

УДК 621.793

¹М. А. Белоцерковский, д-р техн. наук, проф., ²К. Е. Белявин, д-р техн. наук, проф.,
¹И. А. Сосновский, ¹А. А. Курилёнок, канд. техн. наук

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, РБ,

²Белорусский национальный технический университет, Минск, РБ.

Тел.: 284-15-42, факс: 284-08-90, E-mail: sos3@tut.by

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ И УНИВЕРСАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ИНДУКЦИОННОГО ФОРМОВАНИЯ ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ

В статье представлены известные и вновь разработанные принципиальных технологические схемы центробежного формования порошковых покрытий. Дана их классификация по кинематическому исполнению, учитывающему направление действующих сил и обеспечивающих под влиянием раздельного действия радиальных, осевых, совместного действия радиально-осевых, радиально-тангенциальных, раздельного последовательного действия радиального и осевого направления сил для получения цилиндрических покрытий на цилиндрических поверхностях, плоских покрытий на торцевых поверхностях и покрытий другой более сложной эллипсоидной и сферической формы. Даны рекомендации по особенностям проектирования центробежных установок и приведены их разработанные, изготовленные, внедренные конструкции.

Ключевые слова: технологические схемы, классификация, центробежное индукционное формование, порошковые покрытия, универсальные центробежные установки.

M. A. Belotserkovsky, K. E. Belyavin, I. A. Sosnovsky, A.A. Kurilyonok

TECHNOLOGICAL SCHEME AND DESIGN OF UNIVERSAL EQUIPMENT FOR CENTRIFUGAL INDUCTION MOLDING OF POWDER COATINGS

The article presents the well-known and newly developed basic technological schemes of centrifugal forming of powder coatings. They are classified by kinematic design, taking into account the direction of the acting forces and providing under the influence of separate action of radial, axial, combined action of radial-axial, radial-tangential, separate sequential action of radial and axial forces to obtain cylindrical coatings on cylindrical surfaces, flat coatings on end surfaces and other more complex ellipsoid and spherical forms. Recommendations are given on the design features of centrifugal installations and their developed, manufactured, and implemented designs are given.

Keywords: technological schemes, classification, centrifugal induction molding, powder coatings, universal centrifugal installations.

1. Введение

Одним из наиболее эффективных методов нанесения порошковых покрытий на детали является центробежная индукционная наплавка (ЦИН) порошка к их поверхности [1]. Указанный метод позволяет наносить покрытия на внутренние, наружные, торцевые поверхности, а также одновременно на несколько поверхностей детали.

Любая принципиальная схема центробежного индукционного формования представляет собой простейший вариант реализации технологии нанесения порошковых покрытий с необходимым наличием основных операций нагрева и вращения, отличительные особенности исполнения которых характеризуются расположением детали в пространстве, источника тепла относительно нагреваемой поверхности, расположением осей вращения по отношению к оси детали, и определяют вследствие этого индивидуальную сущность процесса.

Для организации на заводах различного профиля участков по изготовлению широкой номенклатуры деталей с покрытиями методом ЦИН необходимо наличие цен-

тробежных установок, способных легко перенастраиваться на работу с заготовками разных типоразмеров, а также укомплектовываться необходимым набором технологической оснастки и приспособлений. Применение последних необходимо для того, чтобы обеспечить с требуемой производительностью изготовление заготовок с покрытиями в наладочном, механизированном и автоматическом режимах работы с использованием различных источников индукционного нагрева, в том числе, чтобы повысить качество покрытий (однородность свойств в механическом отношении по объему покрытия, прочность сцепления с основой и др.), уменьшить припуски на обработку для эффективной экономии дефицитных материалов. Обладая указанными свойствами, установки этого типа должны отличаться простотой управления.

Целью работы являлось описание известных и вновь разработанных технологических схем, а также особенностей проектирования универсального оборудования для центробежного индукционного формования порошковых покрытий, классификация центробежного индукционного нанесения порошковых покрытий по кинематическим признакам и направлению действующих сил.

2. Разработка технологических схем для центробежного индукционного формования покрытий

В принципиальных технологических схемах центробежного формообразования (или формования) порошковых покрытий тот или иной геометрический профиль, получаемый на свободной внутренней поверхности наносимого слоя в холодном состоянии главным образом зависит от соответствующих кинематических вариантов исполнения совместных вращений заготовки и порошка, помещенного с неполным заполнением ее внутреннего объема, и реализуемой при этом в каждом конкретном случае вращения определенной направленностью центробежных сил, действующих на порошковую систему.

