

УДК 621.793:62-52(075.8)

## АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ, МЕТОДОВ И СИСТЕМ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

О.О. КУЗНЕЧИК

(Институт порошковой металлургии, Минск);

канд. техн. наук В.О. КУЗНЕЧИК

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

*Приведен аналитический обзор методов электроимпульсной обработки порошковых материалов и покрытий (ЭИО ПМП), включая методы и системы адаптивного управления технологическими процессами (САУ ТП). Показано, что в этих методах используются гносеологические и идентификационные математические модели для описания поведения объекта управления (ОУ) – ПМП при взаимодействии с источником воздействия (ИВ) – технологической установкой, имеющей функциональное и конструктивное сходство с машинами контактной сварки. На основании анализа предложено для стабилизации функциональных свойств получаемых ПМП использовать метод и систему адаптивного управления процессом ЭИО. Рекомендовано в гносеологической модели ОУ на стадии упругой подпрессовки учитывать влияние межконтактных промежутков частиц порошка на процесс контактообразования и кинетику уплотнения ПМП, а в идентификационной модели ЭИО ПМП – использовать регулятор для корректировки режимов воздействия, задаваемых ИВ, с учетом текущего состояния ПМП.*

**Введение.** Анализ [1 – 8] тенденций развития таких отраслей промышленности, как машиностроение, атомная и общая энергетика, металлургия и химическая промышленность, показал, что эти отрасли испытывают постоянную потребность в перспективных конструкционных материалах и покрытиях с повышенным комплексом эксплуатационных свойств, способных выдерживать высокие удельные механические и тепловые нагрузки. Кроме этого указанные отрасли промышленности, включая радиоэлектронную промышленность и медицину, также остро нуждаются в перспективных проницаемых материалах и покрытиях, обеспечивающих капиллярную транспортировку (или удержание в порах) жидкостей или газов. Учитывая, что запасы сырья и топлива, из которых возможно получение и обработка перспективных конструкционных материалов и покрытий, в мире ограничены, а их потребление неуклонно возрастает, серьезными проблемами, стоящими перед экономикой любой страны (или группы стран), являются:

- выбор правильного соотношения между добывающими, перерабатывающими и потребляющими отраслями народного хозяйства;

- внедрение в производство различных ресурсосберегающих и энергосберегающих технологий, основанных на рациональном использовании исходного сырья и вторичных ресурсов.

Решению этих проблем, как следует из анализа работ [1 – 4, 7 – 11], может помочь порошковая металлургия, технологии которой по таким показателям, как коэффициенты использования материала и энергии, приходящейся на единицу продукции, имеют преимущество по сравнению с литьем и механической обработкой. Кроме этого, порошковая металлургия позволяет не только вести безотходное производство, но и сокращать трудовые затраты за счет уменьшения количества технологических операций и автоматизации технологических процессов. В связи с этим данная отрасль производства во всем мире имеет устойчивые темпы развития. Наиболее перспективными являются технологии, основанные на импульсной обработке порошковых материалов и покрытий (ПМП), обеспечивающей выделение кратковременных высококонцентрированных потоков механической, тепловой или электромагнитной энергии в контактных зонах частиц порошка или его зерен. К ним относятся электроимпульсное формование, а также спекание, припекание и наплавка, составляющие основу технологий электроимпульсной обработки (ЭИО) ПМП. В отличие от традиционных технологий спекания, импульсная обработка позволяет получать ПМП с компактной или проницаемой структурой, структурный элемент которой может сохранять морфологию материала исходных частиц порошка. Основное достоинство ЭИО заключается в том, что при определенных условиях в контактных зонах порошковых частиц, испытывающих упругую деформацию, вызванную действием механического давления, за короткий промежуток времени ( $\sim 10^{-5} \dots 10^{-2}$  с) могут формироваться высококонцентрированные потоки тепловой энергии ( $\sim 10^5 \dots 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>). Благодаря этому получаемые ПМП могут иметь как компактную, так и проницаемую структуру и обладать комплексом физико-механических свойств, повышающих их функциональные возможности. Стабилизация этих свойств зависит от способа и метода управления технологическими режимами ЭИО порошковых материалов и покрытий, к которым относятся, например, методы и системы адаптивного управления, широко применяемые в машиностроении при механической обработке, литье и т.д. [7 – 11].

Несмотря на широкое применение методов и систем адаптивного управления в различных отраслях промышленности [12 – 16], для электроимпульсной обработки ПМП они не разработаны. Сдерживающим

фактором в этом направлении является недостаточная изученность процессов электроимпульсного формования, спекания, припекания и наплавки металлических порошков как объекта управления. В работах [17 – 19], посвященных теоретическим и практическим исследованиям процессов электроимпульсной обработки металлических порошков, рассматривают лишь частные аспекты проблемы адаптивного управления технологическими режимами электроимпульсного формования, спекания и наплавки.

Данная работа посвящена исследованию и разработке принципов адаптивного управления процессами ЭИО порошковых материалов и покрытий.

**Анализ методов электроимпульсной обработки порошковых материалов и покрытий.** Разработка и совершенствование перспективных методов, включающих в себя способы осуществления, модели кинетики уплотнения порошка и системы управления этими процессами, способствующие получению ПМП с уникальным, повышенным или стабилизированным комплексом физико-механических и структурных свойств, является актуальной задачей для порошковой металлургии. В качестве варианта решения этой задачи в тридцатых годах прошлого столетия в США был предложен способ [20] получения таких материалов в результате спекания упругоподпрессованных металлических порошков при протекании через них электроимпульсного тока. Дальнейшее развитие этого способа привело к возникновению различных методов получения ПМП, которые в силу исторических причин получили следующие наиболее часто упоминающиеся в порошковой металлургии названия:

- в странах Евросоюза, США и Канады – «Electroconsolidation», «High Energy High Rate Processing (HEHR)», «Electric Discharge Compaction (EDC)», «Spark Plasma Sintering (SPS)» и «Field assisted sintering technique (FAST)» [21 – 29];

- в странах СНГ – «электроконтактное спекание», «электроразрядное спекание (ЭРС)» и «электроимпульсное спекание (ЭИС)» [30 – 43].

