

Основные причины потери работоспособности узлов и механизмов – изнашивание и усталостные поломки деталей, их разрушение вследствие ползучести; коррозия, эрозия в различных средах; кавитационное разрушение и всевозможные сочетания этих причин. Свыше 80 % отказов обусловлено процессами изнашивания или комплексными причинами, в которых изнашивание играет доминирующую роль. Износ деталей различных групп по элементам составляет: 52 % – цилиндрические поверхности; 3 % – конические и сферические; 1 % – плоские; 1 % – профильные и фасонные; 2 % – зубья и шестерни; 3 % – шлицы; 5 % – пазы; 10 % – резьбы. Причем 13 % поверхностей имеют нарушение макрогеометрии и формы; трещины и изломы обнаружены у 9 % деталей. Разнообразие условий работы машин и видов изнашивания деталей обусловило появление множества методов восстановления и упрочнения изношенных поверхностей, каждый из которых имеет свою рациональную область применения и не может претендовать на универсальность.

УДК 621.923

ФОРМИРОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ ФЕРРОПОРОШКАМИ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

*д-р техн. наук, проф. М.Л. ХЕЙФЕЦ, канд. техн. наук, проф. Б.П. ЧЕМИСОВ,
Н.Л. ГРЕЦКИЙ, С.К. ТОЛСТИКОВ
(Полоцкий государственный университет)*

Рассмотрены конструкции полюсных наконечников электромагнита в установке для различного электрического упрочнения поверхностей деталей, позволяющие повысить качество формируемых покрытий ферромагнитными порошками. Предложена принципиальная электрическая схема подключения установки, позволяющая исследовать влияние фазового угла смещения между напряжением, питающим электромагнитную катушку, и напряжением, питающим сварочный трансформатор, на стабильность формирования покрытий ферропорошками в электромагнитном поле. Установлено, что наиболее благоприятные условия для максимального переноса ферропорошков на поверхность детали и очистки рабочего зазора от продуктов эрозии в твердой фазе и от частиц зерен ферропорошка, не участвовавших в разрядах, складываются под действием вибрации полюсного наконечника, когда частота и фаза следования импульсов напряжений в цепях технологического тока и электромагнитной катушки совпадают.

Введение. Повышение надежности и долговечности деталей машин во многом определяется состоянием их поверхностного слоя. Большинство деталей машин выходят из строя не из-за поломок, а в результате износа рабочего слоя. Поэтому актуальными являются как разработка новых, так и совершенствование известных методов восстановления [1].

При восстановлении поверхностей деталей машин используют различные способы нанесения покрытий, позволяющие получать поверхность с требуемым химическим составом, высокой твердостью и износостойкостью. Наиболее перспективными являются электрофизические методы, использующие энергию электромагнитного поля [2 – 5]. Одним из таких ресурсосберегающих методов и является электромагнитная наплавка [6 – 9].

Анализ существующих способов упрочнения. Существуют различные устройства для реализации процесса. Наиболее просты двухполюсные (рис. 1) и однополюсные (рис. 2) установки для упрочнения деталей в магнитном поле [7 – 9]. При упрочнении на двухполюсной установке деталь располагается между двумя сердечниками электромагнита, имеющими разноименную магнитную полярность. При упрочнении на однополюсной установке поверхность детали находится вблизи торца одного сердечника электромагнита. Процесс упрочнения на двухполюсной установке при всех прочих равных условиях имеет более высокую стабильность и производительность, а однополюсная установка более универсальна.

Работу двухполюсной установки можно пояснить на примере упрочнения наружной поверхности вращения. Упрочняемая деталь 1 (см. рис. 1) помещается с некоторым зазором между полюсными наконечниками 2 и 3 сердечников 4 и 5. Электромагнитные катушки 6 и 7 питаются постоянным или выпрямленным пульсирующим током. Магнитный поток пронизывает деталь в радиальном направлении. Сердечники подключаются к одному, а деталь через скользящий контакт 8 – к другому полюсу источника технологического тока. При вращении детали в зазоры между упрочняемой поверхностью и полюсными наконечниками сердечников электромагнита непрерывно подается из бункерного дозирующего устрой-

ства 9 ферромагнитный порошок 10. Ориентируясь в зазорах вдоль магнитных силовых линий, зерна ферропорошка образуют множество токопроводящих цепочек, замыкающих электрическую цепь между сердечниками и деталью. Под действием электрической эрозии в результате происходящих разрядов часть материала ферропорошка переносится на упрочняемую поверхность.