В зависимости от кинематического исполнения устройства вращения холодное и горячее центробежное формование может осуществляться под давлением однонаправленных радиальных или осевых сил, разнонаправленных раздельно действующих радиальных и осевых сил, разнонаправленных совместно действующих радиальных и осевых сил, совместно действующих радиальных сил от собственного и внешнего вращения детали, что возбуждает в порошковой системе разнонаправленные активирующие силовые возмущения.

Таким образом, кинематический признак вращения в центробежном припекании объединяет основные факторы (направление возбуждаемых сил, форму образуемого покрытия, активирующие силовые возмущения и т.д.), определяющие технологические возможности способа. Поэтому кинематический признак целесообразно взять в качестве главного признака, относительно которого выполнить классификацию принципиальных схем центробежного формования порошковых покрытий. Такая классификация приведена на рис.1. В основе ее лежит анализ работ по центробежному индукционному нанесению порошковых покрытий припеканием и наплавкой [2-8].

По кинематическому исполнению принципиально схемы центробежного индукционного формования могут быть разделены на схемы процессов, в которых формование порошковых покрытий реализуется одноосным и двухосным вращением.

Формование покрытий одноосным вращением осуществляется относительно собственной оси детали и относительно внешней оси, перпендикулярной собственной оси детали.

Двухосное формование порошковых покрытий может осуществляться при совместном одновременном вращении относительно каждой оси и отдельным вращением – сначала относительно собственной оси, а затем относительно внешней.

Формование совместным вращением может быть также выполнено относительно взаимно пересекающихся осей в центре сферической детали.

Принципиальные технологические схемы центробежного индукционного припекания с формованием порошка, реализуемого одноосным вращением, приведены на рис. 2 а, б, в, г. В кинематическом исполнении они являются самыми простыми в технологии и поэтому их исполнению всегда отдают предпочтение.

Известно, что в технологии нанесения покрытий схему (см. рис. 2 а) с наружным нагревом горизонтально расположенной стальной заготовки и одноосным вращением относительно собственной оси с постоянной угловой скоростью вместе с шихтой, приготовленной из смеси металлических порошка с флюсом и помещенной в полость заготовки, обычно рекомендовали использовать для формования наплавкой бронзовых и твердосплавных слоев на внутренних поверхностях. Особенностью метода являлось формирование расплавленного металла под действием центробежных сил, которые, с одной стороны, гарантируют равномерное распределение расплавленного слоя на основном металле заготовки и удаление посторонних примесей, а с другой – ухудшают структуру полученных сплавов и усугубляют ликвационные явления. Трансформация этой схемы наплавки в схему припекания устранила бы указанные выше недостатки, но осуществление ее требует обеспечения определенных условий, гарантирующих формирование осесимметричного порошкового слоя при пониженных по сравнению с наплавкой температурах спекания. В отличие от наплавки формирование ассиметричного слоя в процессах припекания обеспечивается сыпучестью порошка, находящегося в твердом состоянии. Наличие большого количества порошкового флюса, вводимого при наплавке, недопустимо для процессов припекания, так как он ухудшает сыпучесть металлических порошков и их способность к формованию в холодном состоянии. Поэтому для осуществления рассматриваемой схемы припекания с одноосным вращением относительно собственной горизонтально расположенной оси предлагается использовать самофлюсующиеся сплавы. Необходимость введения флюса в данном случае отпадает, а операция формования гарантируется для сферических порошков крупной фракции.

Схема нанесения покрытий, изображенная на рис. 2б, отличается от схемы 2а внутренним расположением индуктора. Исполнение схемы с внутренним нагревом требует применения открытой с торца формы, что изменяет условия теплообмена с внешней средой. Схему используют в технологии наплавки, в которой формование слоя реализуется центробежной заливкой. Известно также применение ее и для наплавки порошковых материалов. При формовании порошковых покрытий необходимо отметить, что у открытой формы имеется больше технологических возможностей, чем у закрытой формы. Оно может осуществляться, как и в схеме, изображенной на рис.2а, с закрытой формой, за счет сыпучести порошка при вращении детали с порошком, помещенным во внутреннюю полость изделия. Возможен также вариант получения сформованного слоя при свободной засыпке порошка во вращающуюся форму путем распределения его по поверхности основы прямым воздействием формующего инструмента.