Общим для перечисленных в работах [21 – 43] методов является то, что они позволяют получать ПМП с использованием электроимпульсной энергии и электроимпульсного тока. Исходя из этого при проведении анализа методов SPS, Electroconsolidation, EDC, FAST, электроконтактного спекания, ЭРС и ЭИС в качестве обобщенного названия будем использовать ЭИО ПМП, что не противоречит ГОСТ 17359-82. В работах [40, 41] предложена классификация этих методов, согласно которой они по способу протекания электрического тока через упругоподпрессованный порошок могут делиться на три основные группы. При этом к первой группе относятся методы, которые используют прямое протекание электроимпульсного тока через подпрессованный порошок, ко второй – косвенное, а к третьей – комбинированное.

Особенностью методов ЭИО ПМП, относящихся к первой группе, является то, что они применимы только в отношении электропроводных порошков или порошковых сред, формирующих определенную электропроводную среду, состоящую из порошковых частиц, в контактных зонах которых под действием электроимпульсного тока формируются высококонцентрированные ( $10^4 \dots 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>) тепловые потоки.

Особенностью методов ЭИО ПМП, относящихся ко второй группе, является то, что они основаны на протекании электроимпульсного тока через определенную электропроводную среду, преобразующую импульсную энергию в высококонцентрированные тепловые или силовые потоки, вызывающие уплотнение порошковой среды. При этом в качестве электропроводной среды могут использоваться не только электромагнитное поле или плазма, но и материал матриц или заготовок деталей. К ним относятся, например, индукционное центробежное спекание [37, 40], порошковая плазменная и электронно-лучевая наплавка [40], магнитоимпульсное формование [8, 37, 40]. С помощью этих методов можно получать ПМП как из электропроводных, так и не электропроводных порошков или порошковой среды.

В работах [40 – 43] показано, что методы ЭИО ПМП, относящиеся к первой группе, не всегда обеспечивают равномерное протекание электроимпульсного тока через порошок или порошковую среду, что приводит к формированию ПМП с неравномерной структурой и неоднородными физико-механическими свойствами. Указанные недостатки отсутствуют в методах третьей группы, в которых используется комбинированное протекание электроимпульсного тока как через порошок, так и через взаимодействующую с ним электропроводную среду (например, через материал матрицы) [33, 35].

Из анализа работ [8, 9, 22 – 41] следует, что методами ЭИО ПМП можно получать изделия из порошков железа, никеля, молибдена, алюминия, титана, ниобия, тантала и вольфрама, самофлюсующихся и твердосплавных сплавов, в том числе на основе карбидов, боридов и оксидов для машино-, приборостроения и медицины. Для реализации этих методов можно использовать технологические установки, включающие в себя либо машины контактной или индукционной сварки [37, 35, 39 – 46], либо их узлы: электропривод с накопителем электроимпульсной энергии и разрядным контуром с электродами-пуансонами или индуктором, механизмы сжатия, перемещения и вращения, пневматический и гидравлический привод. С помощью данных методов в упругоподпрессованном порошке могут возникать давления порядка 0,1...100 МПа в зависимости от усилия сжатия.

По типу накопителя электроимпульсной энергии технологические установки, применяемые для реализации методов ЭИО ПМП можно разделить на конденсаторные, трансформаторные и индукционные. В установках индукционного типа в составе разрядного контура используется высокочастотный индуктор, подключенный к генератору импульсных токов, у которого генерируемая частота может быть

порядка  $10^3 \dots 10^6$  Гц. В зависимости от геометрии индуктора и действующей силы тока ( $10 \dots 100$  А), длительность ЭИО порошка может быть как порядка нескольких десятков секунд, так и нескольких десятков минут, что обеспечивает возможность получения ПМП как с открытой (30...40 %), так и остаточной (менее 10 %) поровой структурой. С помощью технологических установок данного типа возможен индукционный нагрев ПМП, поэтому они используются для реализации методов ЭИО, основанных на косвенном протекании электроимпульсного тока через порошок или порошковую среду.

С помощью технологических установок конденсаторного или трансформаторного типа, к числу которых можно отнести и те, что используют в своей конструкции инверторные источники питания, могут осуществляться методы ЭИО ПМП, основанные на прямом, косвенном или комбинированном протекании электроимпульсного тока через порошок.

Технологические установки конденсаторного типа, обеспечивающие начальное напряжение разряда  $1 \dots 10$  кВ с длительностью импульсов  $0,1 \dots 100$  мс, в основном используются для получения ПМП с открытой поровой структурой [30, 40 – 41], а технологические установки трансформаторного типа с напряжением  $1 \dots 10$  В промышленной частоты – для получения ПМП с плотностью, близкой к теоретической плотности компактного материала [22 – 40].

В работах [8, 9, 22 – 43] показано, что методами ЭИО порошков черных и цветных металлов и сплавов, самофлюсующихся и твердосплавных сплавов, включая карбиды, бориды, оксиды и тугоплавкие металлы, для нужд машиностроения, приборостроения и медицины можно получать ПМП с повышенным комплексом физико-механических и структурных свойств и осуществлять такие процессы порошковой металлургии, как формование спекание, припекание, включая процессы сварки и наплавки.

