

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ВЫБОРА МАТЕРИАЛОВ ПРЕСС-ИНСТРУМЕНТА ПРИ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОЙ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ

В процессе электроразрядной обработки металлических порошков и сплавов на их основе происходит одновременное воздействие и на материал прессового инструмента электрического тока, высоких температур и давлений, что существенно усложняет задачу выбора материалов для пресс-инструмента без проведения тщательных экспериментальных исследований, которые позволили установить технологические принципы создания более стойких комбинированных инструментов для ЭРС. Проведенные исследования по разработке материалов пресс-инструмента представляются значимыми для практики технологических процессов порошковой металлургии, а также для развития теоретических представлений о процессах электрофизической технологии.

Традиционные способы порошковой металлургии – прессование с последующим спеканием в печах – все чаще заменяются более производительными и эффективными методами, в которых совмещены процессы прессования и спекания, а спекание в печах заменяется электроспеканием. Эти методы требуют меньших затрат энергии и труда, позволяют высвободить производственные площади, занятые оборудованием. Их применение дает возможность изготавливать изделия из таких порошков, которые не поддаются обработке старыми методами порошковой металлургии. К таким методам относятся способы горячего прессования и электроразрядного спекания (ЭРС), причем последний следует считать новым и весьма перспективным, обеспечивающим использование теплоты, выделяющейся в результате электрических микроразрядов, интенсифицирующим процессы тепловой, электростатической и ионной диффузии в области межчастичного контакта, что и обеспечивает кратковременное спекание смесей порошков с получением высокопрочных изделий. Вместе с тем электроразрядное спекание, как разновидность горячего прессования, характеризуется интенсивным массопереносом не только между компонентами спекаемых смесей, но и между порошковыми частицами и деталями пресс-форм. Результатом массопереноса, вызываемого электроразрядной обработкой, являются процессы припекания (адгезии) порошка к электродам-пуансонам, а также возникновение новых фаз на контакте 1) порошок – электрод-пуансон, 2) порошок – матрица. В этой связи принципиаль-

ное значение для внедрения способа в промышленность приобретает проблема выбора и разработки материалов для пресс-инструмента – электродов-пуансонов и матриц и изыскания путей повышения его эксплуатационной стойкости.

Электроразрядное спекание осуществляется путем введения в обрабатываемый порошок совокупности постоянного и переменного токов, плотностью до 10^5 А/м², посредством токоподводящих электродов-пуансонов. Отличительной особенностью этого процесса на начальной стадии является применение предварительного уплотнения под небольшим давлением, достаточного для образования между соседними частицами искрового микроразряда. Электрические микроразряды генерируются не только в объеме спекаемого порошка, но и на контактных поверхностях оснастки. В результате за счет ионных столкновений в межчастичной среде и на поверхности частиц происходит интенсивное тепловыделение, значительно превышающее обычный нагрев за счет джоулева тепла.

На заключительном этапе процесса электроразрядного спекания порошок подвергается удельным давлениям до 10^6 кН/м², что непрерывным образом переводит процесс в режим горячего прессования[8].

Электроды-пуансоны в процессе электроразрядного спекания не только сжимают порошок, но и подводят электрический ток в узел спекания. В контакте электрод-пуансон – порошок на рабочей поверхности могут развиваться температуры до 500 – 1000° С в зависимости от вида спекаемого порошка, а удель-

ные давления достигают 10^6 кН/м² (10 Тс/см²) (рис. 1).

Таким образом, материал, идущий на изготовление электродов-пуансонов для электроразрядного спекания порошков, должен удовлетворять следующим основным требованиям:

1) быть устойчивым к резким повышениям температуры, поскольку под действием электрического тока происходит их быстрый нагрев;

2) быть устойчивым к окислению, так как электроды-пуансоны подвергаются воздействию высоких температур;

3) обладать высокой электропроводимостью и высокой механической прочностью, чтобы выдержать усилия, развиваемые при прессовании;

4) обладать высокой износостойкостью, чтобы производить многократные спекания;

5) обладать низкой способностью к диффузии и схватыванию с металлами спеченных деталей.