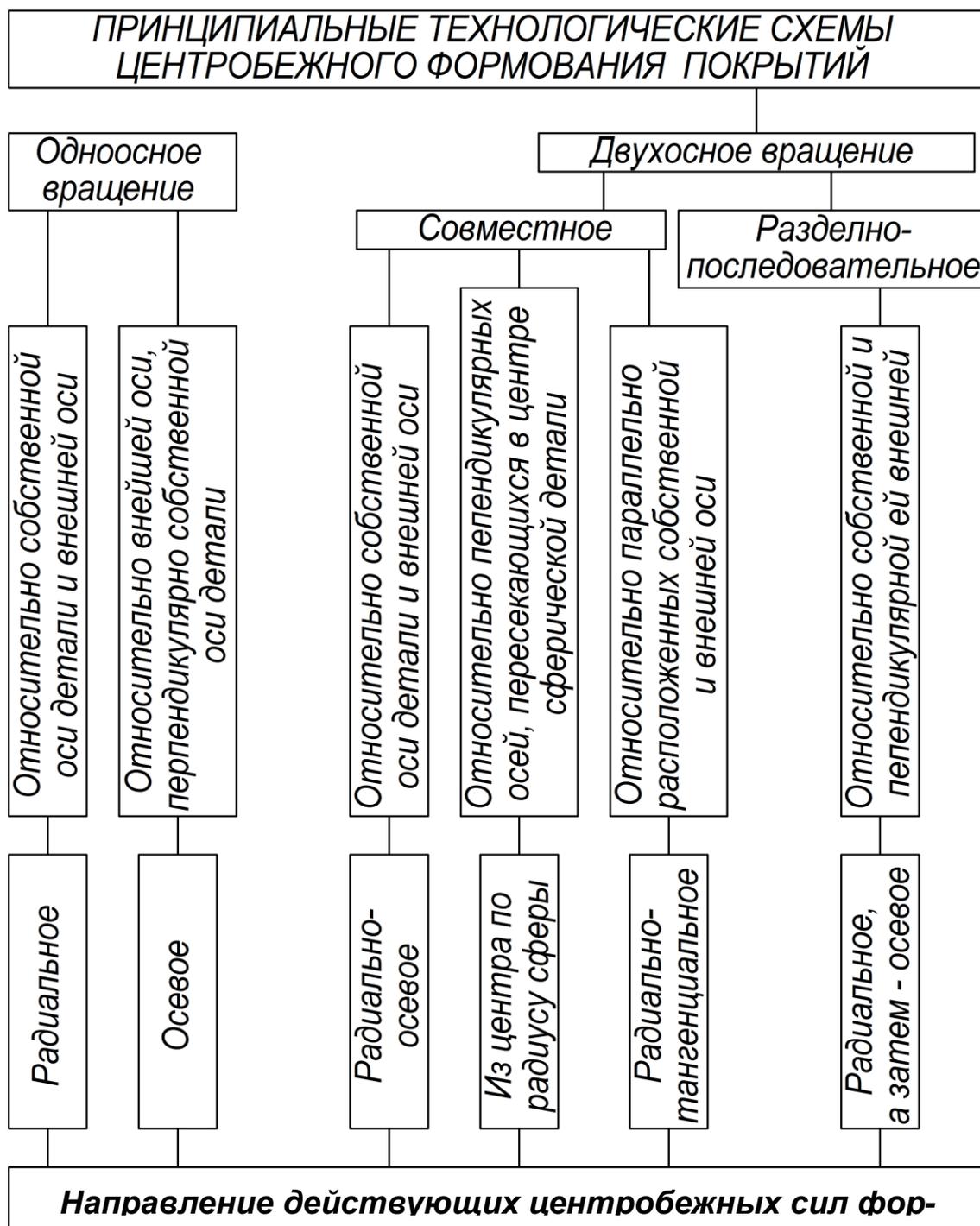


Рисунок 1. Классификация принципиальных технологических схем центробежного формования порошковых покрытий по кинетическому исполнению и направлению действующих сил

Схема нанесения покрытий с внутренним нагревом используется тогда, когда применение схемы с наружным нагревом невозможно в связи с необходимостью предохранения наружной поверхности зубчатого профиля от термического воздействия при восстановлении внутренней поверхности шестерни нанесением покрытия или, когда из-за большой толщины стенки детали (заготовки) наружный нагрев нецелесообразен по

экономическим и прочим соображениям. Рассматриваемая схема нанесения может быть применена для нанесения наплавкой неферромагнитных материалов (бронза, алюминий, твердые сплавы на никелевой основе и т.д.) на чугунные втулки, гильзы и другие детали.