Из обобщенного анализа работ [7 – 11, 22 – 43, 47, 48] следует, что при разработке методов ЭИО ПМП использовались математические модели двух типов – гносеологические и идентификационные [13, 16, 49 – 51]. С помощью первого типа моделей описывалась физическая сущность изучаемого объекта, отражающая изменение его состояния в зависимости от внешнего воздействия. Применительно к ЭИО ПМП этот тип моделей описывает кинетику уплотнения порошка под действием электрического тока и прикладываемого давления. С помощью второго типа моделей отображается кибернетическая сущность изучаемого объекта, представленного формализованной системой взаимосвязанных элементов, с помощью которых отображается генерация, преобразование, распределение и поглощение потоков внешнего воздействия, несущих информацию об изменениях в системе. По структурной схеме и используемым связям между составными элементами, по способу и параметрам генерации, преобразования и поглощения потоков внешнего воздействия осуществляется отождествление этой модели с изучаемым объектом. Применительно к методам ЭИО ПМП, примерами идентификационных моделей могут являться как технологические схемы, отражающие способы приложения электроимпульсного тока и давления к порошку, так и функциональные технологические установки и функциональные схемы систем управления технологическими процессами.

Проведем анализ гносеологических моделей ЭИО ПМП. Используемые в работах [7 – 11, 22 – 30, 36 – 38] модельные допущения позволяют описывать кинетику электроконтактного уплотнения ПМП исходя из разности концентрации вакансий в кристаллических узлах контактных зон частиц порошка, вызывающих появление диффузионного потока атомов. Математические модели в этих работах представляют ЭИО ПМП как разновидность спекания под давлением или горячего прессования [8, 10, 11, 43, 44], в которых роль электрического тока, являющегося квазипостоянным, сводится к фактору электротермической активации подобному температуре в процессах прессования или спекания порошка [7 – 11, 47, 48].

В математических моделях [8, 30 – 43] выделены три стадии формирования ПМП под действием электрического тока и давления, в которых учитываются переходы порошка из состояния дисперсной среды в конденсированную и сплошную среды, отличающиеся друг от друга проницаемостью структуры. К недостаткам этих математических моделей следует отнести то, что в них не учитывается влияние напряженности электрического поля на диффузные процессы и устойчивость жидкофазного состояния ПМП при электроконтактном уплотнении порошка.

Влияние напряженности электрического поля на кинетику уплотнения порошка при ЭИО ПМП описано в работах [8, 30, 36]. В них изучаемый процесс рассматривается с позиции интенсивного тепло- и массопереноса, обусловленного граничной диффузией атомов, а используемая математическая модель позволяют свести данный процесс к разновидности процессов контактной сварки [44 – 46], в которой кроме факторов механического и электротермического воздействия на частицы порошка, учитывается устойчивость формообразования ПМП в момент протекания через него электрического тока.

Однако в математических моделях [8, 31 – 3, 36 – 39] не учитывается влияние на кинетику уплотнения порошка скин- и пинч-эффектов, возникающих при ЭИО ПМП, а существующие модельные допущения не позволяют определить температуру частиц порошка в контактных зонах при протекании импульса электрического тока.

Отмеченные недостатки устранены в работах [34, 35, 40 – 43], в которых в процесс контактообразования между частицами порошка при ЭИО разбивается на три стадии (образование первичного мостика, его расплавление и появление жидкофазного контакта).

Обобщенный анализ моделей, представленных в работах [7 – 11, 22 – 43, 47, 48], позволяет выделить два подхода в описании кинетики электроконтактного уплотнения. Один из них основан на теории спекания под давлением (или горячего прессования), а второй – на теории контактной сварки (наплавки), устанавливающей межатомные связи между частицами порошка в контактных зонах. К недостаткам этих моделей следует отнести отсутствие в них учета влияния на кинетику контактообразования электронного взаимодействия [52, 53] контактных зон частиц порошка на стадии упругой подпрессовки (начальная стадия ЭИО ПМП), результатом которого является существование межконтактных промежутков, препятствующих диффузии атомов между ними. В них также не учитывается влияние на этот процесс изменения между частицами порошка природы сил трения (сухое – жидкостное), связанного с появлением электрического тока.

Проведем анализ идентификационных моделей [13, 50, 51], представленных в работах [22 – 40] технологическими схемами осуществления ЭИО ПМП. Если сравнивать технологические схемы [44 – 46] контактной сварки и электроконтактного уплотнения порошков, то они имеют сходство по способу приложения давления и протекания тока, включая параметры этих величин, через обрабатываемый объект. Поэтому, как следует из анализа работ [8, 30 – 37, 40, 41], основу конструкций технологических установок для ЭИО ПМП составляет функциональная схема, применяемая, в том числе, и в технологических установках как контактной, так и индукционной сварки.

Таким образом, в основе систем управления технологическими процессами ЭИО ПМП лежат системы управления машинами контактной или индукционной сварки, позволяющие выполнять следующие функции:

- управлять силовым электроприводом, а также другими приводами, оказывающими на ПМП механическое воздействие;
- устанавливать и контролировать начальные параметры ЭИО, такие как давление подпрессовки  $p$  (МПа), напряжение  $U_0$  (В или кВ), сила тока  $I_0$  (А или кА), циклическая частота  $\omega$  (Гц или кГц) и длительность  $t$  (мкс, мс или с);
- координировать работу дополнительных средств контроля и автоматизации.

Выполнение указанных функций управления осуществляется по заранее заданной программе, параметры которой определяются на стадии моделирования и отработки процесса ЭИО ПМП. В работах [17 – 19, 22 – 29] показано, что использование микропроцессорной техники и программных средств позволяет не только автоматизировать вышеперечисленные функции управления, но и стабилизировать технологические режимы электроконтактного уплотнения порошка. Все это вместе взятое является элементами адаптивного управления технологическими процессами [13, 16, 17 – 19]. Однако в работах [22 – 29] на эти факторы не обращается внимание.