В различных схемах ЭРС используются матрицы, как проводящие, так и изолирующие. Процессы, происходящие на контактной поверхности матрица – спекаемый порошок – в основном аналогичны таковым на контакте электрод-пуансон – спекаемый порошок так что требования, сформулированные выше, применимы и к материалам матриц, с учетом электрических свойств материала. Целесообразно использовать в качестве материалов матриц менее электропроводные, чем материалы электродов-пуансонов [1, 2].

Кроме вышеперечисленных требований материалы оснастки должны обладать высокой эрозионной стойкостью, разгаростойкостью, малой теплопроводностью (для уменьшения потерь тепла), близкими коэффициентами теплового расширения (для предотвращения заклинивания или появления зазоров). Следует также учитывать, что материалы оснастки должны поддаваться механической обработке. В качестве материала электродов-пуансонов для электроразрядного спекания широко применяется графит. Однако графит имеет низкую механическую прочность, низкую эрозионную стойкость, легко истирается. Кроме того, углерод диффундирует в спекаемый порошок, загрязняет его. Для повышения износостойкости и эрозионной стойкости графита предлагается внедрять в поверхность графитовых электродов-пуансонов, соприкасающуюся со спекаемым порошком, порошки карбидов WC, ZrC, TiC, TiB₂, TaC по крайней мере одного вида. В качестве материала электродов-пуансонов для ЭРС предлагается также использовать нитриды металлов TiN, TaN со связками из металлов Co, Ni, Cu, Al и др., уменьшающих их электросопротивление.

Конструктивно пресс-формы для электроразрядного спекания порошков не отличаются от пресс-форм, используемых в процессе горячего прессования. Важнейшей задачей являются выбор материалов для пресс-форм, обеспечивающий высокий срок их службы. В работе предлагается комбинированная прессформа, образованная матрицей с высокой механической прочностью и со-

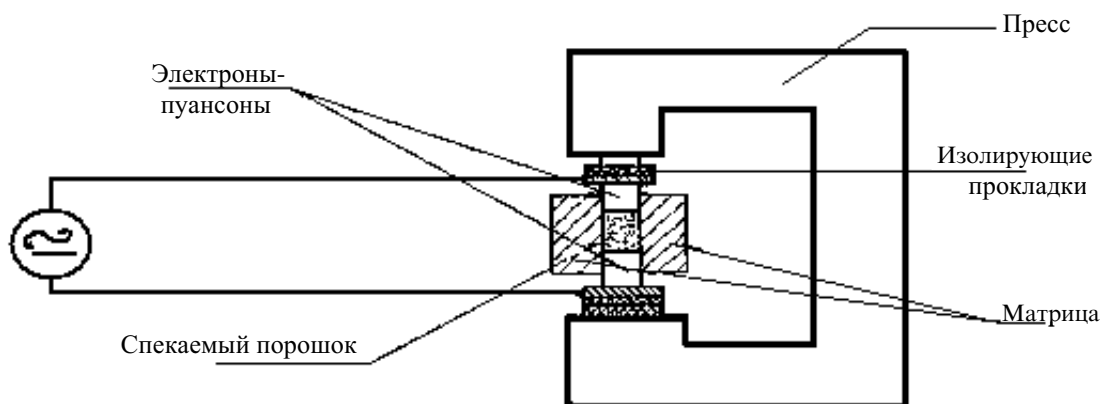


Рисунок 1. Принципиальная схема установки электроразрядного спекания.

противляемостью давлениям, внутренняя поверхность которой обкладывается электро-теплоизолирующим и высокожаропрочным материалом.

Для матрицы используются железные сплавы, специальные стали, медь, латунь, молибден, хром, бериллий, карбид вольфрама. Используются неметаллические материалы, синтетические смолы, если они прочны. Электро- и теплоизолирующим материалом могут быть MgO , Al_2O_3 , SiO_2 , Si . Высокожаропрочным материалом являются графит, керамика, жаропрочное стекло, коэффициент теплового расширения которого близок по величине к к. т. р. графита. Меняя процент содержания стекла, можно регулировать величину электрического сопротивления и получить пресс-формы, удовлетворяющие сформулированным требованиям.