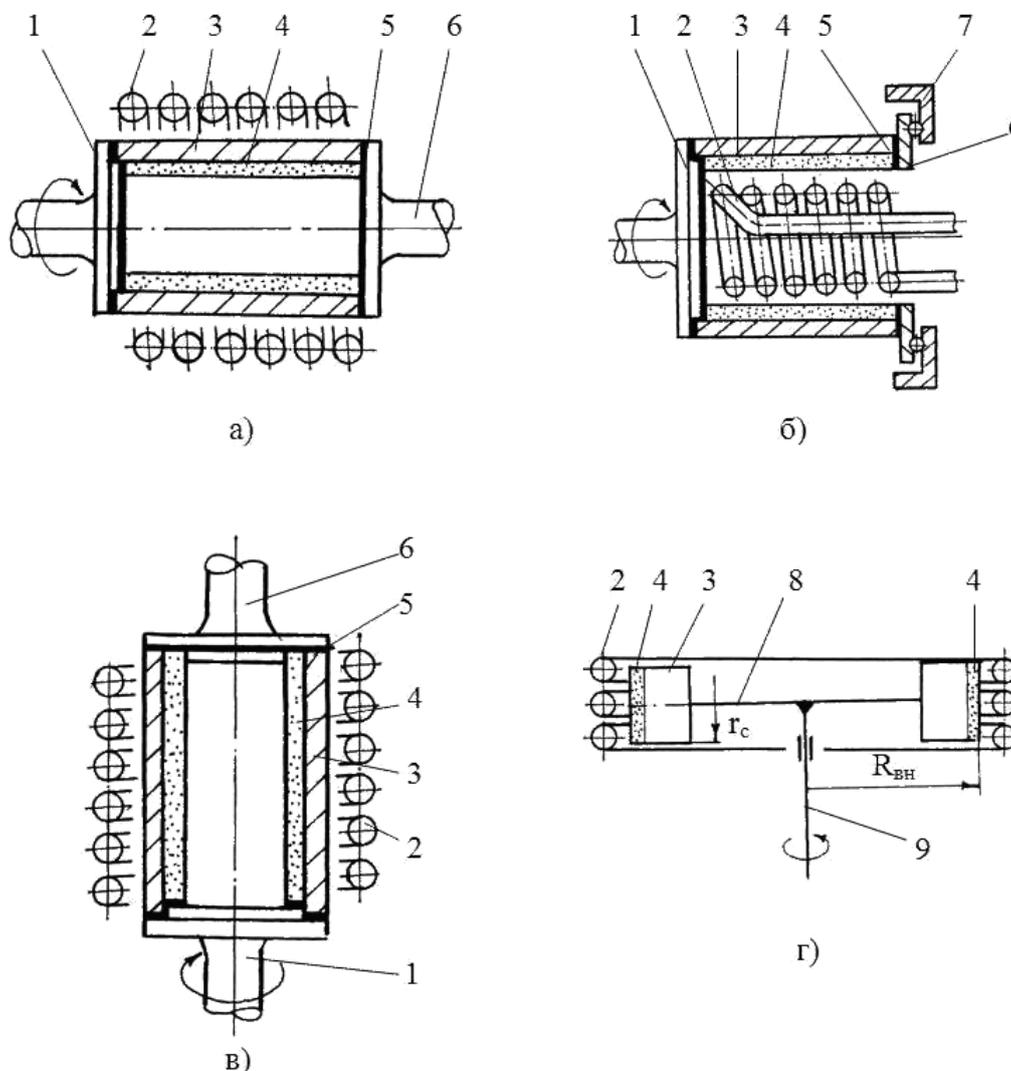


Рисунок 2. Принципиальные схемы центробежного индукционного нанесения покрытий с наружным (а, в, г) и внутренним (б) нагревом, при одноосном вращением заготовки относительно осей: собственной горизонтальной (а, б), вертикальной (в) и внешней (г)

