических дисков и колец различных размеров исследовалось в работах [8, 9]. Автором [8, 9] отмечено значительное улучшение электрофизических и механических свойств изготовленных образцов в сравнении с образцами, получаемыми с использованием статического прессования.

Квазиизостатическое прессование было применено для изготовления пьезокерамических цилиндров (с внешним диаметром 23 мм, а внутренним – 10 мм при высоте 65 мм), используемых в хирургических инструментах офтальмологических аппаратов [10, 11].

2.3. Шликерное литьё. Шликерное литьё применяют в основном для формообразования изделий сложной формы. Шликер представляет собой высококонцентрированную суспензию порошков, включающую твердую фазу (частицы порошка), жидкую фазу (связующее вещество) и добавки, улучшающие свойства шликера (текучесть, устойчивость и другие).

Формообразование изделий из шликеров может реализоваться различными способами. К основным из них относят: 1) литье в пористые формы, 2) электрофоретический способ, 3) литье из

термопластичных шликеров, состоящих из твердой фазы и термопластичной связки [12, 13].

По первому способу пористая форма, заполняемая шликером, впитывает жидкость благодаря капиллярному давлению. Частицы порошка, перемещаясь вместе с жидкостью, образуют на стенках формы постепенно утолщающийся слой. При достижении заданной толщины слоя оставшийся шликер удаляют, а после сушки из формы извлекают образовавшуюся на ее стенках заготовку. Перед обжигом (или спеканием) заготовка подвергается окончательной сушке.

Электрофоретический способ осуществляется перемещением твердых частиц шликера под действием электрического поля и осаждением их на стенках формы, являющейся анодом.

Для осуществления литья из термопластичного шликера последний нагревают до температуры, при которой термопластичная связка становится жидкой (при нормальных условиях связка твердая) и шликер приобретает необходимые свойства текучести. Затем расплавленному шликеру придают требуемую конфигурацию, например шликер заливают в металлическую форму. После охлаждения шликера до его затвердевания полученную отливку извлекают из формы. Перед обжигом термопластичную связку удаляют.

Преимуществом шликерного литья является возможность получать мало- и крупногабаритные изделия с равномерной по объему плотностью различной сложной конфигурации, в том числе тонкостенные полые изделия. Благодаря этому шликерное литье применяют в промышленности для изготовления пьезокерамических изделий сложной формы [3]. К недостаткам способа относятся значительная длительность процесса, необходимость сушильного оборудования.

Шликерное литье применяют и в процессах изготовления оксидно-цинковых варисторов (ОЦВ), например, в способе [14] по изготовлению миниатюрных варисторов с внешним диаметром 1,5...3,0 мм и внутренним – 1,0...1,5 мм.

2.4. Горячее прессование. Горячее прессование представляет собой совмещенный процесс формообразования и спекания [1, 6, 15]. Продолжительность воздействия давления прессования в отличие от процессов холодного формообразования значительно увеличивается. При этом в сравнении с обычным спеканием продолжительность процесса сокращается, и понижается максимальная температура процесса (на 100...400 °С). Понижение температуры для многих изготавливаемых из порошков материалов приводит к улучшению их микроструктуры, а, следовательно, и улучшению их физико-механических свойств. Кроме того, уменьшение максимальной температуры в ряде случаев предотвращает изменение фазового состава

материалов, обусловленное испарением отдельных компонент. Например, в процессах спекания пьезокерамики системы ЦТС испаряется оксид свинца PbO.

Существенной особенностью горячего прессования является отсутствие необходимости использовать пластифицирующую связку, добавляемую в керамические порошки перед их формообразованием. Связка полностью выгорает при спекании, но может являться причиной увеличения пористости, появления крупных пор и других дефектов.

Способом горячего прессования изготавливают образцы с высокой плотностью, близкой к теоретическому значению. В сравнении с технологией, использующей статическое прессование, существенно улучшаются физико-механические свойства материалов и эксплуатационные параметры изделий.

Преимущества горячего прессования позволили найти рассматриваемому способу широкое применение в технологии изготовления пьезокерамики [3, 16, 17]. Показана возможность применения горячего прессования и для формообразования оксидно-цинковой керамики [18]. Тем не менее, горячее прессование является сложным и дорогостоящим процессом, который характеризуется существенными ограничениями в отношении конфигурации изготавливаемых изделий.

3. Динамические способы формообразования

3.1. Взрывное (ударное) прессование [19, 20] основано на использовании энергии, выделяемой при детонации взрывчатого вещества. При взрыве на уплотняемый материал воздействует ударная волна, давление во фронте которой достигает 10 ГПа. Столь высокое давление обеспечивает получение заготовок с плотностью близкой к теоретическому значению. Кроме того, ударно-волновое воздействие существенно влияет на механизмы структурных преобразований в материале и приводит к активации материала перед высокотемпературным спеканием. Активация и высокая плотность заготовок позволяют понизить максимальную температуру спекания, что улучшает микроструктуру материалов и их физико-механические свойства, а также применить высокоскоростной нагрев. В тоже время, при взрывном прессовании возможны нежелательные эффекты: образование неуплотненной зоны в обрабатываемом материале, возникновение трещин, резкое увеличение объема материала при прохождении волны разгрузки и некоторые другие [20].

Способы взрывного прессования разделяют на 1) прямые и 2) непрямые [19, 20]. В первом случае взрывчатое вещество накладывалось непосредственно на контейнер, содержащий уплотняемый порошок. При взрыве ударная волна сжимает стенки контейнера и проникает в обрабатываемый материал. Во втором случае

детонация взрывчатого вещества приводит в движение метаемую пластину (или другое тело), воздействующую или через промежуточную среду, или непосредственно на контейнер с порошком.

Основное преимущество взрывного прессования – высокая плотность получаемых заготовок, следствием чего является и отсутствие значительной усадки при дальнейшем спекании образцов. Кроме того, не существуют ограничения на габариты изделий. К основным трудностям применения рассматриваемого способа относится низкий уровень научных представлений о механизмах ударно-волновых процессов в порошковых материалах при их уплотнении. Кроме того, способ характеризуется недостаточной воспроизводимостью результатов. Поэтому при разработке схем взрывного прессования обычно используют эмпирический подход, связанный с большим объемом технологических экспериментов и комплексных испытаний. Тем не менее, к настоящему времени отечественными исследователями доказана возможность применения взрывного прессования в технологии изготовления изделий из пьезокерамики [20–23]. Эксперименты показали достаточную эффективность взрывного прессования для изготовления изделий в форме дисков, колец, цилиндров (трубок) и пластин.

3.2. Вибрационные (низкочастотные) способы формообразования основаны на использовании механических колебаний, сообщаемых инструменту прессования и воздействующих на уплотняемый порошок непосредственно при протекании процесса формообразования [1, 2, 6]. Низкочастотными являются способы, использующие колебания с частотой, не превышающей 15 кГц (колебания с большей частотой являются ультразвуковыми). Отметим, что вибрационное воздействие широко применяют и на этапе, предшествующем процессу формообразования. Например, порошок, находящийся в пресс-форме, для первоначального его уплотнения подвергают свободной виброукладке, т. е. воздействию колебаний без приложения давления прессования. Вибрацию применяют и при засыпке порошка в пресс-форму, а также при заполнении порошком эластичной оболочки для последующего изостатического прессования.

Вибрационное воздействие на уплотняемый материал приводит к возникновению колебательных движений частиц порошка, ослабляющих силы межчастичного трения и разрушающих так называемые арочные соединения. Кроме того, колебания уменьшают и силы трения между порошком и контактирующей с ним поверхностью пресс-формы или оболочки. Уменьшение как внутреннего, так и внешнего трения создает условия для равномерного и плотного распределения частиц в занимаемом порошковым материалом объеме. Важно заметить, что влияние колебаний на процесс уплотнения

порошков зависит от их механических свойств. Наиболее эффективным является применение вибрационного воздействия для малопластичных высокотвердых порошковых материалов, для формообразования которых необходимы высокие значения давления прессования [24].

Способы вибрационного формообразования очень разнообразны. Применение того или иного способа зависит от формы и геометрических размеров изделий, а также от свойств уплотняемого материала. Прежде всего, способы различаются схемой приложения давления прессования и возбуждения колебаний, а также характером воздействия давления и колебаний. Применяют схемы как с непрерывным в течение процесса формообразования воздействием колебаний, так и с импульсным воздействием. В способах виброударного прессования используется импульсное воздействие давления.

Плотность заготовок при формообразовании, осуществляемом совместным воздействием статического давления прессования и механических колебаний, достигает той же величины, что и при статическом прессовании, но при меньших в несколько раз (иногда в десятки раз) значениях статического давления прессования [24]. С другой стороны, при одних и тех же значениях статического давления прессования плотность заготовок, полученных вибрационным формообразованием, выше, чем плотность заготовок после статического прессования. Увеличение средней плотности заготовок связано и с увеличением степени равномерности распределения плотности по объему заготовок. В то же время снижение величины статического давления способствует улучшению степени однородности заготовок.

Таким образом, неравномерность плотности в сравнении со статическим прессованием значительно снижается. Поэтому вибрационное формообразование применяют для получения изделий сложной конфигурации, изготовление которых возможно с использованием более дорогостоящих способов формообразования, например изостатических. Кроме того, применение вибрационного формообразования в сравнении со статическим прессованием улучшает физико-механические характеристики изделий и их эксплуатационные параметры. Вибрационное формообразование используют и для получения крупногабаритных изделий.

К недостаткам низкочастотных способов вибрационного формообразования относят высокие требования к прочности деталей, составляющих вибрационную установку и работающих в динамическом режиме. В ряде случаев необходимо использование виброизолирующих устройств. Кроме того, применение вибрационного формообразования связано с трудностями, обусловленными с невысоким уровнем развития теории, описывающей механизмы уплотнения порошковых материалов под воздействием колебаний.

Исследованию процесса вибрационного прессования пьезокерамики посвящена работа [25].

3.3. Ультразвуковое формообразование. Конструктивно-технологические схемы и экспериментальные результаты ультразвукового воздействия на уплотняемую порошкообразную среду, а также на шликер, приведены в работах [26, 27].

В настоящей работе мы будем рассматривать УЗФ как процесс, вибрационного уплотнения порошковых материалов совместным воздействием статического давления прессования и ультразвуковых колебаний (УЗК), возбуждаемых в элементах пресс-формы. В этом случае УЗК применяются для достижения более высокой, чем при статическом прессовании плотности заготовки при более равномерном распределении плотности по ее объему.

Установки для УЗФ порошковых материалов имеют конструктивно-технологические схемы, аналогичные схемам, разработанным для ультразвукового прессования металлов [28–30]. Отметим, что ультразвук успешно применяют для интенсификации процессов пластической деформации металлов при их обработке давлением (вытяжке, прессовании, прокатке) [28, 29]. В состав установки для УЗФ входит пресс, используемый также и для статического прессования, и ультразвуковая колебательная система. Основными элементами этой системы являются ультразвуковой генератор, подключаемые к нему преобразователи колебаний (магнитострикционного или пьезоэлектрического типа), а также элементы, осуществляющие передачу колебаний от преобразователей к пресс-форме.

Способы передачи УЗК к пресс-форме различны. Колебания сообщают либо матрице, либо пуансону (пуансонам), либо и матрице, и пуансону. Кроме того, в зависимости от способа передачи, в элементах пресс-формы возбуждаются колебания: продольные, поперечные (радиальные), крутильные или одновременно колебания различных типов. Продольные колебания совершаются вдоль направления действия статического давления прессования. Направление поперечных колебаний перпендикулярно направлению действия давления. Крутильные колебания совершаются в плоскости, перпендикулярной направлению действия давления, вокруг продольной оси пресс-формы.

Колебательная система, использующая схему с возбуждением продольных колебаний, подводимых к матрице (рис. 1), является одной из наиболее распространенных для УЗФ порошков [27, 31]. Для увеличения амплитуды колебаний, передаваемых в данном случае от магнитострикционного преобразователя к матрице, источник УЗК соединен со ступенчатым концентратором (трансформатором) колебаний.

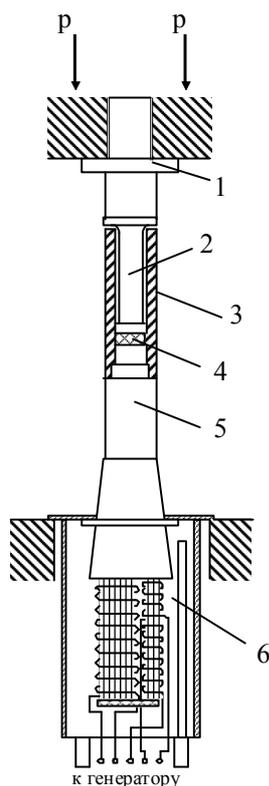


Рис. 1. Конструктивно-технологическая схема УЗФ с продольными колебаниями: 1 – отражатель, 2 – пуансон, 3 – матрица, 4 – уплотняемый порошок, 5 – ступенчатый концентратор колебаний, 6 – магнитострикционный преобразователь

В случае применения колебательной системы с возбуждением поперечных (радиальных) колебаний, источники УЗК соединяют с элементами пресс-формы вдоль их радиального направления. Например, в установке (рис. 2.) к матрице, а также к верхнему и нижнему пуансонам указанным способом подсоединены по 6 пьезокерамических преобразователей [32].