**Методы и системы адаптивного управления технологическими процессами.** Управление различными объектами с динамически изменяющимися параметрами состояния, к числу которых можно отнести и ЭИО ПМП, является актуальной задачей для кибернетики [13, 49, 50] и выделившейся из нее на рубеже 60 – 70-х годов прошлого столетия такой отрасли знаний, как информатика. Если учесть, что появившаяся после второй мировой войны кибернетика занимается изучением закономерностей управления и связей в различных системах, имеющих физическое (искусственное или естественное), биологическое и социальное происхождение, то в этом смысле ее появление можно отнести на более ранний период, связанный с появлением такой науки, как теория управления [49, 56, 58, 61]. Тогда время появления способа адаптивного управления (АУ) объектами с динамически меняющимися параметрами [12, 13] совпадает с появлением способа спекания упругоупрессованных металлических порошков электроимпульсным током [20]. Дальнейшее развитие способа АУ [13, 49, 56 – 62, 65] привело к появлению различных методов и систем адаптивного управления (САУ), которые также известны как самоорганизующиеся или самонастраивающиеся [62]. Эти системы являются составной частью методов АУ и служат для их реализации.

Общим [12 – 19, 49 – 62, 65] в методах АУ и ЭИО ПМП является то, что при их описании используются два типа математических моделей – гносеологический и идентификационный. При этом первый тип отражает природную суть ОУ, а второй – кибернетическую суть технологического процесса (ТП). Связь между этими типами моделей может описываться с помощью структурных схем САУ, которые по показателю использования человеческого труда можно разделить на неавтоматизированные, автоматизированные и автоматические. По этому показателю и исходя из выполняемых функций на производстве к САУ ТП можно также отнести и отделы технического контроля [66, 67]. Целью этих отделов является не столько выявление брака выпускаемой продукции, сколько способствование обеспечению производственных условий, при которых брак для данного технологического процесса будет минимальным.

Применение САУ ТП в различных отраслях производства [12 – 17, 49, 58 – 61, 65] привело к появлению различных оттенков для таких общих понятий в теории управления, кибернетике и информатике, как «внешняя среда», «возмущение», «поведение объекта», «регулятор», «управление объектом» и «АУ». Так, например, под АУ может пониматься активный контроль сварочных процессов [44, 46], а под управлением объектом – поддержание в нем определенных функциональных параметров или физического состояния при взаимодействии с источником воздействия (ИВ) или с внешней средой. При этом в ОУ, ИВ и

внешней среде могут возникать различного рода возмущения, такие как, например, характерное изменение температуры, вибрация или электромагнитное излучение. Известны случаи [12, 60, 62], когда в описаниях процессов АУ под управлением объекта понимается поддержание определенных режимов функционирования ИВ при его взаимодействии с ОУ, при этом сам ИВ может выступать в роли регулятора состояния ОУ. Исходя из этого, при проведении дальнейшего анализа методов АУ ТП с целью разработки принципов адаптивного управления ЭИО ПМП, уточним вышеприведенные общие понятия для теории управления.

Любое воздействие со стороны ИВ или внешней среды на ОУ вызывает в нем ответную реакцию, проявляющуюся в изменении его физического (или, в зависимости от природы ОУ, биологического и социального) состояния, которое может сопровождаться переходными процессами, вызывающими различного рода возмущения. Эти возмущения, связанные с переходными процессами, совместно с изменением состояния, формируют характерное поведение ОУ, которое может регулироваться дополнительным воздействием, задаваемым регулятором. Если такая регулировка не возможна, то переходные процессы в ОУ протекают с учетом его системы саморегуляции. Исходя из этого под управлением будем понимать целенаправленное изменение состояния ОУ, которое может осуществляться под действием ИВ или в результате взаимодействия ОУ с окружающей его средой. Этот процесс может иметь промежуточные состояния, которые определяются параметрами отклонения и/или возмущения. Учитывая эти параметры можно корректировать продолжительность промежуточных состояний с помощью регулятора, оказывающего дополнительное влияние на ИВ и/или ОУ. Если регулятор не оказывает влияния на ОУ, то изменение его состояния в период контакта с ИВ происходит за счет внутренней самоорганизации. Если регулятор не оказывает влияние на выходные параметры ИВ, то ИВ является нерегулируемым, в противном случае – регулируемым. По свойствам изменять свои выходные параметры ИВ также можно разделить на два типа – управляемые и неуправляемые. К первому типу относятся ИВ с устанавливаемыми параметрами воздействия, а ко второму – со случайными. При этом между ними и ОУ могут возникать связи, формирующие системы с открытым и/или с замкнутым контуром управления. Примерами таких систем могут являться разрядные контуры технологических установок ЭИО ПМП, а также системы управления в технологических установках ЭИО ПМП [17 – 19, 40, 41], с замкнутым контуром из последовательных связей между ИВ, ОУ и регулятором для корректировки выходных параметров ИВ.

Если считать, что прямой связью является непосредственное взаимодействие (контакт) ИВ с ОУ, то замкнутый контур, устанавливающий связь ОУ с ИВ через регулятор, можно считать обратной связью.

В системах управления могут также применяться схемы с замкнутым контуром управления, образующимся с помощью связей между регулятором и ОУ, при этом связь последнего с ИВ может создавать открытый контур управления. Системы, реализующие такие схемы управления, обеспечивают регулировку поведением ОУ при его контакте с ИВ по параметрам отклонения и/или возмущения ОУ. Примерами таких систем управления могут являться стабилизаторы электрического тока, пневматического или гидравлического давления соответствующих приводов технологических установок для ЭИО ПМП [17 – 19, 40, 41].

На основании изложенных определений основных понятий можно сделать следующие выводы:

1) адаптивными являются такие процессы управления, при которых под влиянием ИВ возможен регулируемый перевод, а при необходимости и поддержание ОУ в заранее определенном состоянии. Система, с помощью которой это возможно осуществить, называется САУ;

2) для осуществления своих функций в состав САУ необходимо включить хотя бы один регулятор, который, благодаря замкнутому контуру управления, образует обратную связь с ИВ и/или с ОУ, а также модель осуществляемого процесса, отражающую его гносеологическую (физическую, биологическую или общественную) или идентификационную (кибернетическую) сущность. При этом сущность может быть выражена хотя бы одним эталонным параметром, с которым сравниваются либо выходные параметры ИВ, либо параметры отклонения и/или возмущения ОУ. Для осуществления такой операции в САУ, кроме регулятора и эталонной модели контролируемого процесса должно входить также устройство сравнения.