Так как в литературе не имеется работ по исследованию поведения высоко-температурных материалов в контакте с металлами и сплавами при одновременном воздействии высоких температур, давлений, электромагнитного излучения, что имеет место в процессе электроразрядного спекания, то представляет значительный интерес для практики выяснение стойкости различных материалов пресс-инструмента в процессе электроразрядной обработки металлических порошков и изыскание путей повышения их эксплуатационной стойкости. В связи с этим проведено исследование взаимодействия и стойкости наиболее перспективных материалов пресс-инструмента с металлическими порошками в процессе их электроразрядной обработки, а также исследована возможность применения покрытий для повышения эксплуатационной стойкости пресс-инструмента в процессе электроразрядного спекания металлических порошков.

Вначале проверялись электроды-пуансоны из тугоплавких соединений TiB_2 , ZrB_2 , TiC , ($80\% TiB_2 + 20\% TiC$), так как они не взаимодействуют с Al , Cu , Fe . Путем прессования и спекания с последующей шлифовкой были приготовлены электроды-пуансоны в виде цилиндров диаметром 20 мм и высотой 25 мм. Однако испытания показали, что данные материалы мало пригодны для изготов-

ления электродов-пуансонов, т. к. ввиду их высокой хрупкости происходит скалывание и разрушение их. Наблюдалось припекание железного, медного порошков к электроду-пуансону из TiB_2 . Замена электродов-пуансонов из тугоплавких соединений прокладками в виде шайб диаметром 20 мм и высотой 5 мм не дала положительного результата. Шайбы разрушались после 1-3-х циклов спеканий. Далее испытывались электроды-пуансоны, полученные горячим прессованием, композиции карбид титана – углерод ($TiC + 10\%C$) при спекании Al . Наблюдается незначительное окисление поверхности электродов-пуансонов, изменения геометрических размеров не обнаружено. При спекании использовалась матрица из композиции на основе нитрида кремния ($Si_3N_4 + MgO$), однако она получила трещину при первом спекании, что, вероятно, связано с более высоким коэффициентом термического расширения композита ($TiC + C$). Электроды-пуансоны из композиции ($TiC + C$) выдержали 12 циклов спекания. Проведенные исследования показывают, что материалы на основе бескислородных тугоплавких соединений, несмотря на их высокую огнеупорность и химическую стойкость в различных средах, обладают низкими конструкционными свойствами из-за их высокой хрупкости и низкой термостойкости. Кроме того, процесс получения изделий из тугоплавких соединений горячим прессованием и их последующая обработка требует больших экономических затрат.

Исследования по вопросу стойкости и взаимодействия электродов-пуансонов из графита со спекаемыми порошками в процессе электроразрядной обработки показали, что графит марки МПГ-6 можно использовать в качестве материала пресс-инструмента для ЭРС таких мало активных металлических порошков, как медь. Однако стойкость в этом случае не велика и составляет 10-12 циклов. Установленный впервые эффект пропитки электродов-пуансонов из графита при электроразрядном спекании легкоплавких металлов приводит к увеличению их электропроводности и прочности, что является положительным, но в то же время насыщение графита металлом увеличивает адгезию спеченных

образцов к электродам-пуансонам. Electroды-пуансоны из графита не пригодны для спекания тугоплавных карбидообразующих металлов. Поэтому представлялось целесообразным исследовать стойкость электродов-пуансонов из графита с покрытиями из тугоплавких соединений Cr_3C_2 , TiC , $\text{TiN}+\text{Si}_3\text{N}_4$, характеризующихся высокой химической стойкостью к металлам Cu , Al , Ti и износостойкостью, т. е. теми основными требованиями, которые предъявлены к материалу электродов-пуансонов. Покрытия из тугоплавких соединений наносились по технологии, разработанной в институте проблем материаловедения АН Украины. Не все перечисленные покрытия оказались работоспособными. Покрытия из карбида титана или карбида хрома на графите при использовании электродов-пуансонов для спекания порошков Fe , Cu , смеси $\text{Cu}+\text{Ni}$ отслаиваются либо растрескиваются после первых циклов спекания.