Для возбуждения в пресс-форме крутильных колебаний концентраторы колебаний подключают к матрице по касательной к ее поверхности через хомут, охватывающий центральную часть матрицы (рис. 3) [33].

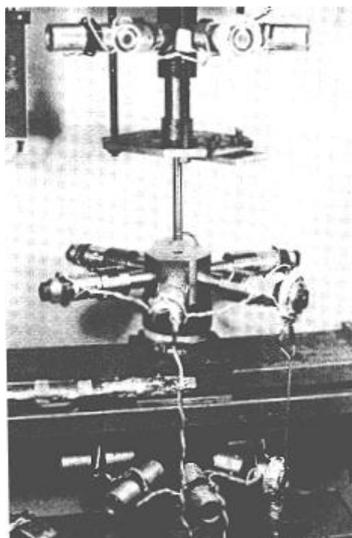


Рис. 2. Установка для УЗФ с пьезокерамическими преобразователями, подключаемыми к матрице и пуансонам в радиальном направлении

Продольные колебания магнитострикционных преобразователей, передаваемые концентраторам, вызывают перемещения хомута вокруг продольной оси матрицы. Благодаря колебательным перемещениям хомута в матрице и возникают крутильные колебания.

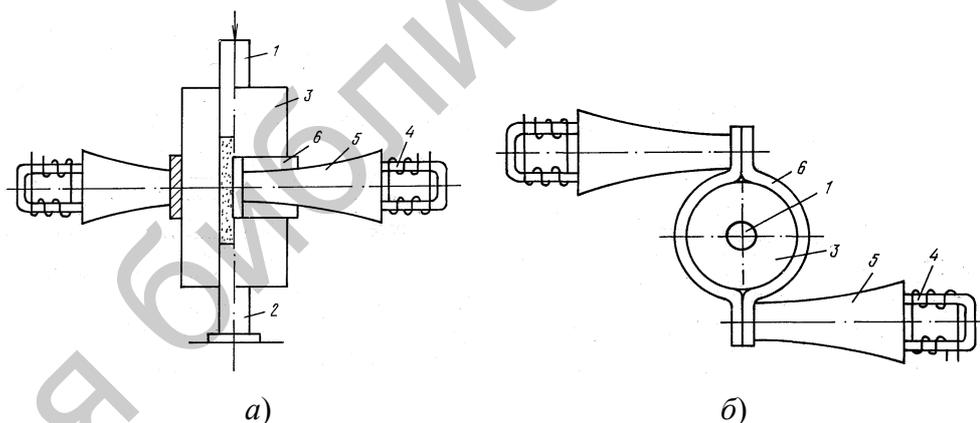


Рис. 3. Устройство для прессования изделий из порошков: а) общий вид; б) вид сверху; 1 – верхний пуансон; 2 – нижний пуансон; 3 – матрица; 4 – магнитострикционные преобразователи; 5 – концентраторы продольных колебаний; 6 – хомут

Способ формообразования цилиндрических заготовок [34] основан на использовании УЗК, возбуждаемых одновременно в двух направлениях: вдоль продольной оси матрицы и перпендикулярно этой оси (рис. 4). Колебания имеют одинаковые частоты и фазы, амплитуда поперечных колебаний составляет 0,2...0,35 от амплитуды продольных

колебаний. Таким образом, результирующее колебание имеет направление, составляющее $10...20^\circ$ с продольной осью матрицы.

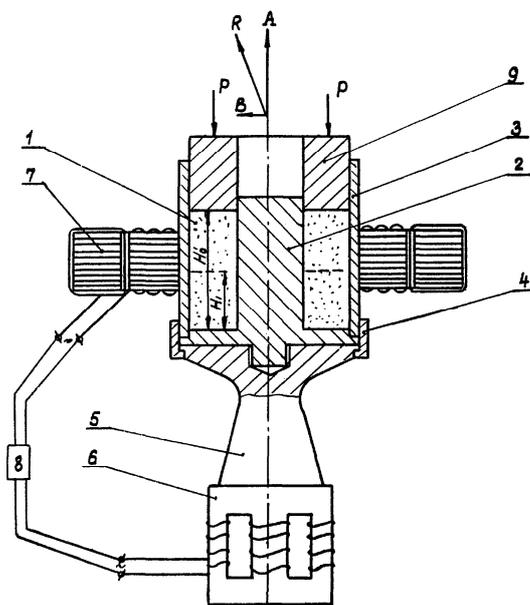


Рис. 4. Устройство для вибрационного формования изделий из порошка: 1 – уплотняемый порошок, 2 – центральный стержень матрицы, 3 – наружный цилиндрический корпус матрицы, 4 – кольцо, 5 – акустический излучатель, 6 – стержневой пакетный магнестрикционный излучатель, 7 – кольцевой (радиальный) пакетный магнестрикционный излучатель, 8 – генератор

Ряд способов УЗФ основан на использовании специально разработанных пресс-форм. Например, по способу [35], матрица выполнена в виде ультразвукового трансформатора скорости с плавно сужающимся в направлении от поддона к пуансону сечением (рис. 5). В матрице колебания возбуждаются кольцевым пьезокерамическим преобразователем, соединенным с ультразвуковым генератором. При этом соотношение размеров трансформатора скорости выбирается таким, чтобы обеспечить резонанс по моде продольных УЗК.

В работе [36] предложена пресс-форма, матрица которой является системой, состоящей из диска и стержня, выполненных как одно целое. Стержень имеет продольное осевое отверстие для уплотняемого материала. Продольная ось стержня перпендикулярна диаметральной плоскости диска. Диск соединяют с преобразователем магнестрикционного типа, возбуждающим в нем радиальные колебания. Использование диско-стержневой конструкции матрицы рассчитано на преобразование в стержне радиальных колебаний в продольные. В результате, ультразвуковое воздействие, оказываемое на

уплотняемый материал, является суперпозицией радиальных и продольных колебаний.

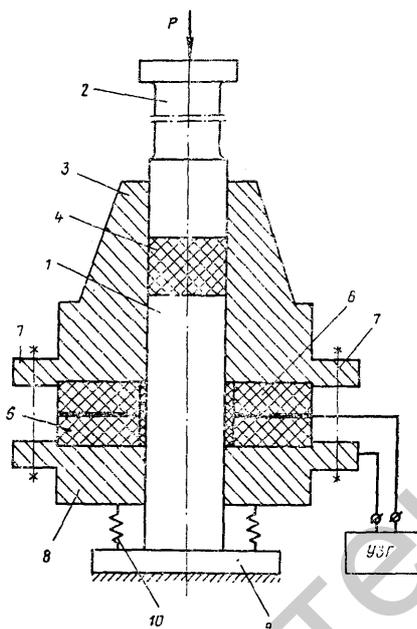


Рис. 5. Устройство для прессования изделий из порошковых материалов: 1 – поддон, 2 – пуансон, 3 – матрица, 4 – уплотняемый порошковый материал, 5 – ультразвуковой генератор, 6 – пьезоэлектрический вибратор, 7 – механическая болтовая стяжка, 8 – частотопонижающая накладка, 9 – станина пресса, 10 – гибкие элементы

Использование сравнительно простых колебательных систем и промышленного оборудования для статического прессования обеспечивает преимущество УЗФ перед низкочастотными вибрационными способами уплотнения. В последнем случае применяют специально разрабатываемые вибрационные прессы или иные установки, причем обычно массивных размеров.

В то же время процесс УЗФ остается недостаточно изученным; основные сведения о нем получены в рамках экспериментальных исследований. Это объясняется, прежде всего, сложностью явлений, протекающих в рабочей среде – мелкодисперсном порошке при возбуждении в ней УЗК. Поэтому разработанные к настоящему времени теоретические модели УЗФ носят в значительной степени качественный характер.

4. Экспериментальные исследования УЗФ

Ультразвуковое формообразование пьезокерамических дисков из материалов системы ЦТС исследовалось в работах [37–39].

Ультразвуковые колебания возбуждались в матрице, установленной на концентраторе колебаний, соединенном с магнитострикционным преобразователем. Из материалов ЦТС-19 и ЦТБС-3 были изготовлены пьезокерамические элементы (ПКЭ) диаметром 40 и высотой 2,5 мм при статических давлениях в 3...4 раза меньших, чем аналогичные образцы, изготовленные без воздействия УЗК.

Исследование микроструктуры пьезокерамических материалов изготовленных с применением УЗФ, проводилось методами электронной микроскопии, рентгеноспектрального микроанализа и микрокатодоллюминесцентного анализа. Установлено, что воздействие УЗК привело к снижению, по сравнению с контрольными образцами, пористости на 8...25 % и к уменьшению абсолютных размеров крупных пор в 1,5...2 раза, а также к большей однородности зернового состава.

Сравнение электрофизических (ЭФ) параметров ПКЭ показало, что использование УЗФ привело к их улучшению на 10...25 %.

В продолжение эксперимента с использованием УЗФ (с той же схемой возбуждения колебаний) были изготовлены крупногабаритные диски из материалов ЦТС-19 и ЦТБС-3 [40]. Пьезокерамические элементы диаметром 120 мм и высотой 3 мм по электрофизическим параметрам полностью соответствовали ОСТ [41] для данных материалов. Получение аналогичных образцов с требуемыми параметрами по промышленной технологии с использованием статического прессования не представляется возможным.

Исследование УЗФ пьезокерамических дисков с использованием вакуумной матрицы проводилось на образцах диаметром 16,1 мм [42]. Использовались навески порошка массой от 2...8 г (марка материала системы ЦТС не указана). Отношение высоты заготовки к ее диаметру изменялось в пределах 0,1...0,5. Ультразвуковые колебания частотой 20 кГц и амплитудой до 6 мкм, создаваемые пьезокерамическими преобразователями, возбуждались в верхнем и нижнем пуансонах.

Эксперименты (рис. 6 и 7) показали, что наибольшее приращение плотности, по сравнению со статическим прессованием, достигается для навески порошка массой 6 г при синфазных колебаниях пуансонов с максимальной амплитудой и одновременным вакуумированием матрицы.

Установлено, что сила трения между стенками матрицы и уплотняемым материалом уменьшается с увеличением амплитуды колебаний (рис. 8). При этом на зависимость между трением и амплитудой вакуумирование матрицы существенно не влияет. Также отмечено, что воздействие УЗК с одновременным вакуумированием привело к увеличению твердости (по Викерсу) образцов массой 6 г более, чем в 2 раза по сравнению с контрольными образцами.