Перечисленные функциональные элементы САУ, как и ОУ, могут иметь различную природу (физическую, биологическую или социальную) происхождения и описываться различными физическими или математическими моделями, однако при рассмотрении особенностей связей между гносеологическими и идентификационными моделями, используемыми при описании методов АУ ТП, необходимо рассматривать кибернетическую сущность САУ.

Развитие методов АУ ТП [12 – 19, 49, 50, 58 – 62, 65] привело к появлению многоуровневых САУ ТП [62], способных обеспечивать управление полным технологическим циклом получения изделий в рамках отдельно взятого производства. Основу этих систем управления составляют одноуровневые САУ, способные решать задачи, позволяющие и координировать работу технологического оборудования, создавать и поддерживать отдельные технологические режимы получения промежуточного продукта в рамках полного технологического цикла предприятия. В этих системах могут использоваться отдельные схемы управления технологическими режимами по параметрам отклонения и/или возмущения, имеющие замкнутый контур, на основе которого с помощью устройства сравнения и регулятора устанавливается обратная связь ОУ с ИВ. Эти схемы являются элементарными в САУ. С их помощью процессы задания и поддержания технологических режимов методами АУ ТП можно формально представлять в виде идентификационного обмена

информационными потоками между регулятором ИВ, ОУ и устройством сравнения. Результатом этого обмена является оптимизация и поддержание технологических режимов. Кроме этого при определенных условиях САУ способны также выполнять процедуры поиска оптимальных технологических режимов.

Об оптимизации технологических режимов ЭИО ПМП с помощью компьютерного моделирования сообщается в работах [17 – 19, 22 – 29], в некоторых из них [17 – 19] также сообщается и об использовании программного логического управления технологическими операциями и режимами. Однако о том, что и компьютерное моделирование, а также программное логическое управление по выполняемым функциям являются составными элементами методов адаптивного программного регулирования и адаптивного логического управления, в этих работах не сообщается.

Если предположить [40, 46 – 48], что технологические установки ЭИО обладают внутренней системой задания и поддержания в определенных пределах электрических параметров разрядного контура, то такие составные элементы АУ ТП, как компьютерное моделирование и программно-логическое управление, могут обеспечить поиск, задание и поддержание оптимальных технологических режимов ЭИО ПМП. Использование элементов АУ ТП в процессах ЭИО может повысить и стабилизировать физико-механические и структурные свойства ПМП [17 – 19, 22 – 29].

На основе анализа методов ЭИО ПМП, включая анализ методов и систем АУ ТП, можно сделать следующие **основные выводы**:

1) под ЭИО ПМП понимаются процессы электроконтактного и электроимпульсного уплотнения порошковых сред, которые известны в Европейском Союзе, США и Канаде как Electroconsolidation, High Energy High Rate Processing (HEHR), Electric Discharge Compaction (EDC), Spark Plasma Sintering (SPS) и Field assisted sintering technique (FAST), а в СНГ – как процессы электроконтактного, электроразрядного и электроимпульсного спекания, припекания и наплавки;

2) перспективным приложением методов ЭИО ПМП являются технологии получения изделий для машиностроения, приборостроения и медицины из порошков железа, никеля, молибдена, алюминия, титана, ниобия, тантала и вольфрама, самофлюсующихся и твёрдосплавных сплавов, в том числе на основе карбидов, боридов и оксидов. К достоинствам этих методов следует отнести то, что они обеспечивают получение ПМП как с пористой, так и с компактной структурой при упругих подпрессовках порошков тугоплавких и трудноформуемых материалов и токах порядка  $1 \dots 10$  кА в течение  $100 \text{ мкс}^{-1}$  с. При этом в получаемом материале или покрытии на уровне входящих в него зерен возможно сохранение структуры материала, наследованной от частиц порошка, подвергшихся ЭИО;

3) технологическое оборудование для ЭИО ПМП имеет конструктивное сходство с технологическим оборудованием для контактной и индукционной сварки по типу накопителей импульсной энергии, механизмов задания и поддержания механического давления, системы управления и контроля. По способу пропускания тока и приложения механического давления процессы ЭИО ПМП также сходны со сварочными процессами, что позволяет описывать кинетику электроконтактного уплотнения с позиции контактной сварки, являющейся разновидностью сварки давлением. Однако по длительности электротермического воздействия и значениям прикладываемого давления электроконтактного и электроимпульсного уплотнения порошковой среды процессы ЭИО ПМП можно отнести к разновидности горячего прессования, или спекания под давлением;

4) независимо от сферы применения существующие методы АУ ТП по своей сути направлены на решение задач по поиску и оптимизации технологических режимов обработки, обеспечивающих перевод и поддержание ОУ в заданном состоянии. Для выполнения этого в методах АУ ТП используются САУ, устанавливающие, несмотря на различие в уровне управления и степени автоматизации, с помощью регулятора обратную связь между ОУ и ИВ, которым, например, может являться технологическое оборудование. Поиск и оптимизация технологических режимов выполняется с учетом разницы между существующими и ожидаемыми параметрами отклонения или возмущения, характеризующими состояние ОУ и его поведение при контакте с ИВ;

5) общим между методами АУ ТП и методами ЭИО ПМП является использование в них математических моделей двух типов – гносеологических и идентификационных, отражающих либо физическую, либо кибернетическую сущность ОУ и/или ИВ. При этом используемые в методах ЭИО ПМП и в методах АУ ТП гносеологические модели устанавливают связь между технологическими режимами обработки, состоянием и поведением ОУ, определяют возможные для наблюдения параметры отклонения от первоначального состояния и возмущения. Идентификационные модели в этих методах отражают связь между ИВ (технологическим оборудованием), ОУ и регулятором, определяют направление передачи информационных или энергетических потоков, задающих технологические режимы обработки;