В серии экспериментов была выяснена также стойкость электродов-пуансонов из различных материалов. Стойкость материалов оценивалась по способности электродов-пуансонов из них сохранять приданную им форму и отсутствию их припекания к спекаемому объекту в процессе ЭРС. Обнаружено, что электроды-пуансоны из бронзы Бр.ХО.7, композиции $\text{W}-\text{Cu}$ в начальных цик-

лах ЭРС теряют свою форму, окисляются и взаимодействуют со спекаемыми объектами. Металлографическим исследованием выяснено, что на контактной границе системы сталь 3Х2В8Ф - смесь $(\text{Cu}+\text{Ni})$ образуется зона взаимодействия толщиной 40-50 мкм. Микротвердость зоны составила 158-276 кг/мм², микротвердость спеченного сплава $(\text{Cu}+\text{Ni})$ – 136 кг/мм², стали – 3Х2В8Ф-490кг/мм². Нанесение графитовой смазки на рабочую поверхность электрода-пуансона со спекаемым порошком уменьшает схватывание материала электродов-пуансонов со спекаемым порошком. Однако ее не всегда возможно применять, так как графит загрязняет спекаемые изделия.

С целью детального исследования взаимодействия стальных электродов-пуансонов со спекаемой смесью проводились микрорентгеноспектральные исследования [3]. Качественный микрорентгеноспектральный анализ диффузионной пары $(\text{Cu}+\text{Ni})$ – сталь, выполненный на установке JXA-5, позволяет сделать вывод о том, что происходит диффузия железа в медноникелевый сплав и диффузия никеля в сталь (рис. 2).

Исследование стойкости стали 4Х5МФС при спекании смеси $(\text{Cu}+\text{Ni})$ показало, что эта сталь имеет низкую стойкость к образованию поверхностных трещин в процессе ЭРС.

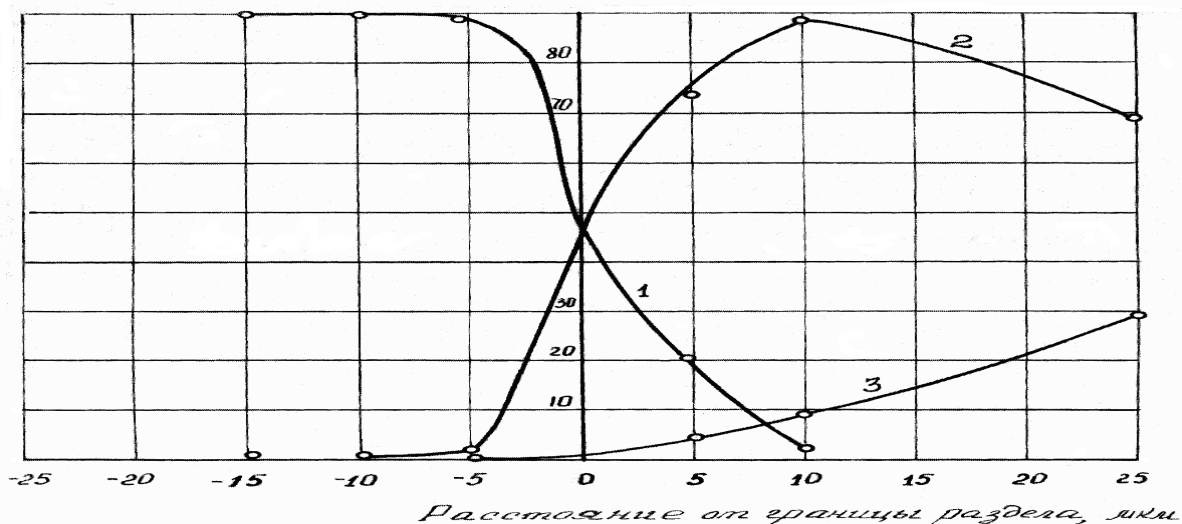


Рисунок 2. Распределение элементов в системе сталь 3Х2В8Ф – $\text{Cu}+\text{Ni}$ после ЭРС по данным микрорентгеновского анализа (по оси ординат отложены относительные концентрации $C_i / \sum_{i=1}^3 C_i$; 1 – железо, 2 – никель, 3 – медь).

При электроразрядном спекании алюминиевого порошка, несмотря на то, что его температура спекания значительно ниже температуры спекания медного порошка, наблюдается более интенсивное взаимодействие его с поверхностью стальных электродов-пуансонов. Установлено, что на процесс взаимодействия алюминия с электродами-пуансонами из стали существенное влияние оказывает режим обработки. Так при спекании порошка алюминия ПА-4 на давлении подпрессовки от 50 кгс/см² до 2000 кгс/см² наблюдается локальное прохождение электрического тока, что приводит к внедрению алюминия в контактную поверхность, вызывает образование каверн на рабочей поверхности электродов-пуансонов, изменяет чистоту их рабочей поверхности.