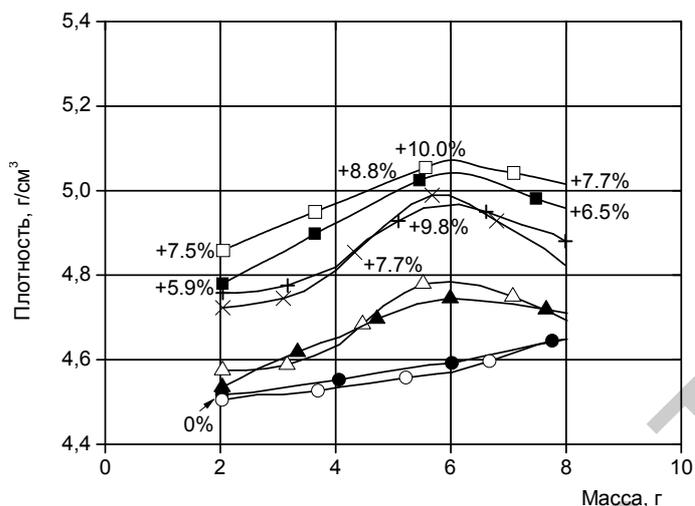


Рис. 6. Зависимость плотности пьезокерамических заготовок от массы порошка при различных амплитудах A синфазных колебаний пуансонов: статическое давление прессования 147 МПа; длительность процесса 10 с; отношение высоты заготовки к диаметру $H/D = 0,12 \dots 0,49$; \square и \blacksquare – $A = 6$ мкм; $+$ и \times – $A = 4$ мкм; Δ и \blacktriangle – $A = 2$ мкм; \circ и \bullet – $A = 0$; \square + Δ \circ – с применением вакуумирования матрицы; \blacksquare \times \blacktriangle \bullet – без вакуумирования

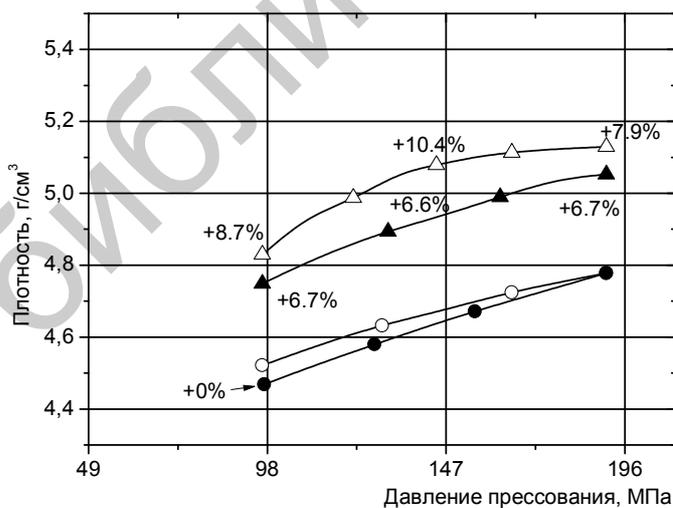


Рис. 7. Зависимость плотности пьезокерамических заготовок от статического давления прессования при синфазных колебаниях пуансонов с амплитудой 6 мкм: масса порошка 6 г; длительность процесса 10 с; отношение высоты заготовки к диаметру $H/D = 0,37$; Δ и \circ – с применением вакуумирования матрицы; \blacktriangle и \bullet – без вакуумирования; \circ и \bullet – без колебаний пуансонов

В работе [43] приведены результаты исследования процесса УЗФ пьезокерамических порошков из титаната бария. Ультразвуковые колебания частотой 22 кГц возбуждались в верхнем пуансоне, соединенным с магнитострикционным преобразователем. Амплитуда колебаний на торце пуансона изменялась в пределах 12...14 мкм. Статическое давление прессования, передаваемое на нижний пуансон, варьировалась в диапазоне 2...200 МПа.

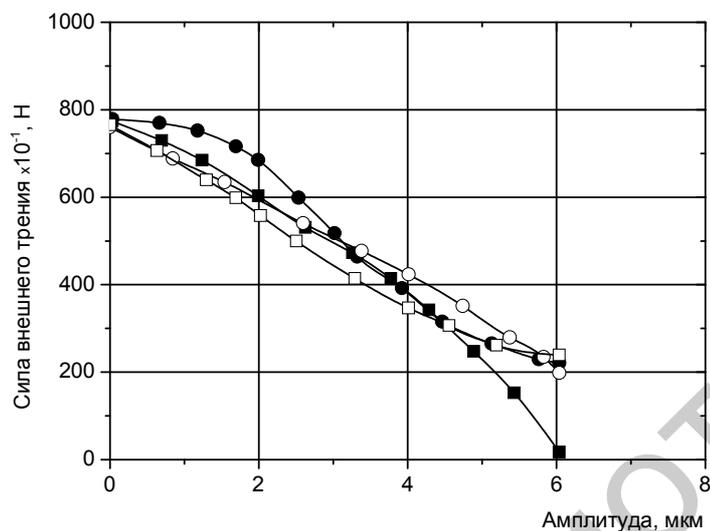


Рис. 8. Зависимость силы внешнего трения от амплитуды колебаний пуансонов: статическое давление прессования 147 МПа; длительность процесса 10 с; масса порошка 8 г; отношение высоты заготовки к диаметру $H/D = 0,49$; \circ и \bullet – синфазные колебания пуансонов; \square и \blacksquare – противофазные; \circ и \square – с применением вакуумирования матрицы; \bullet и \blacksquare – без вакуумирования

Установлено, что плотность образцов (диски диаметром 10 мм), изготовленных с применением УЗФ, как до, так и после спекания, выше, чем плотность образцов, полученных статическим прессованием, при равных давлениях прессования. Кроме того, с увеличением давления прессования различие в плотностях уменьшается.

Определены зависимости диэлектрической проницаемости (одного из основных параметров пьезокерамических элементов) от температуры для образцов, полученных сравниваемыми способами формообразования. Отмечено, что воздействие УЗК не изменило характер зависимости, но привело к увеличению диэлектрической проницаемости на 10...15 %.

Процесс уплотнения порошка титаната бария при различных способах формообразования исследовался методом голографической интерферометрии, описанным в [44]. Анализ расположения и формы

интерференционных полос показал, что при УЗФ порошок проходит те же стадии уплотнения, что и при статическом прессовании, но силы внешнего трения уменьшаются, поэтому заданная плотность достигается при меньших статических давлениях прессования.

Уменьшение трения при уплотнении керамических порошков под действием УЗК в значительной степени проявляется при формообразовании цилиндрических изделий. В экспериментальном исследовании [45] процесса УЗФ пьезокерамического материала ЦТС-23 проведены измерения перепада осевого давления между верхним и нижним пуансонами. Давление, воспринимаемое штифтами, встроенными в пуансоны и матрицу (рис. 9), измерялось мембранно-пленочными датчиками, подключенными к многоточечному измерителю давлений и усилий типа МПД [46]. Диаметр пьезокерамических заготовок составлял 20 мм, высота – от 20 до 40 мм. Ультразвуковые колебания совершались с амплитудой 25 мкм, длительность воздействия ультразвука составляла 5 с.

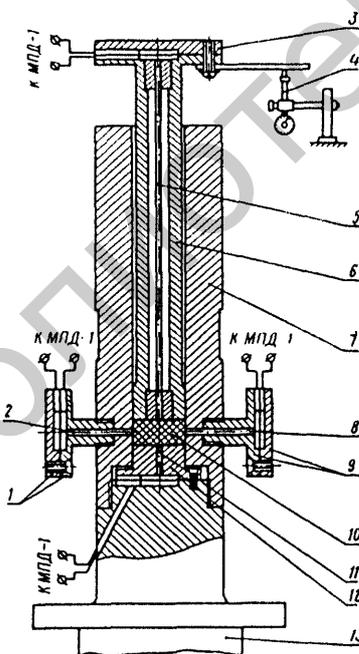


Рис. 9. Пресс-форма для исследования УЗФ пьезокерамики: 1, 3, 9 – корпуса датчиков; 2, 8 – штифты, воспринимающие боковое давление; 4 – индикатор ИЧ-10; 5, 11 – штифты, воспринимающие осевое давление; 6 – верхний пуансон; 7 – матрица; 10 – прессуемый порошок; 12 – нижний пуансон; 13 – ультразвуковой концентратор

Результаты эксперимента (рис. 10) показывают, что при статическом прессовании перепад давления достигает 50...85 % в

зависимости от высоты заготовки. При использовании УЗФ перепад давлений снижается до 15...30 %.

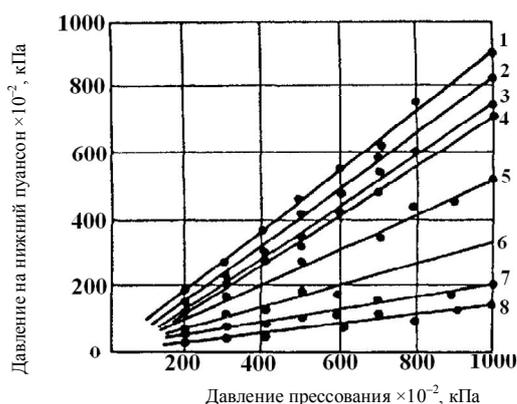


Рис. 10. Зависимость давления на нижний пуансон от давления прессования: 1-4 – УЗФ; 5-6 – статическое прессование. Высота заготовок: 1, 5 – 20 мм; 2, 6 – 27 мм; 3, 7 – 33 мм; 4, 8 – 40 мм

Воздействие ультразвука приводит и к увеличению бокового давления (рис. 11). Кроме того, после снятия давления прессования уменьшение бокового давления в случае статического прессования намного больше, чем в случае УЗФ. Полученные результаты свидетельствуют о достижении за счет УЗК более равномерного распределения плотности материала в заготовках. Также отмечено, что уменьшение трения приводит к увеличению и средней плотности. Так, заготовки диаметром 20 мм и высотой 40 мм, полученные с использованием УЗФ, имели плотность $5,45 \text{ г/см}^3$. Заготовки с теми же размерами, но после статического прессования – $5,10 \text{ г/см}^3$.

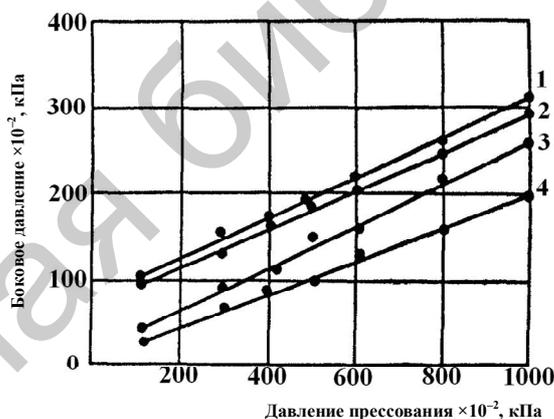


Рис. 11. Зависимость бокового давления от давления прессования для образцов диаметром 20 мм и высотой 10 мм. 1, 2 – УЗФ; 3, 4 – статическое прессование (1, 3 – под давлением; 2, 4 – при снятии давления)

Преимущества УЗФ перед статическим прессованием показали результаты исследования по формообразованию тонкостенных пьезокерамических цилиндров из материалов ЦТС-19 и ЦТБС-3 [47–49]. Учитывая влияние УЗК на внешнее трение, при УЗФ использовалась пресс-форма, предназначенная для получения цилиндрических заготовок с толщиной стенки меньшей, чем в случае статического прессования. При одинаковом внутреннем диаметре равном 11 мм внешний диаметр заготовок, получаемых УЗФ, составлял 18 мм, а получаемых статическим прессованием – 20 мм.

Ультразвуковое формообразование цилиндров осуществлялось с предварительной подпрессовкой статическим давлением 5...10 МПа при одновременном воздействии УЗК, подводимых к дну матрицы, установленной на концентраторе колебаний. Затем, также при воздействии УЗК, статическое давление увеличивали до 30...35 МПа.

Амплитуда колебаний составляла 10 мкм, продолжительность воздействия ультразвука 10 с. Статическое прессование осуществлялось при давлениях 90...100 МПа.

После выполнения последующих операций технологического процесса изготовления ПКЭ были получены образцы в форме цилиндров с внешним и внутренним диаметром 14 и 10 мм соответственно высотой 29 мм. Измерения и расчеты показали, что применение УЗФ привело к улучшению основных ЭФ параметров ПКЭ при одновременном снижении (в среднем на 30 %) разброса значений этих параметров в партиях ПКЭ.

Испытания образцов в сильном электрическом поле показали, что образцы, полученные с использованием УЗФ, обладают большей механической прочностью в сравнении с образцами, полученными статическим прессованием.

Кроме того, уменьшение толщины стенки формуемой заготовки снизило расход пьезокерамического материала более чем на 30 %, а также уменьшило стоимость и продолжительность механической обработки.

Исследования УЗФ тонкостенных пьезокерамических цилиндров были продолжены экспериментами [50] с использованием трехместной пресс-формы для заготовок из материала ЦТС-19 с толщиной стенки 2,5 мм (внешний диаметр заготовки 22 мм, внутренний – 17 мм). В сравнении с образцами, изготовленными статическим прессованием в опытах [49], толщина стенки была уменьшена почти на 45 %. Кроме того, в процессе изготовления пьезокерамических цилиндров был изменен режим высокотемпературного обжига: максимальная температура понижена с 1300 °С до 1200 °С.

Геометрические размеры изготовленных образцов составили: внешний диаметр – 18 мм, внутренний – 16 мм, высота – 27 мм. Таким образом, с использованием УЗФ были получены пьезокерамические

цилиндры с толщиной стенки 1 мм. При этом механические и электрофизические характеристики ПКЭ соответствовали ОСТ [41]. Получение аналогичных ПКЭ способом статического прессования является нетехнологичным, так как в этом случае процесс будет связан со значительным дополнительным расходом пьезокерамического материала.

Результаты применение УЗФ для изготовления оксидно-цинковых варисторов приведены в работах [40, 51–52]. Варисторы изготавливали из образцов оксидно-цинковой керамики (ОЦК) в форме дисков диаметром 30...60 мм и толщиной 2...10 мм. Формообразование ОЦК проводилось с использованием схемы одностороннего статического прессования при одновременном воздействии УЗК, подводимых к нижнему пуансону через концентратор колебаний от магнитострикционного преобразователя. Величина давления прессования по сравнению со способом статического прессования, используемого для изготовления аналогичных образцов, была уменьшена в 3...6 раз.