1 – шпиндель центробежной машины; 2 – индуктор; 3 – заготовка;
 4 – наносимый порошок; 5 – прокладка; 6 – опорный диск. 7 – опора;
 8 – собственная ось детали; 9 – внешняя ось вращения, перпендикулярная собственной оси детали

В схеме центробежного индукционного нанесения покрытий, изображенной на рис. 2в, используется вертикальное расположение детали и наружный нагрев. Порошок

перед наплавкой помещают в кольцевой зазор, образованный внутренней поверхностью детали и концентрично расположенной цилиндрической оправкой. Данная технологическая схема наиболее универсальна, так как позволяет осуществлять наплавку порошков, в том числе несферических мелких фракций и композиций на их основе в независимости от их сыпучести, производить объемное дозирование засыпки и формировать покрытия постоянной толщины.

В схеме центробежного нанесения покрытий, показанной на рис. 2, одноосное вращение цилиндрической детали и помещенного в нее порошка осуществлено таким образом, что действие центробежных сил направлено вдоль ее оси. В технологии порошковой металлургии данную схему с осевой направленностью действия центробежных сил весьма эффективно используют для получения методом холодного формования стержней из твердых порошковых материалов. Метод горячего формования под давлением осевых центробежных сил нами предлагается использовать для получения покрытий на плоских и на наружных поверхностях цилиндрических деталей.

Принципиальные технологические схемы центробежного индукционного нанесения с формованием порошка, реализуемого двухосным вращением, приведены на рис. 3.

В схеме рис. 3а совместное вращение относительно собственной оси реализуется с угловой скоростью $\omega_{гс}$, а относительно внешней оси – с угловой скоростью $\omega_{R_{вн}}$. При соответствующем выборе этих неодинаковых угловых скоростей вращения в порошковом слое инициируются разнонаправленные радиально осевые силы, которые образуют криволинейную (полусферическую, полуэллипсоидную и т.д.) форму свободной внутренней поверхности.

Схема формования, изображенная на рис. 3б, представляет собой частный случай исполнения схемы рис. 2а. Внешняя и собственная ось имеет одинаковый радиус, что характерно для сферических деталей. Вращение этой детали относительно одинаковых взаимно пересекаемых радиусов осуществляют с одинаковыми угловыми скоростями. При этом на порошковую засыпку, помещенную во внутреннюю сферическую полость детали, действуют разнонаправленные центробежные силы одинаковой величины, которые образуют сферическую форму поверхности.

В схеме (см. рис.3в) с раздельным вращением детали радиусом r_c относительно собственной оси с угловой скоростью $\omega_{гс}$ и внешней оси радиусом $R_{вн}$ ($R_{вн} \gg r_c$) с угловой скоростью $\omega_{R_{вн}}$ предусматривается два этапа формования. На первом этапе порошковый слой формируют на внутренней цилиндрической или любой другой поверхности детали вращением на малом радиусе r_c с одновременным нагревом. При этом расположение оси детали может быть либо горизонтальное, если используется схема, показанная на рис.2а, либо любое – вертикальное или горизонтальное, если используется схема, изображенная на рис.2в. На втором этапе нагретый и сформованный на внутренней поверхности порошковый слой переформируют вращением на большем внешнем радиусе $R_{вн}$ в поверхность плоской (рис.3в), цилиндрической (рис.2 в) или другой более сложной конфигурации, соответствующей конфигурации центрального формирующего стержня. В схеме центробежного индукционного припекания (см. рис.3г) с одновременным вращением детали радиусом r_c относительно собственной оси с угловой скоростью $\omega_{гс}$ и параллельной ей внешней оси радиусом $R_{вн}$ с угловой скоростью $\omega_{R_{вн}}$ формование цилиндрических порошковых покрытий реализуется при условии соотношения угловых скоростей вращения, в которых $\omega_{гс} \gg \omega_{R_{вн}}$. При соответствующем подборе