Такой характер взаимодействия связан с тем, что частицы алюминиевого порошка покрыты достаточно прочной пленкой окисла Al₂O₃, затрудняющей возникновение электрических микроразрядов по всему объему прессовки при значительном удалении частиц друг от друга, и поэтому наиболее вероятно возникновение локального пробоя. Увеличение давления подпрессовки до 2000-3000 кгс/см² при спекании алюминия приводит к уменьшению этого взаимодействия в связи с тем, что принудительное сближение частиц благодаря внешнему давлению способствует разрушению окисных пленок и тем самым увеличивает возможность возникновения электрических микроразрядов между частицами в объеме порошка, а это способствует и более качественному спеканию алюминия.

На процесс взаимодействия стальных электродов-пуансонов с порошком в процессе его ЭРС существенное влияние оказывает не только режим обработки, но и природа спекаемого объекта. Известно, что титан является активным металлом. Температура его плавления – 1668°±5° С, т. е. она значительно превышает температуру плавления алюминия, меди. Следовательно, и при спекании порошка титана развиваются также более высокие температуры, что усиливает взаимодействие его с электродами-пуансонами.

Электроды-пуансоны для электроразрядного спекания (ЭРС) в процессе эксплуатации подвергаются действию электрического тока,

высоких температур, давлений, агрессивных сред. Поэтому материал электродов-пуансонов должен обладать высокой прочностью, пластичностью, электропроводностью, химической, термо-, жаро-, окислительной и эрозионной стойкостью. Хотя в настоящее время не представляется возможным сочетать все эти свойства в одном материале, определенные надежды можно возлагать на спецстали, используемые для горячей штамповки (например, сталь 3Х2В8Ф), а также на некоторые тугоплавкие соединения. Однако применение стали 3Х2В8Ф в качестве материала электродов-пуансонов приводит во многих случаях к ее интенсивному поверхностному взаимодействию со спекаемым порошком.

С другой стороны, применение бескислородных тугоплавких соединений для изготовления электродов-пуансонов показывает, что схватывание со спекаемым порошком зачастую невелико, но электроды-пуансоны испытывают хрупкое разрушение. Поэтому надо применить в качестве вязкой основы электродов-пуансонов штамповые стали (например, упоминавшуюся уже типа 3Х2В8Ф), а для уменьшения схватывания стали со спекаемым порошком в процессе его электроразрядной обработки создать на рабочих поверхностях электродов-пуансонов покрытия из тугоплавких соединений. В связи с этим проводилось исследование возможностей повышения стойкости стальных электродов-пуансонов методами поверхностного упрочнения их рабочих поверхностей – электроискровым, плазменным, детонационным методами и диффузионным насыщением.

Установлено, что происходит схватывание спекаемых порошков алюминия и меди с поверхностью электрода-пуансона, упрочненной электроискровым легированием. Это связано с тем, что упрочненный слой имеет большую шероховатость (ГОСТ 2787-51) и невысокую сплошность (50-60%). Несмотря на то, что упрочненный слой имел высокую твердость, соответствующую твердости материала легирующего электрода, и обладал высокими адгезионными свойствами, спекаемый порошок внедрялся в поры покрытия.

В связи с этим для получения работоспособного слоя необходимо было применение

метода упрочнения, позволяющего получать сплошные покрытия с более высокой чистой поверхностью. В этом отношении представлял интерес детонационный метод. Испытание электродов-пуансонов с покрытиями, созданными детонационным методом, свидетельствует об их невысокой работоспособности. Например, после трех циклов спекания медного порошка наблюдается отслаивание детонационного покрытия; это объясняется слабой адгезией слоя и подложки.