Воздействие УЗК привело к увеличению плотности готовых изделий в среднем на 15 %. Исследование структуры ОЦК методом растровой электронной микроскопии показало, что в образцах, полученных с использованием УЗФ, максимальные размеры пор уменьшились в 4...5 раз (в сравнении с образцами, полученными статическим прессованием). Также отмечено улучшение электрофизических и эксплуатационных параметров ОЦВ. В продолжение проведенных экспериментов были изготовлены образцы в форме дисков диаметром 120 мм [53–54].

5. Физические представления о механизме процесса УЗФ металлических и керамических порошков

Процесс уплотнения порошков сопровождается структурной деформацией материала (межчастичные перемещения) и деформацией самих частиц (упругой, пластической, хрупкой) с образованием и расширением зон контактов между ними. В теоретических исследованиях деформирования порошкообразной среды применяют два основных подхода: дискретно-контактный и континуальный. Первый подход основан на всестороннем анализе поведения частиц порошка при различных контактных взаимодействиях с привлечением статистической механики. Второй подход основан на анализе напряженно-деформированного состояния материала на базе механики сплошной среды и теории пластичности.

В задачи теории уплотнения порошков входит построение физической модели механизма уплотнения и установление зависимости средней плотности материала, а также ее распределения по объему заготовки от параметров процесса формообразования. Отметим, что

основными технологическими параметрами УЗФ являются давление прессования, амплитуда, частота и время воздействия УЗК.

Физический механизм уплотнения порошков зависит от способа формообразования. К настоящему времени наиболее изучены процессы статического и изостатического прессования [55–57], горячего изостатического прессования [58]. Для решения задач физико-математического моделирования процессов уплотнения применяют численные методы. К ним относятся метод конечных элементов [57, 59–61], метод проницаемых элементов [62], метод крупных частиц [63] и другие. Сопоставление расчетных результатов с экспериментальными показывает хорошую их сходимость [57, 60].

Механизм процесса УЗФ порошков рассматривается в основном на качественном уровне. Это объясняется, прежде всего, сложностью исследуемых явлений таких, как распространение ультразвуковых волн в неоднородной среде с изменяющимися физическими свойствами. Кроме того, почти полностью отсутствуют специальные методы исследования влияния УЗК на протекание процесса уплотнения, а эффективность ультразвукового воздействия оценивается по свойствам готовых изделий.

Теоретические исследования, например [24, 64–65], процессов вибрационного (низкочастотного) прессования не привели к установлению общих закономерностей. Кроме того, представления, развитые в ряде работ, например [66–67], справедливы, если масштаб моделируемых явлений значительно превосходит размер частиц порошка, т. е. к процессам УЗФ они не применимы (размеры частиц порошка и амплитуда УЗК имеют один порядок величины, за исключением порошков из наночастиц).

Общие положения качественного описания механизма УЗФ заключаются в следующем [27]. Ультразвуковые колебания, возбуждаемые в матрице или пуансоне, передаются частицам уплотняемого материала. За счет колебательного движения происходят перемещения частиц и их утряска. Более мелкие частицы заполняют пространство между крупными частицами, разрушаются крупные поры внутри образования (сфероиды, арочные соединения). Между частицами происходит расширение зоны контактов. Колебания уменьшают силы внешнего (между стенками инструмента и частицами порошка) 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.

Качественная физическая модель [37, 40] описывает уплотнение порошковой среды при создании в ней объемного трехмерного поля УЗК. В этом случае вектор колебательной скорости частиц

уплотняемого материала имеет три составляющие: одну продольную и две поперечные. Продольная составляющая направлена вдоль продольной оси пресс-формы, а одна из поперечных – по нормали к этой оси и вызывает радиальные колебания. Другая поперечная направлена тангенциально к указанной оси пресс-формы и вызывает крутильные (сдвиговые) колебания.

В трехмерном акустическом поле составляющие колебательного смещения частиц имеют разные фазы. Рассогласование фаз увеличивает интенсивность взаимного относительного перемещения частиц порошка. Кроме того, поперечные составляющие колебаний, изменяя граничные условия между частицами и стенками пресс-формы, значительно снижают потери статического давления прессования на преодоление сил внешнего трения. Перечисленные факторы обеспечивают высокую степень равномерного распределения плотности в объеме заготовки, включая случаи формообразования изделий сложной конфигурации [37, 40].

В ряде работ предложены аналитические зависимости между плотностью заготовки и давлением прессования применительно к УЗФ. Зависимости указанного типа называют уравнениями прессования [6]. Отметим, что в начале развития теории уплотнения порошков задача об определении уравнения прессования являлась одной из главных. Так как плотность зависит от целого ряда технологических факторов, то каждое из существующих уравнений прессования носит частный характер. Кроме того, ни одно из них не охватывает полностью всего интервала давлений и плотностей.

Уравнение, предложенное в работах [68–69] для процесса УЗФ металлических порошков, основано на уравнении прессования, предложенного Бальшиным [69]:

$$\rho = \left(\frac{P_0}{P_k} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad m = 1 - \frac{2}{P_0}, \quad (1)$$

где P_0 – величина статического давления, P_k – критическое давление прессования, P_0 – исходная пористость порошка. Плотность ρ в уравнении (1) является безразмерной величиной и называется относительной. Она определяется как отношение абсолютного значения плотности порошкообразного материала к плотности его твердой компоненты. Давление P_k соответствует значению $\rho = 1$ (так называемой теоретической плотности).

Относительная плотность $\rho_{УЗ}$ при УЗФ представлена суммой

$$\rho_{УЗ} = \rho + \Delta\rho_{УЗ}, \quad (2)$$

где ρ – относительная плотность при статическом прессовании (при той же величине статического давления), $\Delta\rho_{vз}$ – увеличение относительной плотности вследствие воздействия УЗК. По результатам экспериментального исследования [68] установлено, что изменение плотности $\rho_{vз}$ может быть представлено дифференциальным уравнением

$$d\rho_{vз} = K \frac{1-\rho_{vз}}{h} dA, \quad (3)$$

где h – высота формуемой заготовки, K – коэффициент пропорциональности. Решение уравнения (3) совместно с (2) приводит к выражению

$$\Delta\rho_{vз} = (1-\rho) \left[1 - \exp\left(-K \frac{A}{h}\right) \right]. \quad (4)$$

Учитывая зависимость (4.1), относительная плотность $\rho_{vз}$ равна

$$\rho_{vз} = \left(\frac{P'_0}{P_\kappa} \right)^{\frac{1}{m}} + (1-\rho) \left[1 - \exp\left(-K \frac{A}{h}\right) \right], \quad (5)$$

где P'_0 – величина статического давления при УЗФ, ρ – плотность, соответствующая давлению P'_0 при статическом прессовании.

Влияние ультразвука на плотность образцов из смесей карбида вольфрама предложено описывать уравнением [71], основанном на уравнении Кунина и Юрченко [72]:

$$\rho = \rho^{np} - \frac{K_0}{\alpha} \exp(-\alpha P), \quad (6)$$

где ρ^{np} – условная предельная плотность (соответствует бесконечно большому статическому давлению), K_0 – начальный коэффициент прессования, α – коэффициент потери сжимаемости при возрастании давления прессования, P – давление прессования. Величины ρ^{np} , K_0 и α являются характеристиками уплотняемого материала и определяются экспериментально.

Условная предельная плотность $\rho_{vз}^{np}$ при УЗФ равна

$$\begin{aligned} \rho_{vз}^{np} &= \rho_{СП}^{np} + \Delta\rho = \rho_{СП}^{np} \left(1 + \Delta\rho_{vз} / \rho_{СП}^{np} \right) = n_{vз} \rho_{СП}^{np}, \\ n_{vз} &= \left(1 + \Delta\rho_{vз} / \rho_{СП}^{np} \right), \end{aligned} \quad (7)$$

где $\rho_{СП}^{np}$ – условная предельная плотность при статическом прессовании, $\Delta\rho_{УЗ}$ – приращение условной предельной плотности при УЗФ.

На основании (6) и с учетом (7) плотность $\rho_{УЗ}$ заготовки при УЗФ

$$\rho_{УЗ} = n_{УЗ}\rho_{СП}^{np} - \frac{K_0}{\alpha} \exp(-\alpha P). \quad (8)$$

В отличие от уравнения (6) в зависимость (8) входит коэффициент $n_{УЗ}$ (для статического прессования $n_{УЗ} = 1$). Отмечено [71], что увеличение плотности за счет воздействия УЗК связано с изменением напряженного состояния уплотняемого материала. Введенный коэффициент отражает влияние ультразвука на плотность и зависит от акустических параметров. Так, с повышением амплитуды УЗК коэффициент $n_{УЗ}$ линейно возрастает. Экспериментально определенные значения $n_{УЗ}$ при $A = 25$ мкм находятся в пределах от 1,025 до 1,135 в зависимости от материала и содержания компонент смеси.

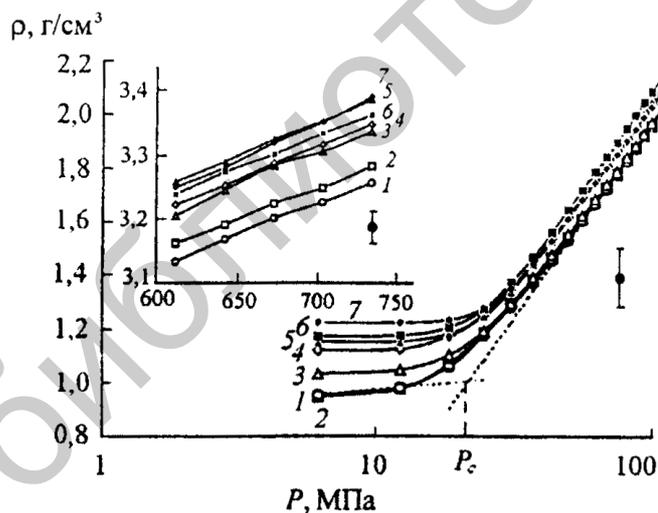
Значения плотности, рассчитанные по уравнению (8), и плотности образцов, полученных с использованием УЗФ, приведены в табл. 1 (числитель – расчетное значение, знаменатель – экспериментальное). Сравнение значений показывает, что различие между теоретическими и экспериментальными значениями не превышает 4,1 %.

Уравнение, предложенное в модели [73–74] УЗФ керамических нанопорошков, представляет собой модифицированное уравнение прессования Бережного [75]. Влияние УЗК уравнение прессования нанопорошков не отражает. Механизм процесса УЗФ в модели [73–74] представлен в качественной форме. Воздействие УЗК оценивается интенсивностью I акустических колебаний, определяемой по уровню мощности УЗК, подводимых к уплотняемой среде. Характер воздействия зависит от соотношения между величиной I и критическим значением интенсивности I_c , а также от соотношения между величиной статического давления прессования и критическим давлением P_c . Значение I_c определяется как порог изменения ультразвуковых эффектов, происходящих в дисперсной среде. При давлении прессования, равном P_c , происходит резкое изменение характера зависимости плотности от статического давления (рис. 12).

Таблица 1

Значения плотности (в г/см³) при УЗФ смесей на основе карбида вольфрама [71]

Состав Смесей	Давление прессования, МПа				
	20	40	60	80	100
WC +20% рэлита	8,97	9,33	9,55	9,76	9,86
	9,08	9,37	9,39	9,54	9,67
WC +8% СК	7,81	8,21	8,50	8,70	8,83
	8,14	8,30	8,41	8,44	8,52
BK8 +20% рэлита	8,50	8,90	9,19	9,39	9,52
	8,76	8,98	9,11	9,35	9,41
BK8	7,57	7,98	8,33	8,46	8,60
	7,74	8,12	8,21	8,38	8,52
BK15	7,05	7,45	7,74	7,94	8,07
	6,99	7,37	7,54	7,70	7,78



Р и с. 12. Кривые уплотнения при УЗФ с различной мощностью W ультразвукового воздействия: 1 – $W = 0$; 2 – $W = 0,25$ кВт; 3 – $W = 0,5$ кВт; 4 – $W = 1$ кВт; 5 – $W = 1,5$ кВт; 6 – $W = 2$ кВт; 7 – $W = 3$ кВт

Воздействие ультразвука аналитически выражено для величины, названной коэффициентом равноплотности заготовки $Q = \rho / \Delta\rho$, где ρ – плотность заготовки, $\Delta\rho$ – перепад плотности по высоте заготовки [74]. При этом влияние УЗК учтено уменьшением коэффициента внешнего трения. Из сравнения предложенных в модели формул для Q при УЗФ и статическом прессовании авторами [74] получено

выражение, определяющее условие положительного эффекта воздействия ультразвука на процесс формообразования (при каких амплитудах и одновременно частотах ультразвука происходит снижение перепада плотности).