6) использование в технологических установках ЭИО с внутренней системой задания и поддержания исходных параметров электроимпульсного тока таких составных элементов АУ ТП, как компьютерное моделирование и программно-логическое управление, будет способствовать поиску, заданию и поддержанию оптимальных технологических режимов ЭИО, что приведет к стабилизации физико-механических и структурных свойств ПМП. Разрабатывая на этой основе метод и систему АУ ЭИО ПМП идентификационной модели необходимо использовать схемы управления по отклонению и возму-



шению с эталонными параметрами, полученными с помощью гносеологической модели электроимпульсного уплотнения упругоподпрессованного порошка или порошковой среды. При разработке такой модели необходимо учитывать следующее:

- существующие гносеологические модели ЭИО ПМП, как правило, отражают кинетику электроконтактного или электроимпульсного уплотнения порошковой среды с позиции диффузно-вязкой ползучести, обусловленной упругопластическими деформациями и температурой контактных зон, близкой к жидкофазному переходу материала частиц порошка. В этих моделях также может учитываться состояние устойчивости жидкой фазы порошкового материала при упруговязком течении в условиях действия электроимпульсного тока. Результаты моделирования кинетики электроконтактного и электроимпульсного уплотнения могут использоваться в идентификационных моделях, например, для определения эталонных значений, относительно которых определяются параметры отклонения или возмущения;

- недостатками существующих гносеологических моделей ЭИО ПМП является то, что в них не учитывается влияние на кинетику контактообразования электронного взаимодействия контактных зон частиц порошка на стадии упругой подпрессовки (начальная стадия ЭИО ПМП), результатом которой является существование межконтактных промежутков, препятствующих диффузии атомов между ними. В них также не рассматривается влияние на этот процесс изменения природы сил трения (сухое – жидко-стное) между частицами порошка, связанного с появлением электрического тока. Следует отметить, что в существующих гносеологических моделях ЭИО ПМП температура, влияющая на кинетику электроконтактного и электроимпульсного уплотнения, как правило, устанавливалась на основе расчетного, сравнительного или фотометрического методов. Такой подход в моделировании позволяет судить о физических явлениях, происходящих в процессе контактообразования, только на основании усредненных значений температуры излучаемого процесса, осуществляемого с учетом термического действия квазипостоянного тока, протекающего через порошковую среду, отличающуюся от сплошной только тем, что имеет пористость. По этой причине используемые в работах методы определения температуры не позволили получить ее временное распределение в контактной зоне частиц порошка и связать это распределение с моментом появления жидкой фазы, определяющей кинетику контактообразования между частицами порошка при ЭИО ПМП.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сварка и родственные технологии: материалы докл. междунар. симпоз., Минск, 26 марта 2008 г. / редкол.: А.Ф. Ильющенко и [др.]. – Минск: ГНПО порошковая металлургия, 2008. – С. 5 – 20.
2. Материалы и технологии, оборудование в производстве, ремонте и модернизации машин: сб. науч. тр. VI междунар. науч.-практ. конф.: в 3-х т. / под общ. ред. П.А. Витязя, С.А. Астапчика. – Новополоцк: ОУ «ПГУ», 2007. – Т. I. – С. 3 – 47.
3. Порошковая металлургия: респ. межведомств. сб. науч. тр. / под ред. П.А. Витязя. – Минск: БГНПК порошковой металлургии, 2006. – С. 11 – 43, 55 – 66.
4. Машиностроение: энцикл. / под ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2006. – Т. III: Технология изготовления деталей машин. – 840 с.
5. Барбашов, В.В. Развитие машиностроительного комплекса в условиях осуществления социально-экономических преобразований. О приоритетных направлениях развития машиностроения / В.В. Барбашов // Вестн. машиностроения. – 1999. – № 9. – С. 42 – 43.
6. Кузнецов, В.М. Российская атомная энергетика: вчера, сегодня, завтра. Взгляд независимого эксперта / В.М. Кузнецов. – М.: Нац. ин-т прессы, 2000. – 288 с.
7. Петросян, А.С. Порошковая металлургия и технология композиционных материалов / А.С. Петросян. – М., 2007. – 240 с.
8. Косторнов, А.Г. Материаловедение дисперсных и пористых материалов и сплавов / А.Г. Косторнов. – Киев: Наук. думка, 2002. – Т. 1. – 572 с.
9. Косторнов, А.Г. Материаловедение дисперсных и пористых материалов и сплавов / А.Г. Косторнов. – Киев: Наук. думка, 2002. – Т. 2. – 552 с.
10. Кипарисов, С.С. Порошковая металлургия / С.С. Кипарисов, Г.А. Либерсон. – М.: Металлургия, 1991. – 432 с.
11. Порошковая металлургия и напыленные покрытия / под ред. Б.С. Митина. – М.: Металлургия, 1987. – 792 с.
12. Ефимов, Д.В. Робастное и адаптивное управление нелинейными колебаниями / Д.В. Ефимов. – СПб.: Наука, 2005. – 314 с.
13. Симанков, В.С. Адаптивное управление сложными системами на основе теории распознавания образов / В.С. Симанков, Е.В. Луценко. – Краснодар: Кубан. гос. технол. ун-т, 1999. – 318 с.
14. Системный анализ в адаптивном управлении: моногр. / под науч. ред. В.С. Симанкова. – Краснодар: Ин-т совр. технол. и экон., 2001. – 258 с.
15. Соколов, А.В. Защита информации в распределенных сетях и системах / А.В. Соколов, В.Ф. Шангин. – М.: ДМК Пресс, 2002. – 652 с.
16. Фрадков, А.Л. Кибернетическая физика: принципы и примеры / А.Л. Фрадков. – СПб.: Наука, 2003. – 208 с.