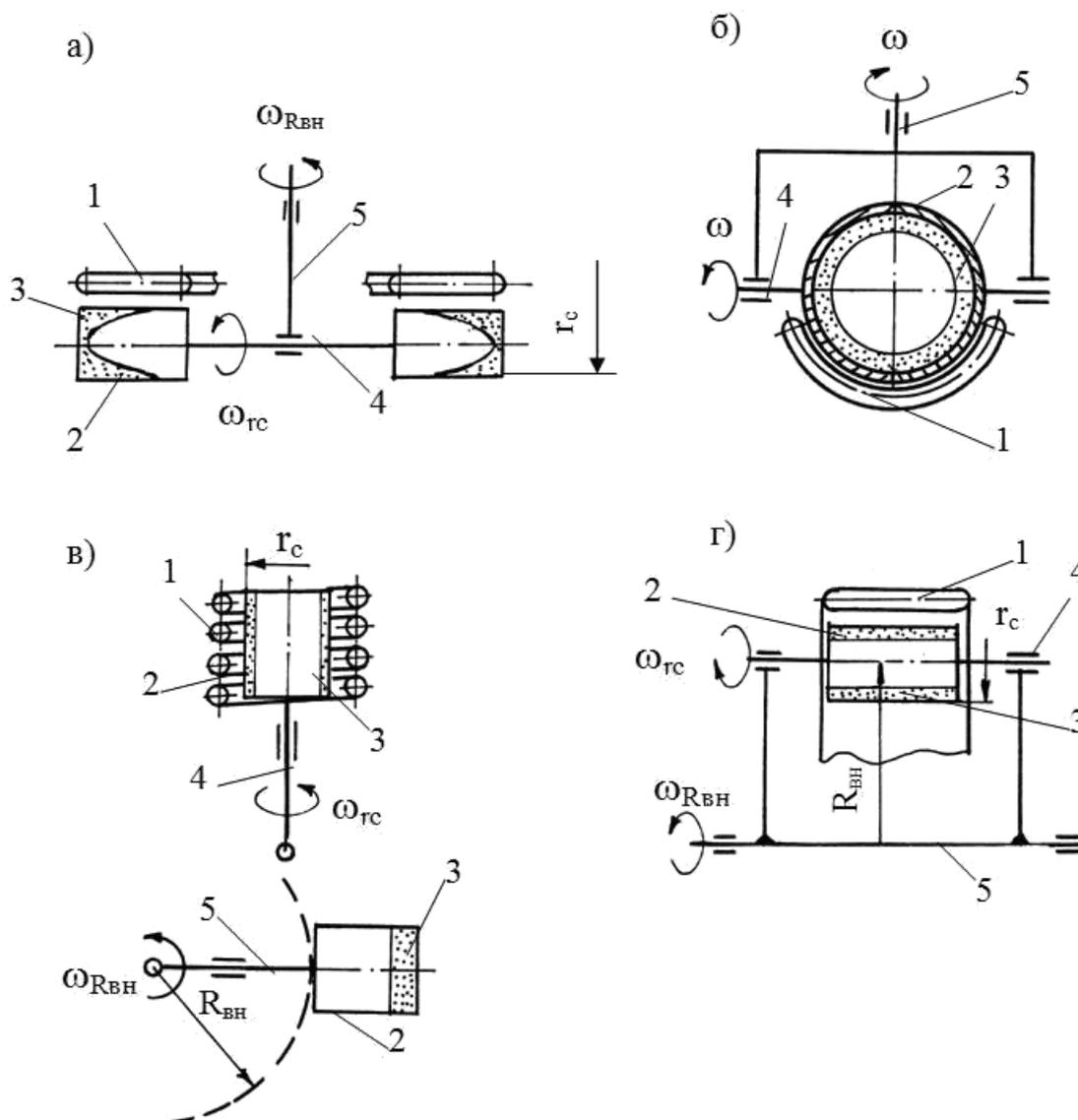


Рисунок 3. Принципиальные схемы центробежного индукционного припекания с формированием порошка, реализуемым двухосным совместным (а, б, г) и раздельным (в) вращением заготовки относительно осей: собственной и внешней (а, в), перпендикулярно пересекающихся в центре сферической детали (б), собственной и параллельной ей внешней (г)

1 – индуктор; 2 – деталь; 3 – порошок; 4 – собственная ось вращения; 5 – внешняя ось вращения

угловых скоростей из порошковой засыпки, помещенной во внутреннюю полость детали, цилиндрический слой формируется радиальными силами, возникающими от вращения детали вокруг собственной оси. При этом тангенциальные силы меньшего значения, возникающие от вращения детали вокруг внешней оси, не искажают геометрии слоя, но улучшают формуемость порошков, так как дополнительно возбуждают в них циркулирующие разнонаправленные силы, которые при холодном формировании разобьют частицы порошка, уменьшают их сцепляемость и, тем самым, улучшают их сыпучесть.