Физическая модель [76] УЗФ керамических порошков построена на основе решения задачи в теории пластичности [55] по уплотнению порошкового материала в жесткой цилиндрической матрице с внутренним стержнем (рис. 13). В рассмотренной задаче [55] при ряде оговоренных допущений между главными напряжениями и относительной плотностью материала получены зависимости:

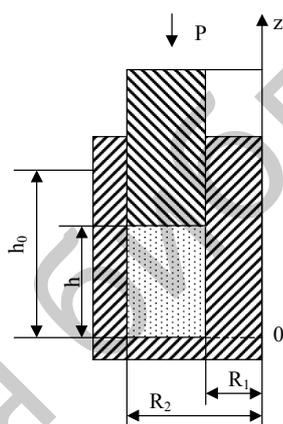
$$\frac{\sigma_z}{k} = -\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\rho^{3/2}}{(1-\rho)^{1/2}}, \quad \frac{\sigma_r}{k} = \frac{\sigma_\varphi}{k} = -\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\rho^{3/2}}{(1-\rho)^{1/2}} (3\rho - 1), \quad (9)$$

где k – предел текучести на сдвиг твердой фазы.

Давление прессования $P = -\sigma_z$ при $z = h$, т. е.

$$\frac{P}{k} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\rho_m^{3/2}}{(1-\rho_m)^{1/2}}, \quad (10)$$

где ρ_m – относительная плотность материала для слоя, прилегающего к верхнему пуансону.



Р и с . 13. Схема прессования: P – давление прессования, h_0 и h – начальная и текущая высота заготовки, R_1 и R_2 – внутренний и внешний радиус заготовки

По направлению от верхнего пуансона к дну матрицы плотность уменьшается, что обусловлено силами внешнего трения. Предположено, что трение оказывает влияние на узкие области, прилегающие к боковым поверхностям заготовки, следовательно, принято считать распределение плотности по поперечному сечению заготовки

равномерным. Сила трения подчиняется закону Кулона и ее удельная величина равна произведению $f \cdot |\sigma_r|$, где f – коэффициент трения. Величина f в задаче [55] считается не зависимой от плотности материала, т. е. f остается постоянной во время всего процесса уплотнения. Распределение плотности, рассчитанное в соответствии с решением задачи [55], имеет вид, представленный на рис. 14.

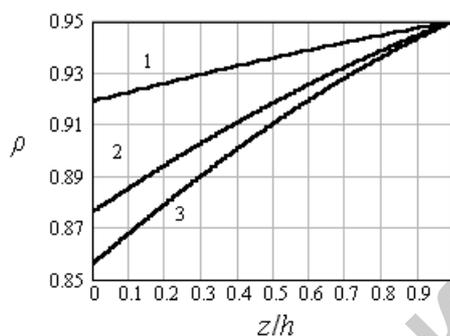


Рис. 14. Распределение плотности по высоте изделия:
 1 – $h_0 f / (R_2 - R_1) = 0,25$; 2 – $h_0 f / (R_2 - R_1) = 0,5$;
 3 – $h_0 f / (R_2 - R_1) = 0,6$

В модели [76] влияние ультразвука рассматривается как результат воздействия акустического давления, возникающего при распространении в уплотняемой среде продольных ультразвуковых волн. Кроме того, влияние ультразвука проявляется, согласно модели, в изменении условий внешнего трения на границе стенки пресс-формы и порошка. Указанное изменение обусловлено воздействием поперечных ультразвуковых колебаний и сводится к уменьшению средней за время процесса величины коэффициента трения.

Величина акустического давления ΔP определяется из уравнения состояния трехкомпонентной среды – порошкообразного материала из минеральных частиц с воздушными пространствами между ними и с введенным жидким пластификатором. Это уравнение состояния, предложенное Г.М. Ляховым [77] для водонасыщенного грунта, имеет вид:

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \sum_{i=1}^3 \alpha_i \left(\frac{\Delta P}{P_{0i}^*} + 1 \right)^{-\frac{1}{\gamma_i}}, \quad (11)$$

где P_{0i}^* , γ_i – параметры уравнений состояния газовой ($i=1$), жидкой ($i=2$) и твердой ($i=3$) компонент, α_i – объемные концентрации компонент, ρ и ρ_0 – текущая плотность смеси и плотность акустически

невозмущенной среды. Обоснованием использования уравнения (11) являются экспериментальные исследования по распространению акустических волн в средах, включающих газовую компоненту (пузырьки) [78].

Для гармонических волн при малых числах Маха ($M \ll 1$)

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{\rho_0 + (\rho_0 A \omega / c) \sin \omega t}{\rho_0} = \frac{c + A \omega \sin \omega t}{c}, \quad (12)$$

где c – скорость распространения звука в керамическом порошке, ω – частота (круговая) звуковых волн. Уравнение (11) при условии $M \ll 1$ преобразуется к выражению в форме Тэта

$$\frac{\Delta P}{P_0^*} + 1 = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma. \quad (13)$$

Эффективные параметры P_0^* и γ определяются из уравнений:

$$\gamma = \left(\sum_{i=1}^3 \alpha_i \frac{\gamma_i + 1}{(\rho_{0i} c_{0i}^2)^2} \right) \left(\sum_{i=1}^3 \frac{\alpha_i}{\rho_{0i} c_{0i}^2} \right)^{-2} - 1, \quad P_0^* = (\rho_0 c^2) / \gamma,$$

$$c = \left[\rho_0 \left(\sum_{i=1}^3 \frac{\alpha_i}{\rho_{0i} c_{0i}^2} \right) \right]^{-1/2} = \left[\left(\sum_{i=1}^3 \alpha_i \rho_{0i} \right) \left(\sum_{i=1}^3 \frac{\alpha_i}{\rho_{0i} c_{0i}^2} \right) \right]^{-1/2},$$

где ρ_{0i} – плотности компонент пористого материала, c_{0i} – линейно-акустические скорости звука в этих компонентах.

Учитывая акустическое давление в уравнение (10) введена поправка:

$$\frac{P + F(T_{tot}/T) \cdot \langle \Delta P \rangle}{k} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\rho_m^{3/2}}{(1 - \rho_m)^{1/2}}, \quad (14)$$

где $\langle \Delta P \rangle$ – среднее за период T УЗК значение акустического давления, вычисляемого по уравнениям (12)–(13), $F(T_{tot}/T)$ – функция, определяющая время, в течение которого УЗК увеличивают плотность формуемого материала, T_{tot} – общее время воздействия ультразвука. Под величиной k здесь понимают некоторую постоянную материала, характеризующую его пластические свойства. Это связано с тем, что задача из теории [55] рассматривалась для металлических порошков, а в модели [76] представления теории распространяются и на керамические порошки.

Уравнение (14) определяет уменьшение величины статического давления для достижения требуемой плотности в сравнении со значением давления при статическом прессовании. Уменьшение коэффициента трения f под воздействием УЗК влияет на распределение плотности вдоль высоты заготовки (рис. 15), а также увеличивает среднюю плотность материала.

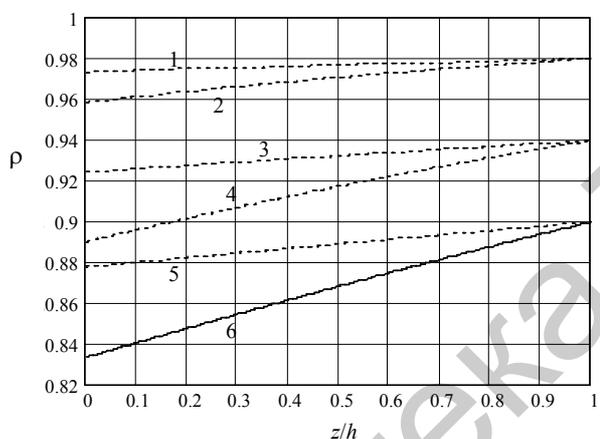


Рис. 15. Распределение плотности по высоте изделия: 1, 3, 5 – УЗФ; 2, 4, 6 – статическое прессование: $f_{v3} = 0,036$; $f = 0,1$; $\rho_0 = 0,6$; $h_0/(R_2 - R_1) = 10/3$

Результаты расчетов (рис. 15) показывают, что в наибольшей степени ультразвуковое воздействие проявляется на начальной стадии процесса уплотнения при пониженных статических давлениях, с увеличением давления прессования эффективность ультразвука снижается. Указанная закономерность, установленная расчетами, имеет и экспериментальное подтверждение, например [79].

Несмотря на введение функции $F(T_{tot}/T)$, влияние времени воздействия ультразвука в модели [76] не объясняется. Также отметим, из сравнения уравнений (10) и (14), правые части которых одинаковы, следует, что сумма статического и акустического давлений эквивалентна изменению свойств порошкового материала, определяющих его уплотнение. Следовательно, влияние ультразвука может быть учтено как зависимость k от параметров акустического воздействия.

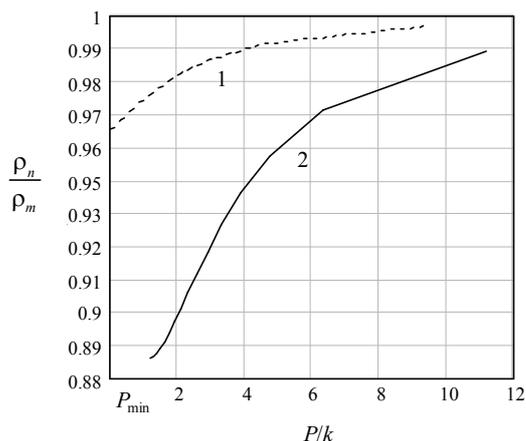


Рис. 16. Отношение плотности ρ_n материала на дне матрице к плотности ρ_m у пуансона в зависимости от давления прессования: 1 – УЗФ; 2 – статическое прессование

6. Модель формообразования оксидно-цинковой керамики

6.1. Уравнения теории течения порошковых материалов. В

основу настоящей модели положены результаты экспериментальных и теоретических исследований [57, 80–82] по уплотнению металлических порошков. Моделирование [57] процессов формообразования осуществляется с позиций теории упруговязкопластического неизотермического течения порошкового материала. При этом для решения уравнений задачи течения используется метод конечных элементов.

Уравнения равновесия определим из дифференциального вариационного принципа механики – начала виртуальных скоростей. Согласно принципу, мощность внутренних сил (напряжений) в объеме тела V на произвольном виртуальном поле скоростей U равна мощности внешних сил на том же поле скоростей. Условие равенства мощностей запишем в виде уравнения, называемого уравнением виртуальных мощностей

$$\int_V \sigma_{ij} \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV = \int_S p_i \delta U_i dS, \quad (15)$$

где σ_{ij} – тензор напряжений, $\dot{\epsilon}_{ij}$ – тензор скоростей деформации, p_i – компоненты внешних сил на поверхности S .

Представим тензоры σ_{ij} и $\dot{\epsilon}_{ij}$ в виде суммы девиаторной и гидростатической составляющих (суммы девиатора и шарового тензора):

$$\sigma_{ij} = S_{ij} + \delta_{ij}\sigma_0 \quad \text{и} \quad \dot{\epsilon}_{ij} = \eta_{ij} + \frac{1}{3}\delta_{ij}\dot{\epsilon}_0, \quad (16)$$

где S_{ij} – девиатор напряжений, σ_0 – гидростатическое давление, η_{ij} – девиатор скорости деформации, $\dot{\epsilon}_0$ – скорость объемной деформации, δ_{ij} – символ Кронекера. Преобразуя выражение для внутренней мощности, получим

$$\int_V S_{ij} \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV + \int_V \sigma_0 \delta \dot{\epsilon}_0 dV = \int_S p_i \delta U_i dS. \quad (17)$$

В матричной форме последнее уравнение имеет вид

$$\int_V \{\delta \dot{\epsilon}\}^T \{S\} dV + \int_V \delta \dot{\epsilon}_0 \sigma_0 dV = \int_S \{\delta U\}^T \{P\} dS. \quad (18)$$

В условиях рассматриваемого течения тензор скоростей деформации $\dot{\epsilon}_{ij}$ разложим на три составляющие: скорости упругой $\dot{\epsilon}_{ij}^e$, пластической $\dot{\epsilon}_{ij}^p$ и температурной ϕ деформации. Таким образом,

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^p + \delta_{ij}\dot{\phi}, \quad (19)$$

В соответствии с законом Гука скорость упругой деформации

$$\dot{\epsilon}_{ij}^e = \frac{\dot{S}_{ij}}{2G} + \delta_{ij} \frac{\dot{\sigma}_0}{3K}, \quad (20)$$

где G – модуль сдвига, K – модуль объемной деформации. Известно, что G и K выражаются через модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν :

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \text{и} \quad K = \frac{E}{3(1-2\nu)}.$$

Скорость пластической деформации, согласно [57], представим в виде

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \frac{S_{ij}}{2\mu^p} + \delta_{ij} \frac{\sigma_0}{3K^p}. \quad (21)$$

Здесь μ^p – коэффициент вязкости, K^p – скорость объемной деформации. В отличие от G и K величины μ^p и K^p зависят не только от механических свойств материала, но и от его напряженно-деформированного состояния.