17. Белявин, К.Е. Адаптивное управление электроконтактной наплавкой порошков самофлюсующихся сплавов / К.Е. Белявин, О.О. Кузнецик, Д.В. Минько // Тез. докл. междунар. конф. «HighMatTech», Киев, 15 – 19 окт. 2007 г. / под ред. акад. НАН Украины В.В. Скорохода. – Киев, 2007. – С. 225.
18. Use of Adaptive Control System in Processes of Electrodischarge Sintering of Titanium Powders / K. Beljavin, V. Sheleg, D. Minko, O. Kuznechik // International Powder Metallurgy Congress Et Exhibition EURO PM2007, 15 – 17 Oct. 2007, Pierre Baudis Congress Centre, Toulouse, France. Proceedings, 2007. – Vol. 3. – P. 211 – 214.
19. Кузнецик, О.О. Использование адаптивного управления электроконтактной обработки в процессах наплавки порошковых материалов / О.О. Кузнецик // Материалы докл. междунар. техн. конф. «Защитные покрытия, сварка и контроль», Минск, 30 апр. 2006 г. – Минск, 2006. – С. 43 – 47.
20. Apparatus for Making Hard Metal Compositions: Pat.: 1,896,854. 1933: US / G.F. Taylor.
21. Electric Discharge Heat Treatment of metals in Electrolytes: Patent: 3,188,245. 1965: US / K. Inoue.
22. Spark Plasma Sintering of Aluminum / Z. Shen [et al.] // Am. Ceram. Soc. 85 (2002) [8]. – P. 1921 – 1927.
23. Zhang, J. Field Activated Sintering Techniques: a comparison and contrast / J. Zhang, A. Zavaliangos, J. Groza // P/M Science & Technology Briefs. – 2003. – Vol. 5. – № 3. – P. 17 – 21.
24. Sastry, K.Y. Mechanical Milling and Field Assisted Sintering Consolidation of Nanocrystalline Al-Si-Fe-X Alloy Powder / K.Y. Sastry [and a.t.] // Rev. Adv. Mater. Sci. – 8 (2004). – P. 34 – 40.
25. Hennicke, J. Field assisted sintering technology for the consolidation of innovative materials / J. Hennicke, H.U. Kessel // Ceram. For. Int. / Ber. DKG 81. – 2004. – № 11. – P. 14 – 16.
26. Mathias Herrmann. Spark Plasma Sintering of Ceramic Materials // Fraunhofer IKTS 2005 Annual Report. – 2005. – P. 37.
27. Vanmeensel, K. Field assisted sintering of electro-conductive ZrO<sub>2</sub>-based composites / K. Vanmeensel, A. Laptev, O. Van der Biest and J. Vleugels // Journal of the European Ceramic Society. – 2007. – Vol. 27, Is. 2. – 3. – P. 979 – 985.
28. Grigoriev, E. Electro discharge compaction of WC-Co composite material containing particles of diamond / E. Grigoriev, A. Rosliakov // Materials Science Forum. – 2007. – Vol. 534 – 536. – P. 1181 – 1184.
29. Rathel, J. Measuring and Modeling of Temperature Distribution in Field Assisted Sintering Technology (FAST) / Spark Plasma Sintering (SPS) / Dipl.-Ing. Jan Rathel, Dr. Wieland Beckert, Dr. Mathias Herrmann // Fraunhofer IKTS 2007 Annual Report. – 2007. – P. 29.
30. Райченко, А.И. Основы процесса спекания порошков пропусканием электрического тока / А.И. Райченко. – М.: Металлургия, 1987. – 128 с.
31. Спекание металлических порошков серий сильноточных импульсов / Н.Н. Заводов [и др.] // Теплофизика высоких температур. – 1999. – Т. 37, № 1. – С. 135 – 141.
32. Матренин, С.В. Электроразрядное спекание железо-титанового антифрикционного сплава / С.В. Матренин, А.И. Слосман, Ю.В. Мячин // Изв. Томского политехн. ун-та. – 2005. – Т. 308, № 4. – С. 74 – 77.
33. Рыморов, Е.В. Исследование и разработка износостойких порошковых материалов и технология упрочнения деталей электроимпульсным спеканием под давлением: дис. ... канд. техн. наук / Е.В. Рыморов. – Киев, 1974.
34. Применение технологии и оборудования конденсаторной сварки для получения изделий из порошков тугоплавких металлов / К.Е. Белявин [и др.] // Сварка и родственные технологии. Проблемы и пути обеспечения качества: сб. докл. IV Междунар. симпозиума, Минск, 30 марта 2005 г. / редкол.: В.К. Шелег [и др.]. – Минск: Тонпик, 2005. – С. 61 – 64.
35. Белявин, К.Е. Получение пористых материалов из тугоплавких металлов методом электроимпульсного спекания / К.Е. Белявин, В.К. Шелег // Теория и практика машиностроения, 2004. – № 2. – С. 68 – 77.
36. Тепловые процессы при электроимпульсном прессовании порошков / С.А. Баланкин [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 1984. – № 2. – С. 124 – 129.
37. Дорожкин, Н.Н. Импульсные процессы нанесения порошковых покрытий / Н.Н. Дорожкин, Т.М. Абрамович, В.К. Ярошевич. – Минск: Наука и техника, 1985. – 279 с.
38. Прогрессивные технологии электротермической наплавки порошковых покрытий на узлы трения / Ю.Н. Гафо [и др.] // Сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. конф. «МАФП-2008», Таганрог, 5 – 7 окт. 2008 г. – Таганрог: ТГПИ, 2008. – С. 17 – 25.
39. Введение в физику твердых, жидких и пористых систем / под ред. проф. Н.Н. Дорожкина. – Таганрог: Изд-во Таганрогского гос. педагог. ин-та, 2001. – Ч. I, II.
40. Теория и практика электроимпульсного спекания пористых порошковых материалов / К.Н. Белявин [и др.]. – Минск: ООО «Ремико», 1997. – 180 с.
41. Белявин, К.Н. Теоретические основы электроимпульсного спекания металлических порошков / К.Н. Белявин. – Минск: НИИ ПМ с ОП, 1998. – 52 с.
42. Особенности нагрева порошковых частиц при электроимпульсном спекании / В.М. Капцевич [и др.] // Порошковая металлургия и композиционные материалы: материалы краткосрочного семинара, Ленинград, 22 – 23 сент. 1988 г. / под ред. С.С. Ермакова. – Л., 1988. – С. 15 – 19.
43. О возможности сохранения микроструктуры порошковых материалов при электроимпульсном спекании / П.А. Витязь [и др.] // Порошковая металлургия: сб. – Минск: Выш. шк., 1988. – № 12. – С. 50 – 52.