Действие этих сил на связанный слой при горячем формовании равноценно наложению активирующих вибраций в поперечном направлении к сформованному слою.

Таким образом, предложенная классификация центробежного индукционного нанесения порошковых покрытий по кинематическим признакам наиболее точно определяет технологическую сущность процессов нанесения покрытий, так как указывает на направление возбуждаемых сил и способ формования.

3. Разработка универсальных центробежных установок для нанесения покрытий

Универсальные центробежные установки предназначены для организации на заводах различного профиля участков по изготовлению широкой номенклатуры деталей с покрытиями. Поэтому оборудование этого типа должно легко перенастраиваться на работу с заготовками разных типоразмеров по любой из выбранных технологических схем, а также укомплектовываться необходимым набором технологической оснастки и приспособлений. Применение последней необходимо для того, чтобы обеспечить с требуемой производительностью изготовление заготовок с покрытиями в наладочном, механизированном и автоматическом режимах работы с использованием различных источников индукционного нагрева, в том числе, чтобы повысить качество покрытий (однородность свойств в механическом отношении по объему покрытия, прочность сцепления с основой и др.), уменьшить припуски на обработку для эффективной экономии дефицитных материалов. Обладая указанными свойствами, установки этого типа должны отличаться простотой управления.

На разработанном оборудовании обеспечивается возможность двух координатного перемещения заготовки относительно индуктора. Станина, выполненная в виде двух стоек, связанных между собой двумя направляющими, имеют возможность под влиянием привода перемещаться вперед и назад по отношению к рабочему месту оператора. При этом деталь, закрепленная в центрах между каретками, приближается или удаляется от источника тепла. От специального кулисного механизма, взаимодействующего с траверсой, кареткой вместе с деталью и сама траверса, которые смонтированы на трубе, перемещаются вдоль оси детали перпендикулярно указанному выше перемещению станины. Деталь при этом перемещается вдоль индуктора.

Оборудование может работать по схеме нагрева только с поперечным, только с продольным, одновременно с продольным и поперечным перемещениями, а также с применением позиционирования изделия относительно индуктора.

Разработанная универсальная установка (рис. 4) снабжена приводом поперечного перемещения станины, предназначенным для регулирования зазора между (рамочным петлевым или полосовым) индуктором и изделием или для изменения положения детали относительно внутреннего цилиндрического индуктора. Предусмотрена возможность осуществления этих наладок в процессе нагрева, с тем, чтобы обеспечить регулирование подводимой мощности и интенсивности нагрева. Это позволяет более оперативно и гибко управлять температурными параметрами нагрева изделий и, следовательно, получать покрытия требуемого качества.

С помощью механизма возвратно-поступательного перемещения зажимной каретки механизмируются и автоматизируются следующие операции: подвод и отвод каретки на заданную позицию; фиксация и расфиксация каретки в требуемом положении на гильзах салазок; упругое закрепление изделия; раскрепление и сброс изделия после охлаждения.



Рисунок 4. Реализация процесса центробежного индукционного формования покрытий на универсальной установке

Этот механизм вместе с салазками предельно упрощает или вовсе исключает переналадку установки при переходе на новый типоразмер.

Механизированный тип установки предусматривает использование приспособления с ручным приводом подъема заготовки на линию центров перед ее закреплением и опускание ее на позицию съема. Управление нагревом реализуется изменением мощности за счет регулировки зазора между индуктором и заготовкой. Автоматизированный тип установки предусматривает подачу и закрепление детали на позицию нагрева производить из накопителя, сброс ее из зоны нагрева производить с замедлением скорости падения. Управление нагревом целесообразно производить с помощью автоматической системы обеспечения заданных режимов нагрева и алгоритмов для автоматизированного поддержания заданного температурного массива.

Различные универсальные центробежные установки, изготавливаемые для внедрения процессов по нанесению покрытий с горизонтальной осью вращения, отличаются между собой элементной базой исполнения приводов (электромеханический, гидравлический и пневматический), степенью автоматизации вспомогательных операций и максимальными размерами вращаемой детали (диаметром и длиной до 500 мм). Наибольшее промышленное применение имеют установки для нанесения покрытий на заготовки средних размеров. Автоматизированные установки указанного назначения изготавливались с электромеханическими и гидравлическими приводами [9-10].