Для численного решения задачи течения изменения напряженно-деформированного состояния определяются через малые конечные

интервалы времени $\Delta\tau$. Поэтому производные, входящие в (19) и (20), заменим конечными разностями:

$$\dot{S}_{ij} = \frac{S_{ij} - S_{ij}^*}{\Delta\tau}; \quad \dot{\sigma}_0 = \frac{\sigma_0 - \sigma_0^*}{\Delta\tau}; \quad \dot{\varphi} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta\tau} = \alpha \frac{\theta - \theta^*}{\Delta\tau}.$$

Знаком * отмечены значения, достигнутые на предыдущем временном промежутке, α – коэффициент линейного температурного расширения, θ – температура. Тогда тензор скоростей деформации

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{S_{ij}}{2\mu} + \delta_{ij} \frac{\sigma_0}{3\bar{K}} - \left(\frac{S_{ij}^*}{2G\Delta\tau} + \delta_{ij} \frac{\sigma_0^*}{3K\Delta\tau} - \delta_{ij} \frac{\Delta\varphi}{\Delta\tau} \right), \quad (22)$$

где введены следующие обозначения

$$\mu = \left(\frac{1}{G\Delta\tau} + \frac{1}{\mu^p} \right)^{-1} \quad \text{и} \quad \bar{K} = \left(\frac{1}{K\Delta\tau} + \frac{1}{K^p} \right)^{-1}. \quad (23)$$

Первое слагаемое левой части уравнений (17) и (18) представляет собой мощность, расходуемую на изменение формы, второе слагаемое – на изменение объема. Скорость объемной деформации $\dot{\varepsilon}_0$ равна

$$\dot{\varepsilon}_0 = \dot{\varepsilon}_0^e + \dot{\varepsilon}_0^p + 3\dot{\varphi} = \frac{\dot{\sigma}_0}{K} + \frac{\sigma_0}{K^p} + 3\dot{\varphi}. \quad (24)$$

Используя замену производных конечными разностями, получим

$$\dot{\varepsilon}_0 = \frac{\sigma_0 - \sigma_0^*}{K\Delta\tau} + \frac{\sigma_0}{K^p} + 3 \frac{\Delta\varphi}{\Delta\tau} = \frac{\sigma_0}{\bar{K}} - \frac{\sigma_0^*}{K\Delta\tau} + 3 \frac{\Delta\varphi}{\Delta\tau}. \quad (25)$$

На основании (25) запишем условие изменение объема

$$\int_V \delta\sigma_0 \left(\dot{\varepsilon}_0 - 3 \frac{\Delta\varphi}{\Delta\tau} \right) dV = \int_V \delta\sigma_0 \left(\frac{\sigma_0}{\bar{K}} - \frac{\sigma_0^*}{K\Delta\tau} \right) dV. \quad (26)$$

Осуществляя переход к численному решению задачи методом конечных элементов, заменим интегралы в уравнениях (18) и (26) суммами интегралов по конечным элементам r :

$$\sum_r \left(\int_{V^r} \{\delta\dot{\varepsilon}\}^T \{S\} dV^r + \int_{V^r} \delta\dot{\varepsilon}_0 \sigma_0 dV^r \right) = \sum_r \int_{S^r} \{\delta U\}^T \{P\} dS^r, \quad (27)$$

$$\sum_r \int_{V^r} \delta\sigma_0 \left(\dot{\varepsilon}_0 - 3 \frac{\Delta\varphi}{\Delta\tau} \right) dV^r = \sum_r \int_{V^r} \delta\sigma_0 \left(\frac{\sigma_0}{\bar{K}} - \frac{\sigma_0^*}{K\Delta\tau} \right) dV^r. \quad (28)$$

Воспользуемся соотношениями, связывающими напряжения и скорости деформации в конечном элементе r с узловыми значениями скоростей перемещения $\{U\}$ и гидростатического напряжения $\{\sigma_0\}$:

$$\begin{aligned} \{\dot{\varepsilon}\}^r &= [B]\{U\}, \\ \dot{\varepsilon}_0^r &= [I]\{\dot{\varepsilon}\}^r = [I][B]\{U\}, \\ \{U\}^r &= [N]\{U\}, \\ \sigma_0^r &= [N]\{\sigma_0\}, \\ \{S\}^r &= [N]\{S\}, \\ \Delta\phi^r &= [N]\{\Delta\phi\}, \end{aligned} \quad [B] = \begin{vmatrix} \frac{\partial[N]}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial[N]}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial[N]}{\partial z} \\ \frac{\partial[N]}{\partial y} & \frac{\partial[N]}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial[N]}{\partial z} & \frac{\partial[N]}{\partial y} \\ \frac{\partial[N]}{\partial z} & 0 & \frac{\partial[N]}{\partial x} \end{vmatrix},$$

где $[I] = [111000]$, $[N]$ – матрица функции формы.

Уравнение виртуальных мощностей (27) преобразуем к виду

$$\begin{aligned} & \sum_r \int_{V^r} \{\delta U\}^T [B]^T \left([D][B]\{U\} - \frac{1}{3}[D][I]^T [N] \frac{\{\sigma_0\}}{K} \right) dV^r + \\ & + \sum_r \int_{V^r} \{\delta U\}^T ([I][B])^T [N]\{\sigma_0\} dV^r = \sum_r \int_{S^r} \{\delta U\}^T [N]^T \{P\} dS^r - \\ & - \sum_r \int_{V^r} \{\delta U\}^T [B]^T [D] \left([N] \frac{\{S\}^*}{2G\Delta\tau} + [I]^T [N] \frac{\{\sigma_0\}^*}{3K\Delta\tau} - \right. \\ & \left. - [I]^T [N] \frac{\{\Delta\phi\}}{\Delta\tau} \right) dV^r \end{aligned} \quad (29)$$

где $[D]$ – матрица упруговязких свойств материала, равная

$$\begin{vmatrix} 2\mu & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 2\mu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ & & & \mu & 0 & 0 \\ & & & & \mu & 0 \\ & & & & & \mu \end{vmatrix}.$$

Так как виртуальное поле скоростей произвольно, то из (29) получим

$$\begin{aligned} & \sum_r \left(\int_{V^r} [B]^T [D] [B] dV^r \right) \{U\} + \\ & + \sum_r \left(\int_{V^r} \left(([I][B])^T [N] - \frac{1}{3\bar{K}} [B]^T [D] [I]^T [N] \right) dV^r \right) \{\sigma_0\} = \\ & = \sum_r \int_{S^r} [N]^T \{P\} dS^r - \frac{1}{\Delta\tau} \sum_r \int_{V^r} [B]^T [D] \left([N] \frac{\{S\}^*}{2G} + \right. \\ & \left. + [I]^T [N] \frac{\{\sigma_0\}^*}{3K} - [I]^T [N] \{\Delta\phi\} \right) dV^r \end{aligned} \quad (30)$$

Преобразуем также условие изменения объема (28):

$$\begin{aligned} & \sum_r \left(\int_{V^r} [N]^T [I] [B] dV^r \right) \{U\} - \left(\int_{V^r} \frac{1}{\bar{K}} [N]^T [N] dV^r \right) \{\sigma_0\} = \\ & = - \sum_r \frac{1}{\Delta\tau} \left(\int_{V^r} [N]^T [N] dV^r \right) \left(\frac{\{\sigma_0\}^*}{K} - 3\{\Delta\phi\} \right) \end{aligned} \quad (31)$$

Выражение (30) представляет собой три уравнения равновесия для каждого узла сетки конечных элементов. Вместе уравнения (30) и (31) образуют систему разрешающих уравнений относительно узловых значений скоростей перемещений и гидростатического давления.

Приступая к поэтапному (за промежутки $\Delta\tau$) решению задачи текучести, следует задать начальные приближенные значения параметров μ и \bar{K} . Критерием точности подбора значений является соблюдение условия пластичности при выполнении ассоциированного закона течения. С заданными значениями решается система уравнений (30) и (31), а затем определяются все компоненты тензоров σ_{ij} и $\dot{\epsilon}_{ij}$.

По найденному значению скорости объемной пластической деформации $\dot{\epsilon}_0^p$ вычисляется плотность материала, достигнутая на рассмотренном этапе

$$\rho = \rho^* / \exp(\dot{\epsilon}_0^p \Delta\tau), \quad (32)$$

где ρ^* – значение плотности на предыдущем этапе.

Переход к следующему этапу возможен только после проверки условия пластичности в случае его выполнения с требуемой точностью.

Если условие с требуемой точностью не выполнено, то необходимо провести следующее приближение для параметров μ и \bar{K} . С новыми значениями параметров повторить решение системы уравнений (30) – (31) и остальные расчеты, а затем снова проверить условие пластичности.

6.2. Уравнение предельного состояния порошкового материала (условие пластичности). Ассоциированный закон течения имеет вид

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \lambda \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_{ij}}, \quad (33)$$

где λ – множитель Лагранжа, Φ – функция от компонент тензора напряжений. Условием пластичности (условием текучести) является уравнение, называемое уравнением предельного состояния материала.

$$\Phi(\sigma_{ij}) = 0, \quad (34)$$

В настоящей модели за условие пластичности принято уравнение, предложенное в результате исследований [80-81] и имеющее вид

$$\Phi = \frac{T^2}{\tau_s^2} + A\sigma_0 + B\sigma_0^2 + C\sigma_0^3 = 0. \quad (35)$$

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

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

где p_s – предел текучести при гидростатическом сжатии, c – предел уплотнения.

Подстановка (35) в закон течения (33) приводит к уравнению

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \lambda \left[\frac{S_{ij}}{\tau_s^2} + \delta_{ij} \left(\frac{1}{3}A + \frac{2}{3}B\sigma_0 + C\sigma_0^2 \right) \right]. \quad (36)$$

Сопоставим выражение (36) с уравнением теории течения (21), получим

$$\mu^p = \frac{\tau_s^2}{2\lambda}, \quad K^p = \frac{1}{\lambda D}, \quad D = \frac{A}{\sigma_0} + 2B + 3C\sigma_0. \quad (37)$$

Воспользуемся следующими соотношениями из теории течения

$$\sigma_0 = K^p \dot{\epsilon}_0^p \quad \text{и} \quad T = \mu^p H^p = \mu^p \sqrt{2\eta_{ij}^p \eta_{ij}^p}, \quad (38)$$

где H^p – интенсивность скоростей пластических деформаций сдвига. Тогда, учитывая (37) и (38), условие пластичности (35) перепишем в виде

$$\Phi = \frac{(\tau_s H^p)^2}{4\lambda^2} + A \frac{\dot{\epsilon}_0^p}{\lambda D} + B \frac{(\dot{\epsilon}_0^p)^2}{\lambda^2 D^2} + C \frac{(\dot{\epsilon}_0^p)^3}{\lambda^3 D^3} = 0.$$

Отсюда получим квадратное уравнение для нахождения λ

$$A \frac{\dot{\epsilon}_0^p}{D} \lambda^2 + \left[\frac{(\tau_s H^p)^2}{4} + B \frac{(\dot{\epsilon}_0^p)^2}{D^2} \right] \lambda + C \frac{(\dot{\epsilon}_0^p)^3}{D^3} = 0. \quad (39)$$

Таким образом, использование условия пластичности (35) позволяет осуществлять итерационный процесс решения задачи пластичности с единственным варьируемым параметром λ . Множитель λ является функцией от величин p_s , τ_s и c , а также напряженно-деформированного состояния на рассматриваемой стадии уплотнения. Связь между λ и изменяющимися в процессе уплотнения величинами μ^p и K^p , а также μ и \bar{K} устанавливается выражениями (23) и (37).

Адекватность рассматриваемой модели применительно к процессу формообразования порошка из оксида цинка, была проверена численным экспериментом [83]. Определение значений механических характеристик p_s , τ_s , c и построение кривых предельного состояния – кривых текучести (рис. 17 и рис. 18) – для оксидно-цинковой керамики осуществлялось экспериментально в соответствии с методикой, представленной в работах [81-82].