Более высокого качества оказались покрытия, созданные методом диффузионного насыщения. Этот метод обеспечивает большую чистоту и сплошность покрытия по сравнению с электроискровым легированием и большую прочность соединения покрытия с основой по сравнению с детонационным напылением. Были исследованы стальные электроды-пуансоны с диффузионными карбидохромовым и карбидтитановым покрытиями: электроды-пуансоны применялись для ЭРС порошков меди, алюминия и титана. При спекании любого из исследованных порошков отслаивания покрытий от основы не наблюдается. Интересно сопоставить силу адгезии спеченного алюминия к электродам-пуансонам из стали без покрытия и с покрытием. Оказалось, что в случае стали с покрытием из карбида титана усилие отрыва алюминиевого образца составляет 4,4 кгс/см², тогда как в случае стали без покрытия эта величина достигает 83 кгс/см². При спекании титанового порошка с использованием электродов-пуансонов с покрытием из карбида титана наблюдается настолько сильное припекание порошкового образца к электроду-пуансону, что образуется неразъемное соединение в первом цикле спекания (при эффективной плотности тока ~550 А/см²). В случае алюминиевого и медного порошков адгезионное взаимодействие значительно меньше, что позволяет многократно осуществлять ЭРС одной парой электродов-пуансонов. С таким влиянием природы обрабатываемого порошка на припекание к электроду-пуансону необходимо считаться. Известно, что титан является наиболее активным среди исследованных нами металлов. Его активность и служит причиной интенсив-

ного схватывания в процессе ЭРС на любых режимах обработки [4].

С целью уменьшения взаимодействия стальных электродов-пуансонов со спекаемыми порошками и повышения их эксплуатационной стойкости исследовалось комплексное покрытие из карбида хрома и карбида титана.

Установлено, что комплексное покрытие обеспечивает спекание медноникелевой механической смеси порошков без взаимодействия с медью или никелем. Спеченные образцы не припекались к электродам-пуансонам. Из экспериментов следует, что комплексное покрытие, состоящее из карбида титана и хрома, является наиболее стойким в процессе ЭРС таких порошков, как медь, алюминий, смесь порошков Cu+Ni.

Покрытия из тугоплавких соединений на стали увеличивают ее окалиностойкость. Это подтверждается характером изменения коэффициента отражения от контактной поверхности электрода-пуансона. Так, в случае стали без покрытия коэффициент отражения уменьшился на 68% после 5 циклов спекания медного порошка, а для стали с покрытием карбида хрома – на 38%.

Перспективным направлением в повышении эксплуатационной стойкости стальных электродов-пуансонов является использование и способа плазменного напыления тугоплавких соединений на рабочую поверхность. Этот способ дает возможность получать более толстые и достаточно прочно связанные с основой упрочняющие слои. Более толстые твердые упрочняющие слои необходимы в тех случаях, когда осуществляется электроразрядное спекание порошковых смесей с твердыми наполнителями (например, композиции бронза - стеллит). В этом случае гранулы твердого наполнителя в процессе ЭРС продавливают тонкие поверхностные упрочненные слои, полученные при диффузионном насыщении.

С помощью фазового рентгеновского анализа установлено, что после ЭРС механической смеси (50%Cu + 50%Ni) с помощью электродов-пуансонов из стали 3Х2В8Ф с комплексным покрытием, полученным методом плазменного напыления, взаимодей-