Для изготовления крупногабаритных биметаллических заготовок центробежным индукционным способом нагрев детали выполняют одновременно двумя и более источниками тепла.

4. Заключение

На основании известных и вновь разработанных принципиальных технологических схем центробежного формования порошковых покрытий дана их классификация по кинематическому исполнению, учитывающему направление действующих сил и обеспечивающих под влиянием раздельного действия радиальных, осевых, совместного действия радиально-осевых, радиально-тангенциальных и раздельного последовательного действия радиального и осевого направления сил для получения цилиндрических покрытий на цилиндрических поверхностях, плоских покрытий на торцевых поверхностях и покрытий другой более сложной эллипсоидной и сферической формы.

Разработан ряд универсальных центробежных установок, изготавливаемых для внедрения процессов по нанесению покрытий, отличающихся между собой элементной базой исполнения приводов (электромеханический, гидравлический и пневматический), степенью автоматизации вспомогательных операций и максимальными размерами вращаемой детали (диаметром и длиной до 500 мм). При этом наибольшее промышленное применение имеют установки для нанесения покрытий на заготовки средних размеров.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Белявин, К. Е. Индукционное упрочнение быстроизнашивающихся деталей узлов трения порошковыми покрытиями / К. Е. Белявин, И. А. Сосновский, А. Л. Худолей // Актуальные проблемы прочности: монография. В 2-х т. Т. 1 / под ред. В. В. Рубаника. – Витебск: УО «ВГТУ», 2018. – Гл. 15. – С. 272-290.
2. Дорожкин, Н. Н. Получение покрытий методом припекания / Н. Н. Дорожкин, Т. М. Абрамович, А. И. Жорник – Минск: Наука и техника, 1980. – 176 с.
3. Сосновский, И. А. Контроль и регулирование режимов нагрева в процессе центробежной индукционной наплавки порошковых покрытий / И. А. Сосновский, К. Е. Белявин, М. А. Белоцерковский, А. А. Курилёнок, О. О. Кузнечик // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы VI международной научно-практической конференции / ред.кол.: Маляревич А. М. (гл.ред.) [и др.]. – Минск: Бизнесофсет, 2018. – С. 21–22.
4. Белоцерковский, М. А. Технологические особенности изготовления разъемных биметаллических подшипников скольжения, получаемых центробежным индукционным методом / М. А. Белоцерковский, К. Е. Белявин К.Е., И. А. Сосновский, А. Л. Худолей, А. А. Куриленок // Актуальные вопросы машиноведения; сб. научн.тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. – Минск, 2018. – Вып. 7. – С. 134–137.
5. Дорожкин, Н. Н. Центробежное припекание порошковых покрытий при переменных силовых воздействиях / Н. Н. Дорожкин, Л. П. Кашицин, Т. М. Абрамович, И. А. Кирпиченко // Под ред. В. Г. Горобцова. – Минск: Наука и техника, 1993. – 159 с.
6. Белявин, К. Е. Инженерные методы расчета температурно-временных параметров в процессах центробежной индукционной наплавки покрытий / К. Е. Белявин, И. А. Сосновский, А. А. Курилёнок / Перспективные материалы и технологии : монография. В 2-х т. Т. 2 / под ред. чл.-корр. В.В. Рубаника. – Витебск: УО «ВГТУ», 2019. – Гл. 1. – С. 5–18.
7. Немков, В. С. Теория и расчет устройств индукционного нагрева / В. С. Немков, В. Б. Демидович. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
8. Сосновский, И. А. Моделирование процессов индукционной наплавки порошковых покрытий, содержащих наноразмерные модификаторы / И. А. Сосновский [и др.] // Вестник ПГУ, 2016. – Серия В. – № 3. – С. 66–74.
9. Кашицин, Л. П. Центробежное оборудование для нанесения порошковых покрытий / Л. П. Кашицин, А. Л. Худолей // Мир техники и технологий. – 2002. – № 1. – С. 17–21.
10. Кашицин, Л. П. Организация производства биметаллических деталей / Л. П. Кашицин, А. Л. Худолей, И. А. Сосновский, С. Е. Клименко // Мир техники и технологий. – 2002. – № 4. – С. 48–49.

Поступила в редколлегию 05.04.2020 г.