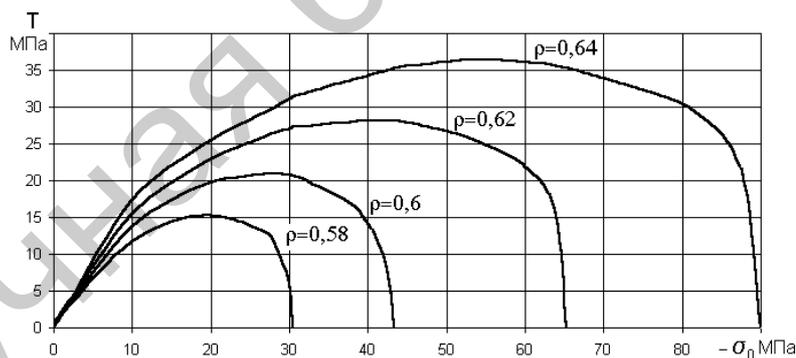


Рис. 17. Кривые текучести в области относительной плотности $\rho = 0,58 \dots 0,64$

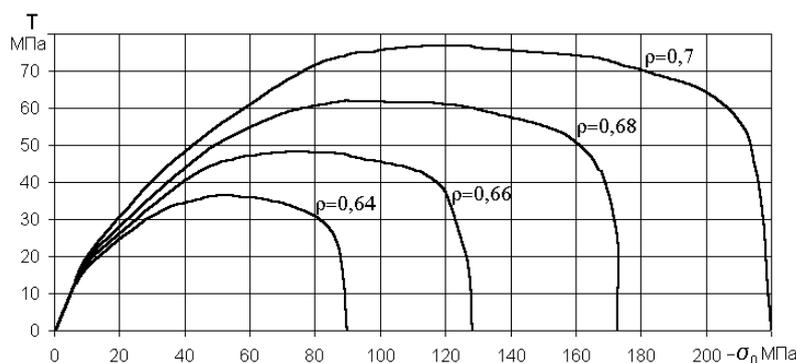


Рис. 18. Кривые текучести в области относительной плотности $\rho = 0,64 \dots 0,7$

6.3. Расчетное и экспериментальное исследование процесса прессования диска. Объектом исследования являлось изделие из оксидно-цинковой керамики в форме диска диаметром 56 мм. Расчетная часть состояла в решении задачи пластического течения с использованием уравнения предельного состояния (35) и механических характеристик p_s , τ_s , c . Эксперименты проводились на производственном участке изготовления электрофизической керамики и предусматривали измерение плотности при задаваемых значениях усилия пресса.

Расчеты процесса прессования образцов диаметром 56 мм выполнялись за 13 шагов нагружения от начальной относительной плотности $\rho = 0,355$ до $\rho = 0,656$ на сетке конечных элементов. Здесь имеется в виду усредненная по объему плотность, определяемая исходя из массы и объема заготовки.

Расчетное распределение плотности, напряжений и деформаций по объему прессовки при наличии трения о стенки матрицы носит неравномерный характер. Основная часть сечения диска имеет относительную плотность, соответствующую средней по объему ($\rho = 0,656$).

В области боковой поверхности, где при прессовании действовали силы контактного трения, имеются небольшие отклонения от этой средней величины: сверху, в районе пуансона относительная плотность несколько выше ($\rho = 0,69$), снизу – до $\rho = 0,62$. Зона неравномерной деформации при малом отношении h/d охватывает лишь тонкий слой боковой поверхности диска.

На рис. 19 результаты расчета процесса прессования заготовки диаметром 56 мм сопоставлены с результатами измерений, проведенных на производственном участке изготовления электрофизической керамики. Можно говорить о достаточно точном совпадении результатов расчета и результатов измерений во всем

диапазоне относительных плотностей. Это подтверждает обоснованность уравнения предельного состояния (35) и надежность определения механических характеристик p_s , τ_s и c .

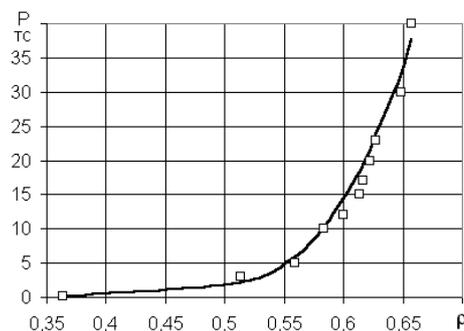


Рис. 19. Зависимость усилия пресса от средней относительной плотности при прессовании образцов диаметром 56 мм (сплошная линия – расчетная, маркеры – значения, измеренные в ходе эксперимента)

6.4. Влияние ультразвука. Для оценки влияния трения были выполнены расчеты процесса прессования при коэффициенте трения $f = 0,5$ и при отсутствии трения. При заданных размерах прессуемых изделий (диаметр 56, высота 6...10 мм) влияние трения на общее давление прессования не превышает 2...3 %, т. е. находится в пределах точности измерений. Таким образом, в данном случае влияние ультразвука на снижение усилия пресса не следует связывать с изменением условий контактного трения.

Для выяснения количественной оценки влияния ультразвука параллельно с экспериментами проводилось прессование дисков при тех же давлениях с одновременным воздействием ультразвука. Результаты эксперимента сведены в табл. 2.

Воздействие ультразвука можно оценить как некое дополнительное давление, приводящее к достижению той же плотности. На рис. 20 показаны расчетные зависимости от относительной плотности $\Delta\sigma_z$ – дополнительного осевого давления и $\Delta\sigma_0$ – дополнительного гидростатического напряжения.

Данные зависимости носят немонотонный характер. Одно и то же воздействие ультразвука дает максимальное дополнительное давление в очень узком диапазоне изменения плотности ($\rho = 0,56...0,62$). Казалось бы, функции $\Delta\sigma_z(\rho)$ или $\Delta\sigma_0(\rho)$ должны быть возрастающими, так как с увеличением плотности растет модуль упругости и тем самым звуковое давление. Это и наблюдается в области плотностей $\rho = 0,36...0,58$. При $\rho > 0,65$ воздействие ультразвука либо

не вызывает эффекта, либо приводит даже к некоторому разуплотнению материала, наблюдаемому в эксперименте.

Таблица 2

Вычисление дополнительного давления за счет действия УЗК

Давление прессования	Способ формообразования						Дополнительное давление	
	Статическое Прессование			УЗФ				
$P_{уд}$ МПа	ρ	σ_z МПа	σ_0 МПа	ρ	σ_z МПа	σ_0 МПа	$\Delta\sigma_z$ МПа	$\Delta\sigma_0$ МПа
0,4	0,364	0,89	0,45	0,385	1,05	0,53	0,16	0,08
12,2	0,513	8,80	5,00	0,552	22,30	13,50	13,50	8,50
20,3	0,560	25,48	15,49	0,592	49,82	31,89	24,34	16,40
40,6	0,583	41,13	25,98	0,622	87,00	60,00	45,87	34,02
48,7	0,600	57,68	37,12	0,618	81,05	55,37	23,35	18,25
60,9	0,613	73,70	48,70	0,627	93,07	64,74	19,37	16,04
69,0	0,616	78,20	52,80	0,630	97,50	68,30	19,30	15,50
81,2	0,622	87,00	60,00	0,634	104,0	73,40	17,00	13,40
93,4	0,627	93,07	64,74	0,636	106,42	75,58	13,35	10,84
121,9	0,648	127,2	92,90	0,651	134,1	97,40	6,90	4,50
162,5	0,657	143,7	106,1	0,655	141,5	104,8	-2,20	-1,30

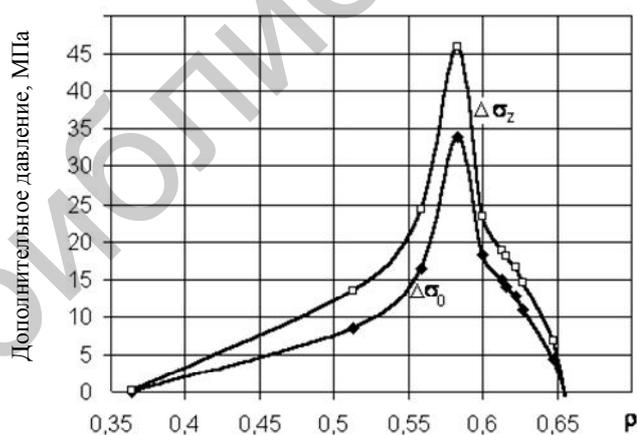


Рис. 20. Дополнительное давление от воздействия ультразвука частотой 18 кГц с амплитудой колебаний 15 мкм в зависимости от относительной плотности

Этот эффект можно объяснить, обратившись к рис. 17 и рис. 18. Небольшое увеличение гидростатического давления 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 (слева от точки максимума — предела уплотнения), соответствующей положительной объемной

деформации, – разрыхлению материала. Поэтому уплотнить материал свыше $\rho = 0,66$ не удастся ни ультразвуком, ни увеличением усилия пресса.

Очевидно, время воздействия ультразвука при прессовании должно быть весьма непродолжительным. При достижении определенной плотности (для данного материала $\rho = 0,55 \dots 0,60$) влияние ультразвука не приводит к дальнейшему уплотнению материала. Гидростатическое давление, вызванное воздействием ультразвука, продолжает возрастать, что должно приводить к повышению плотности; но вместе с тем предел уплотнения (c) смещается вдоль гидростатической оси в сторону меньших значений. Увеличивающаяся интенсивность касательных напряжений (T) вызывает эффект разрыхления. Здесь наглядно проявляется явление дилатансии – зависимости между характеристиками сдвиговой и объемной деформации.

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. Витязь П.А., Капцевич В.М., Косторнов А.Г. и др. Формирование структуры и свойств пористых порошковых материалов М.: Металлургия, 1993. 240 с.
3. Глозман И.А. Пьезокерамика. М.: Энергия, 1972. 288 с.
4. José M. Cavenaghi, André L. Molisani, Humberto N. Yoshimura, Vânia Caldas De Sousa. Influence of compaction manufacturing process on the physical and electrical characteristics of high-voltage varistor // J. Mater. Sci: Materials in Electronics. 2007. V. 18. № 9. P. 957–962.
5. Патент РФ № 2192060. Способ изготовления варистора // Лякишев Н.П., Алымов М.И., Анкудинов А.Б. и др. Оpubл. 2002.
6. Попильский Р.Я., Пивинский Ю.Е. Прессование порошковых керамических масс. М.: Металлургия, 1983. 176 с.
7. Тимохова М.И. Квазиизостатическое прессование керамических изделий. Аналитический обзор // ВНИИЭСМ Промышленность строительных материалов. Серия 5. Керамическая промышленность. 1990. Вып. 1. 68 с.
8. Погосов В.Г. Основы технологии изготовления высококачественных пьезокерамических элементов из материалов системы ЦТС с применением гидростатического прессования // Автореф. дис. Л.: 1984.
9. Погосов В.Г. Возможность использования холодного изостатического прессования при получении пьезокерамических элементов // Неорганические материалы. 1984. Т. 20. № 9. С. 1578–1581.
10. Литвинова Н.А., Тимохова М.И., Рачков В.С. Изготовление трубчатых пьезоэлементов методом квазиизостатического прессования // Новости медицинской техники. Научные труды ВНИИМП. 1981. Вып. 5. С. 38–39.
11. Тимохова М.И., Рачков В.С., Сильвестров Ю.Н. Квазиизостатическое прессование трубок // Стекло и керамика. 1987. № 9. С. 17–18.