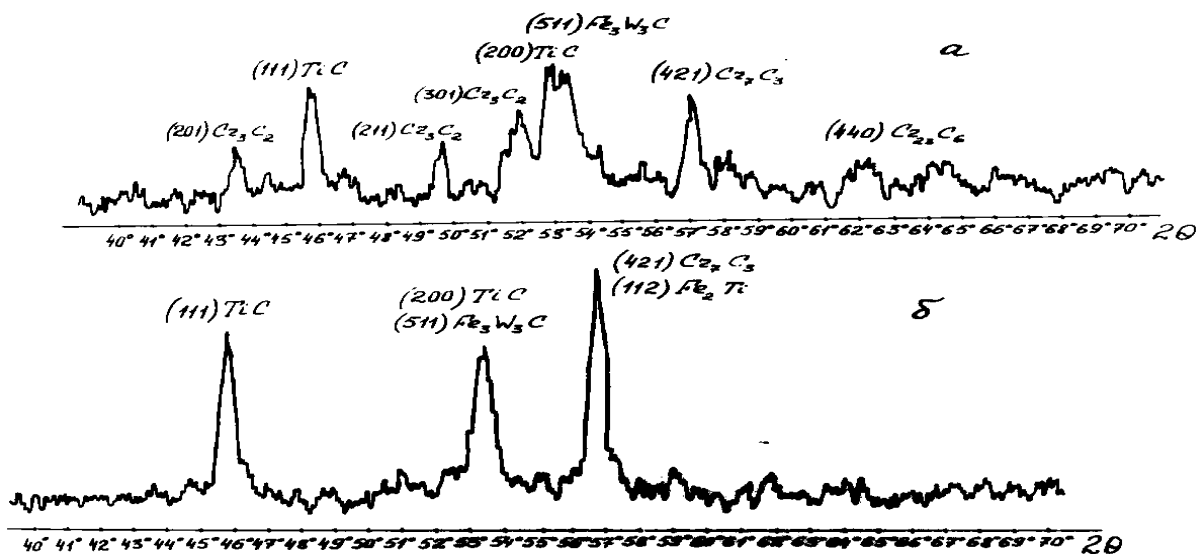


Рисунок 3. Рентгенограммы от покрытия из карбида титана на стали 3Х2В8Ф (железное излучение): а – исходная; б – после использования электродов-пуансонов для электроразрядного спекания медного порошка.

ствия с медью не наблюдается. Покрытие имеет сложный фазовый состав: оно включает карбид титана TiC , карбиды хрома $Cr_{23}C_6$, Cr_3C_2 , $Cr_{27}C_3$, никель (рис. 3).

В процессе спекания отслоения покрытия не было, однако в некоторых случаях покрытия были с низкой работоспособностью. Так испытание электродов-пуансонов из стали с покрытиями тугоплавких соединений карбида титана, карбида хрома и комплексного карбидтитанового и карбидохромового покрытия, полученных плазменным напылением показало, что при спекании композиционного материала стеллит-бронза наблюдалось отслоение покрытий на следующем режиме обработки: давление подпрессовки ~ 60 кгс/см², частота переменного тока ~ 2750 Гц, время пропускания тока на подпрессовке 35 сек. при эффективной плотности тока ~ 700 А/см², время пропускания тока на давлении $\sim 1,5$ тс/см² – составляло 25 сек. при эффективной плотности тока ~ 830 А/см² [5, 6].

Одной из причин такого различного поведения покрытий при спекании медного порошка и композиции стеллит-бронза является то, что твердые зерна стеллита, при воздействии окончательного давления прессования ~ 1000 кгс/см² вдавливаясь в покрытие с малой пластичностью, высокой твердостью и повышенной хрупкостью, создают в покрытии микротрещины. Это и ослабляет сцепление

покрытия с основой. Кроме того, покрытия методом плазменного напыления наносились в воздухе. Это создавало условия для их окисления и уменьшало их адгезию к основе. Для улучшения качества покрытий необходимо использовать инертную среду.

Материалом матриц в процессе электроразрядного спекания порошков служит электротехнический асбестоцемент, обладающий низкой электро- и теплопроводностью. Однако асбестоцемент не выдерживает температур, развивающихся в зоне спекания, и матрица из асбестоцемента разрушается после 1-2 циклов спекания. Облицовки матриц, изготовленные из тугоплавких соединений на основе нитрида кремния и нитрида алюминия методом горячего прессования, обеспечили повышение стойкости пресс-форм в 3-4 раза, однако они требовали дополнительной трудоемкой их обработки алмазным инструментом. Они часто разрушались в процессе спекания в связи с их высокой хрупкостью и недостаточной механической прочностью. Представлялось интересным использовать метод плазменного напыления для изготовления матриц из тугоплавких окислов. С помощью установки УМП4-64 этим методом была изготовлена матрица из окиси алюминия, напыленный слой которой имел толщину 2-3 мм. Испытание этой матрицы в процессе электроразрядного спекания механической смеси порошков меди и никеля