44. Чулошников, П.Л. Контактная сварка / П.Л. Чулошников. – М.: Машиностроение, 1987. – 176 с.
45. Сварка в машиностроении: справ.: в 4-х т. / ред. кол.: Г.А. Николаев [и др.]. – М.: Машиностроение, 1978. – Т. 1. – 1978. – 504 с.
46. Технология и оборудование контактной сварки / под ред. Б.Д. Орлова. – М.: Машиностроение, 1975. – 536 с.
47. Бальшин, М.Ю. Основы порошковой металлургии / М.Ю. Бальшин, С.С. Кипарисов. – М.: Металлургия, 1978. – 184 с.
48. Пористые проницаемые материалы: справ. / под ред. С.В. Белова. – М.: Металлургия, 1987. – 335 с.
49. Основы управления технологическими процессами / С.А. Анисимов [и др.]. – М.: Наука, 1978. – 440 с.
50. Коминкас, В. Идентификация динамических систем по дискретным наблюдениям / В. Коминкас. – Вильнюс: Мокслас, 1982. – Ч. I: Основы статистических методов, оценивание параметров линейных систем. – 245 с.
51. Патрик, Э. Основы теории распознавания образов: пер. с англ. / под ред. Б.Р. Левина. – М.: Сов. радио, 1980. – 408 с.
52. Самсонов, Г.В. Электронная теория спекания / Г.В. Самсонов // Теория и технология спекания / отв. ред. Г.В. Самсонов. – Киев: Наук. думка, 1974. – С. 10 – 25.
53. Щукин, Е.Д. Коллоидная химия / Е.Д. Щукин, А.В. Перцов, Е.А. Амелина. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2004. – 445 с.
54. Белявин, К.Е. Распределение температуры в порошковом материале при электроимпульсном спекании / К.Е. Белявин, Д.В. Минько, О.О. Кузнецик // Порошковая металлургия. – 2002. – Вып. 25. – С. 95 – 99.
55. Белявин, К.Е. Моделирование процесса электроимпульсного спекания металлических порошков / К.Е. Белявин, Д.В. Минько, О.О. Кузнецик // ИФЖ. – Т. 77, № 3. – 2004. – С. 136 – 143.
56. Шеннон, К. Работы по теории информации и кибернетике / К. Шеннон. – М.: Иностран. лит., 1963. – 830 с.
57. Эшби, У.Р. Введение в кибернетику / У.Р. Эшби. – М.: Иностран. лит., 1959. – 432 с.
58. Дербишер, А.В. Управление технологическими процессами в машиностроении и приборостроении / А.В. Дербишер. – М.: Изд-во стандартов, 1977. – 164 с.
59. Стефани, Е.П. Основы построения АСУ ТП / Е.П. Стефани. – М.: Энергоиздат, 1982. – 352 с.
60. Харрисон, Т. Управляющие вычислительные машины в АСУ технологическими процессами / под ред. Т. Харрисона; пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – Т. 1. – 530 с.
61. Александровский, Н.М. Адаптивные системы автоматического управления сложными технологическими процессами / Н.М. Александровский, С.В. Егоров, Р.Е. Кузин. – М.: Энергия, 1978. – 272 с.
62. Применение беспорисковых самонастраивающихся систем для управления химико-технологическими процессами / Б.Н. Петров [и др.] // Измерения, контроль, автоматизация. – 1979. – № 3. – С. 46 – 54.
63. Басовский, Л.Е. Управление качеством: учебник / Л.Е. Басовский, В.Д. Протасьев. – М.: ИНФРА-М, 2004. – 212 с.
64. Варакута, С.А. Управление качеством продукции: учеб. пособие / С.А. Варакута. – М.: Инфра-М, 2002. – 205 с.
65. Абдуллаев, А.А. Принципы построения автоматизированных систем управления промышленными предприятиями с непрерывным характером производства / А.А. Абдуллаев, Р.А. Алиев, Г.М. Уланов. – М.: Энергия, 1975. – 440 с.

Поступила 11.05.2009

## THE ANALYTICAL REVIEW: THE FIELD ASSISTED SINTERING TECHNOLOGICAL METHODS, THE TECHNOLOGICAL PROCESSES ADAPTIVE CONTROL METHODS AND SYSTEMS

**O. KUZNECHIK, O. KUZNECHIK**

*The Field Assisted Sintering Technological (FAST) Method Analytical review, which The Technological Processes Adaptive Control Methods and Systems, are reported. There are demonstrated that basic of this methods is used gnosiological and identification models for conduct discretion at interaction of control object - FAST with influence source having constructional similar with welding machine. The method and the adaptive control system are offered to use at FAST processes as a way providing received powder materials and surfaces functional properties stabilization. Influence of contact intervals between the elastic-deformed particles of a powder is recommended to consider on atoms diffusion and powder materials and surfaces consolidations kinetic in FAST gnosiological model at the electric-impulse processes an initial stage description, and also the regulator is recommended to use in FAST identification model for updating of modes of the influence set by an external source subject to current powder materials and surfaces status.*