12. Добровольский А.Г. Шликерное литье. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Металлургия, 1977. 240 с.
13. Дудник Е.В., Зайцева З.А., Шевченко А.В., Лопато Л.М. Методы формования дисперсных порошков на основе диоксида циркония (обзор) // Порошковая металлургия. 1993. №8. С. 16–23.
14. Патент РФ № 2046417. Способ изготовления оксидноцинковых варисторов // Попова Т.Ю.; Медведев Ф.К.; Горбунова Л.Д. Опубл. 1995.
15. Дорофеев Ю.Г., Гасанов Б.Г., Дорофеев В.Ю. и др. Промышленная технология горячего прессования порошковых изделий М.: Металлургия, 1990. 206 с.
16. Окадзаки К. Технология керамических диэлектриков М.: Энергия, 1976. 336 с.
17. Панич А.Е., Куприянов М.Ф. Физика и технология сегнетокерамики. Ростов-на-Дону: Изд. РГУ, 1989. 180 с.
18. Лелюк Д.Н., Глот А.Б. Получение оксидно-цинковой керамики методом горячего прессования // Неорганические материалы. 1991. Т. 27. № 1. С. 149–151.
19. Прюммер Р. Обработка порошкообразных материалов взрывом: пер. с нем. М.: Мир, 1990. 128 с.
20. Рогозин В.Д. Взрывная обработка порошковых материалов. Волгоград: ВолГТУ, 2002. 136 с.
21. Розен А.Е. Научные основы технологии взрывного прессования сегнетокерамических материалов // Технология. Серия: Конструкции из композиционных материалов. 1996. № 1. С. 39–44.
22. Атрощенко Э.С., Розен А.Е., Голованова Н.В. и др. Взрывное прессование сегнетокерамических материалов // Технология металлов. 2000. № 9. С. 3–8.
23. Рогозин В.Д., Писарев С.П., Казак В.Ф. Ударное прессование и спекание пьезокерамики ЦТС-19 // Физика и химия обраб. Материалов. 2007. № 2. С. 70–73.
24. Шаталова И.Г., Горбунов Н.С., Лихтман В.И. Физико-химические основы вибрационного уплотнения порошковых материалов. М.: Наука, 1965. 164 с.
25. Чагин Д.И., Иващенко В.В., Карташев И.А. и др. Виброимпульсное формование пьезокерамики на основе цирконата-титаната свинца // Порошковая металлургия. 1989. № 4. С. 17–19.
26. Lehfeldt E. The effect of ultrasonic vibrations on the compacting of metal powders // Ultrasonics. 1967. №5. P. 219–223.
27. Агранат Б.А., Гудович А.П., Нежевенко Л.Б. Ультразвук в порошковой металлургии. М.: Металлургия, 1986. 168 с.
28. Северденко В.П., Клубович В.В. Применение ультразвука в промышленности Минск: Наука и техника, 1967. 261 с.
29. Харитонович М.В., Эскин Г.И. Ультразвук в процессах пластической деформации металлов и сплавов. Обзор отечественной и зарубежной литературы 1955–1969 гг. ВИЛС, 1970. 112 с.
30. Красниченко Л.В., Литвиненко В.И., Гребенсков Н.П. Некоторые особенности прессования металлических порошков в ультразвуковом поле

- //Применение новых материалов в сельскохозяйственном машиностроении Ростов-на-Дону, 1969. С. 82–87.
31. Костин Л.Г., Бучек Л.Т., Шкиль В.М. Схемы ультразвукового прессования порошковых материалов и инженерные методы расчета акустической системы // Порошковая металлургия. 1971. № 4. С. 13–17.
 32. Tsujino J., Ueoka T., Yabuzaki M. et al Studies on the ultrasonic vibration press of powder with longitudinal vibration punches and various mode dies // Ultrasonic technology 1987: Toyohashi Intern. Conf. on Ultrasonic technology, Toyohashi, Japan. 1987. P. 313–322.
 33. А.С. СССР № 1184605 Устройство для прессования изделий из порошков // Ухов Е.И., Терещенко Г.В. Оpubл. 1985.
 34. А. С. СССР № 954184 Способ вибрационного формования изделий из порошка // Печатников М.Н., Гриневиц В.И., Батков Г.С. и др. Оpubл. 1982.
 35. А. С. СССР № 464383 Устройство для прессования изделий из порошковых материалов // Генералов М.Б., Чичёв А.Н., Пешковский С.Л. и др. Оpubл. 1975.
 36. А. С. СССР № 1574367 Способ уплотнения порошка // Лунин И.Ф., Алехин А.Н., Борзяк М.Б. и др. Оpubл. 1990.
 37. Харитонов Д.О. Физика и техника ультразвукового формообразования пьезокерамики, // Автореф. дис. СПб, 2000.
 38. Легуша Ф.Ф., Попов Н.М., Пугачев С.И., Харитонов Д.О. Ультразвуковое формообразование тонких пьезокерамических дисков // Тр. IV междунар. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-98. Новосибирск, 1998. Т. 15. С. 26–27.
 39. Красавина М.А., Легуша Ф.Ф., Пугачев С.И., Харитонов Д.О. Ультразвуковое формообразование в технологическом процессе изготовления изделий из неметаллических порошков // Сб. докладов 3 междунар. конф. по морским интеллектуальным технологиям МОРИНТЕХ-99 СПб, 1999. Т. 1. С. 235–237.
 40. Ерофеев А.А., Красавина М.А., Легуша Ф.Ф. и др. Ультразвуковое формообразование изделий из электрофизической керамики // Тр. V междунар. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-2000 Новосибирск, 2000. Т. 3. С. 62–65.
 41. ОСТ II 0444-87. Материалы пьезокерамические. Технические условия. М.: 1987. 141 с.
 42. Tsujino J., Ueoka T., Suzuki H. et al. Ultrasonic vibration press of metal and ceramics powder using complex vibration and vacuum condition // Ultrasonic symposium. 1991. P. 973–978.
 43. Клубович В.В., Высоцкий В.К., Бобровская Г.С. и др. Прессование порошков титаната бария с наложением ультразвуковых колебаний // Весці АН Беларусі, Сер. фіз.-тэхн. н. 1994. № 3. С. 16–19.
 44. Бахтин В.Г. Разработка и внедрение метода голографической интерферометрии для исследования и совершенствования процесса прессования металлических порошков // Автореф. дис. М., 1983.
 45. Иманов Г.М., Мешкова Р.И., Пугачев С.И., Сеницкий В.А. Исследование процесса прессования пьезокерамики с применением емкостных датчиков давления // Технология судостроения. 1974. № 7. С. 54–55.

46. Мешкова Р.И., Синицкий В.А. Мембранно-пленочные датчики для технологического контроля усилий и давлений // *Технология судостроения*. 1974. № 3. С. 83–85.
47. Рытов Е.Ю. Ультразвуковое формообразование тонкостенных протяженных пьезокерамических цилиндров // Автореф. дис. СПб, 2004.
48. Попов Н.М., Пугачев С.И., Рытов Е.Ю., Семенова Н.Г. Ультразвуковое формообразование пьезокерамики // *Труды 6 междунар. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики»*. СПб, 2002. С. 270–273.
49. Рытов Е.Ю. Ультразвуковое формообразование тонкостенных пьезокерамических цилиндров // *Материалы региональной НТК «Кораблестроительное образование и наука-2003»*. СПб, 2003. Т. 2. С. 420–425.
50. Рытов Е.Ю. Оптимизация технологии ультразвукового формообразования тонкостенных пьезокерамических цилиндров // *Материалы региональной НТК «Кораблестроительное образование и наука-2005»* СПб, 2005. Т. 2. С. 408–413.
51. Красавина М.А., Легуша Ф.Ф., Пугачев С.И. Ультразвуковое формообразование оксидноцинковых варисторов // *Доклады III Всерос. НПК «Новое в экологии и безопасности жизнедеятельности»* СПб, 1998. Т. 2. С. 106–108.
52. Красавина М.А., Пугачев С.И. Ультразвуковое формообразование оксидноцинковых варисторов // VII Симпозиум «Электротехника 2010» М.: 2003. Т. 1. С. 323–325.
53. Патент РФ № 2171177 Способ формования изделий из дисперсных материалов // Ерофеев А.А., Красавина М.А., Легуша Ф.Ф. Оpubл. 2001.
54. Патент РФ № 2183532 Способ формообразования изделий из многофазных материалов // Ерофеев А.А., Красавина М.А., Легуша Ф.Ф. Оpubл. 2002.
55. Друянов Б.А. Прикладная теория пластичности пористых тел. М.: Машиностроение, 1989. 168 с.
56. Григорьев А.К., Рудской А.И. Деформация и уплотнение порошковых материалов. М.: Металлургия, 1992. 192 с.
57. Рыбин Ю.И., Рудской А.И., Золотов А.М. Математическое моделирование и проектирование технологических процессов обработки металлов давлением. СПб: Наука, 2004. 644 с.
58. Atkinson H.V., Davies S. Fundamental aspects of hot isostatic pressing: an overview // *Metallurgical and materials transactions*. 2000. V. 31A. P. 2981–3000.
59. Петросян Г.Л. Пластическое деформирование порошковых материалов. М: Металлургия, 1988. 154 с.
60. Михайлов О.В., Штерн М.Б. Численное моделирование процессов прессования порошковых изделий сложной формы в жестких матрицах: влияние схемы прессования на распределение плотности. II. Методика моделирования и анализ схем формования // *Порошковая металлургия*. 2003. № 3/4. С. 7–16.
61. Shima S. Finite element simulation of compaction // *Int. journal of powder metallurgy*. 2002. V. 38. Is. 2. P. 41–47.

62. Олевский Е.А., Штерн М.Б., Сердюк Г.Г. и др. Определение поля плотности при прессовании изделий сложной формы методом проницаемых элементов // Порошковая металлургия. 1989. № 3. С. 15–21.
63. Новофастовский А.Л. Математическое моделирование процесса прессования порошков методом крупных частиц // Порошковая металлургия. 1989. № 12. С. 4–7.
64. Спасский М.Р. Физико-химическое моделирование динамики вибрационного уплотнения порошков // Автореф. дис. Москва, 1988.
65. Волошин-Челпан Э.К., Кадыкова Н.С. Закономерности предельного равновесия порошкового материала в процессе вибрационного прессования // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2004. № 4. С. 3–5.
66. Ивлев Ю.А., Максименко А.Л., Малюшевский П.П., Мирошниченко Е.К. Закономерности виброимпульсного уплотнения труднодеформированных порошковых материалов. I. Теория динамического поведения несвязно-гранулированных сред // Порошковая металлургия. 1996. № ½. С. 22–27.
67. Ивлев Ю.А., Максименко А.Л., Малюшевский П.П., Мирошниченко Е.К. Закономерности виброимпульсного уплотнения труднодеформированных порошковых материалов. II. Теоретический анализ виброимпульсного уплотнения непластичных порошков // Порошковая металлургия. 1996. № ¾. С. 11–15.
68. Жданович В.М. Исследование процесса прессования металлических порошков с наложением ультразвуковых колебаний // Автореф. дис. Минск, 1969.
69. Коновалов Е.Г., Жданович В.М. Влияние ультразвуковых колебаний на уплотняемость металлических порошков // ДАН БССР. 1971. Т. XV. № 3. С. 219–221.
70. Бальшин М.Ю. Порошковое металловедение М.: Металлургиздат, 1948. 332 с.
71. Бучек Л.Т. Исследование эффективности прессования смесей на основе карбида вольфрама с наложением ультразвуковых колебаний // Автореф. дис. Киев, 1977.
72. Кунин Н.Ф., Юрченко Б.Д. Закономерности прессования порошков различных материалов // Порошковая металлургия. 1963. № 6. С. 3–10.
73. Хасанов О.Л., Двилис Э.С., Похолков Ю.П. и др. Механизмы ультразвукового прессования керамических порошков // Перспективные материалы. 1999. № 3. С. 88–94.
74. Хасанов О.Л., Соколов В.М., Двилис Э.С. и др. Ультразвуковая технология изготовления конструкционной и функциональной нанокерамики // Перспективные материалы. 2002. № 1. С. 76–83.
75. Бережной А.С. О зависимости между давлением прессования и пористостью необожженных огнеупорных изделий // Огнеупоры 1947. № 3. С. 124–130.
76. 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.
77. Ляхов Г.М. Основы динамики взрывных волн в грунтах и горных породах. М.: Недра, 1974. 192 с.

78. Дружинин Г.А. Волны в средах с пузырьками // Сб. тр. VI сессии РАО. М., 1997. С. 7–12.
79. Siwkiewicz Z., Filipowicz W., Stolarz S. Untersuchungen über den Einfluß von Ultraschallschwingungen beim Pressen von Eisenpulver // Planseeberichte für Pulvermetallurgie. 1977. 25. № 4. P. 255–262.
80. Рыбин Ю.И., Цеменко В.Н., Александров А.Э.. Математическая модель уплотнения порошковых металлических материалов // Металлообработка. 2004. № 6 (24). С.45–49.
81. Александров А.Э. Разработка методов математического моделирования технологий обработки давлением порошковых и пористых материалов // Автореф. дис. СПб, 2009.
82. Цеменко В.Н. Деформирование порошковых сред. СПб: Изд. СПбГТУ, 2001. 104 с.
83. Красавина М.А., Попов Н.М., Рытов Е.Ю. и др. Разработка модели уплотнения оксидноцинковой керамики при прессовании // Металлообработка. 2006. № 5–6 (35–36.) С. 53–58.

ULTRASONIC MOLDING FOR ELECTROPHYSICAL CERAMICS

S. I. Pugachev, E. Yu. Rytov

St. Petersburg State Marine University
Chair of Physics

Physical and technical aspects of the process of shaping piezoceramic materials of the lead zirconate-titanate system (LZT) finding its use for the preparation of piezoceramic elements and ceramics on the basis of zinc oxide for varistors are considered. The results of experimental studies of domestic and foreign authors on the ultrasound shaping of products are presented. An analysis is given of the theoretical formulation of the mechanisms of metal and ceramic powder densification under the action of both static pressing and ultrasound forces. The results of calculations made by the authors during modeling of the shaping process of piezo- and zinc-oxide ceramics are presented.

Keywords: *ultrasound, shaping, powder densification, piezoceramics, zinc-oxide ceramics*

Об авторах:

ПУГАЧЕВ Сергей Иванович – доктор техн. наук, профессор кафедры физики Санкт-Петербургского государственного морского технического университета, 190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д.3; *e-mail*: spugachev@bk.ru;

РЫТОВ Евгений Юрьевич – кандидат техн. наук, доцент кафедры физики Санкт-Петербургского государственного морского технического университета.