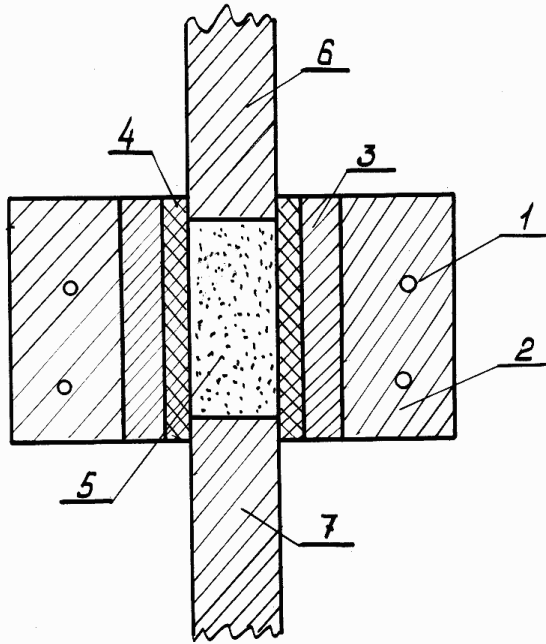


Рисунок 4. Пресс-форма для электроразрядного спекания: 1 – циркуляционная система, 2 – матрица, 3 – изоляционная обойма, 4 – высокожаропрочный материал, 5 – спекаемый порошок, 6, 7 – электроды-пуансоны.

(50х50% вес) с использованием электродов-пуансонов из жаропрочного графита МПГ-6 позволяет сделать вывод, что метод плазменного напыления может оказаться пригодным для изготовления матриц из тугоплавких окислов, в частности из Al_2O_3 . Матрица из окиси алюминия выдержала 15 циклов спеканий без разрушения (рис. 4).

Выводы:

Выбор материалов для пресс-инструмента является одной из трудных задач, и особенно для работы в таких сложных условиях, при которых происходит одновременное воздействие на материал прессового инструмента, электрического тока, высокой температуры и давления.

Список использованной литературы:

1. Киеси Иноуэ. Метод и установка для спекания электрическим разрядом. Патент Японии №1685, Кл.10А501, 1971.
2. Киеси Иноуэ. Способ изготовления формы для электроразрядного спекания. Патент Японии №45-1528, Кл.10А601, 1970.
3. Масленков С.Б. Применение микрорентгеноспектрального анализа. М.: Металлургия, 1968, 110 с. сил.
4. Рябинина О.Н., Райченко А.И., Буренков Г.Л. Структурные изменения в спеченных объектах и материалах оснастки при электроразрядном спекании смесей металлических порошков // Порошковая металлургия, 1976, №11, с. 16-21.
5. Рябинина О.Н., О взаимодействии тугоплавких и жаропрочных материалов с металлическими порошками в процессе электроразрядного спекания // Вестник Оренбургского государственного университета, 2002, №1, с. 114-120.
6. Райченко А.И., Рябинина О.Н., Стойкость материалов электродов-пуансонов и матриц в процессе электроразрядной обработки металлических порошков, // Электронная обработка материалов, 1977, №3, С.38-41.
7. Мальцев И.М., Электропрокатка металлического порошка в валках-электродах // Порошковая металлургия. – 2005.- №5/6. – С. 21-27.
8. Райченко А.И. Основы процесса спекания порошков пропусканием электрического тока. – М.: Металлургия, 1987. – 128 с.
9. Аль-Хасани С.Т. Электроразрядное уплотнение порошков // Прогрессивные технологические процессы в порошковой металлургии. – Минск: Вышэйш. шк., 1982. – С. 81-89.

Из анализа работ, посвященных разработке пресс-инструмента для нового технологического процесса ЭРС, следует заключить, что сложному комплексу противоречивых требований, предъявляемых к материалам оснастки, могут удовлетворять только инструменты (электроды-пуансоны и матрицы) сложного комбинированного строения, полученные с применением композиционных покрытий и облицовок, сочетающих в себе свойства различных материалов. Установлены технологические принципы создания более стойких комбинированных инструментов для ЭРС с использованием традиционных материалов: графита, жаропрочной стали и асбестоцемента. В работах показано, что с графитом лучше совместимыми являются комплексные покрытия, включающие ковалентные тугоплавкие соединения. Лучшими способами нанесения покрытий на жаропрочную сталь являются диффузионный и плазменный, и установлена возможность получения композиционных покрытий (карбиды на металлической связке) плазменным методом. Рекомендуется облицовки матриц из ковалентных тугоплавких соединений наносить также плазменным напылением.

Проведенные исследования по выбору и разработке материалов пресс-инструмента представляют значительный интерес для практики ЭРС, однако не разработаны теоретические критерии, определяющие стойкость электродов-пуансонов и матриц, что является научной предпосылкой решения этой задачи.

Вместе с тем исследование процессов, происходящих на контакте электрод-пуансон – спекаемый порошок, позволит не только оценить стойкость того или иного материала, но и обнаружить новые явления, имеющие важное практическое значение.