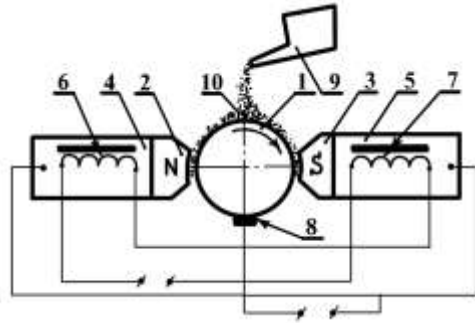


Рис. 1. Двухполюсная схема упрочнения наружной поверхности вращения ферропорошками в магнитном поле

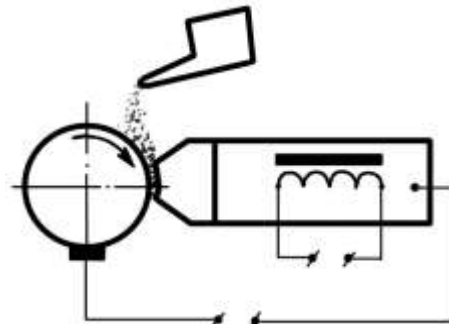


Рис. 2. Однополюсная схема упрочнения наружной поверхности вращения ферропорошками в магнитном поле

В существующих установках для реализации метода в качестве источников технологического тока применяют малораспространенные узкоспециальные машинные генераторы импульсов (типов МГИ и ШГИ), что является одним из сдерживающих факторов широкого внедрения процесса в промышленность. Возможно применение других источников тока, однако технологический процесс при этом малоэффективен. Процесс в большинстве случаев имеет низкую стабильность, обусловленную тем, что в рабочих зазорах часто происходит спекание массы ферропорошка и, как следствие, источник технологического тока переходит в режим короткого замыкания. В результате спекания перенос материала ферропорошка на упрочняемую поверхность уменьшается и может полностью прекратиться, в отдельных случаях это происходит и при использовании машинных генераторов импульсов.

Для повышения стабильности процесса его иногда проводят в потоке охлаждающей жидкости, но при этом следует учитывать некоторое уменьшение переноса материала ферропорошка на поверхность детали и ухудшение физико-механических свойств упрочняемого слоя [7, 9].

Реализация процесса упрочнения деталей ферропорошками в магнитном поле в среде азота [10], позволила установить, что замена воздушной среды азотом фактически не изменяет характеристик упрочненного слоя. Известен способ упрочнения, при котором для интенсификации процесса и улучшения качества поверхностного слоя процесс ведут в среде электролита, через который пропускают ток; уровень электролита поддерживают постоянным в условиях неполного погружения в него частиц ферропорошка [7]. Из-за сложности реализации данный способ имеет ограниченное применение в промышленности.

Для улучшения качества упрочненного слоя предложены устройства, обеспечивающие совмещение процесса упрочнения деталей ферропорошками в магнитном поле с поверхностным пластическим деформированием [2 – 5, 11, 12].

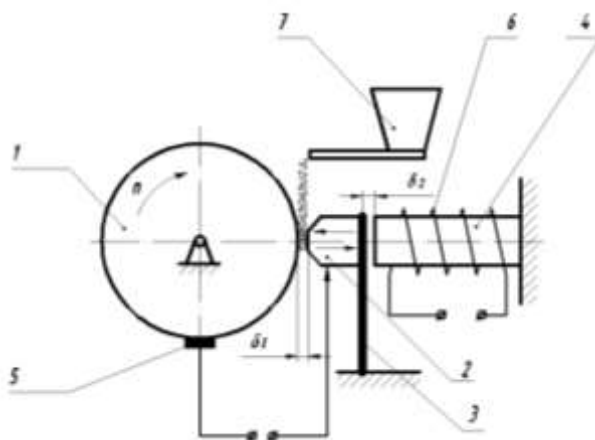


Рис. 3. Схема упрочнения поверхности вращения детали ферропорошками в пульсирующем магнитном поле при вибрации полюсного наконечника:

- 1 – деталь; 2 – полюсный наконечник;
- 3 – пластинчатая пружина; 4 – сердечник; 5 – скользящий контакт;
- 6 – электромагнитная катушка; 7 – дозирующее устройство

Для стабилизации процесса создана установка для упрочнения деталей в пульсирующем магнитном поле с вибрацией полюсного наконечника, которая исключает возможность возникновения короткого замыкания в цепи разрядного тока и позволяет использовать источники питания не импульсного типа [8]. Благодаря наличию вибрации сердечников процесс остается высокостабильным в широком диапазоне варьирования технологических факторов.

Способ реализуется следующим образом (рис. 3). Деталь 1 помещают с некоторым зазором δ_1 вблизи полюсного наконечника 2, который укреплен на пластинчатой пружине 3. Между полюсным наконечником и сердечником 4 электромагнита имеется воздушный промежуток δ_2 . Деталь через скользящий контакт 5 подключают к

отрицательному, а полюсный наконечник – к положительному полюсу источника технологического тока. В качестве источника тока может быть принят один из типов сварочных трансформаторов с выпрямляющим устройством, обеспечивающим однополупериодное выпрямление напряжения в его вторичной цепи. Электромагнитная катушка *б* питается выпрямленным по однополупериодной схеме током от промышленной сети. При вращении детали в рабочий зазор из бункерного дозирующего устройства *7* с определенным расходом непрерывно подают ферромагнитный порошок *8*. В процессе вибрации полюсный наконечник может оказывать импульсное механическое воздействие на формирующийся участок поверхностного слоя, что способствует повышению его сплошности и уменьшению шероховатости поверхности.

Установки для упрочнения поверхностей в электромагнитном поле. С целью повышения качества формирования покрытий в электромагнитном поле разработаны установки, обеспечивающие вращение полюсного наконечника (рис. 4, 5).

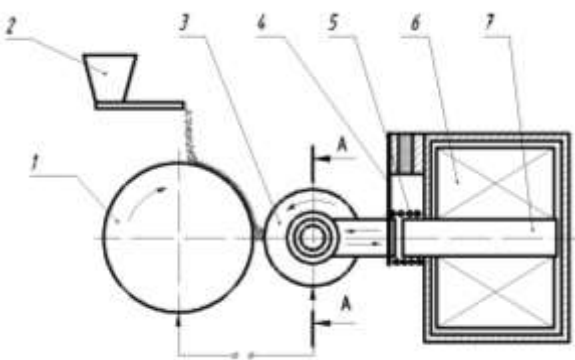


Рис. 4. Устройство с самовращающимся осциллирующим наконечником:
1 – обрабатываемая деталь; 2 – дозирующее устройство;
3 – самовращающийся наконечник;
4 – гибкая металлическая пластина; 5 – пружина;
6 – электромагнитная катушка; 7 – сердечник

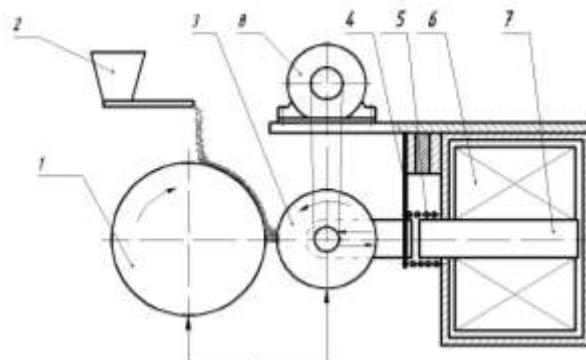


Рис. 5. Устройство с принудительно вращающимся осциллирующим наконечником:
1 – обрабатываемая деталь; 2 – дозирующее устройство;
3 – самовращающийся наконечник; 4 – гибкая металлическая пластина; 5 – пружина; 6 – электромагнитная катушка;
7 – сердечник; 8 – электродвигатель

Дополнительное движение рабочей поверхности полюсного наконечника способствует лучшей очистке рабочего зазора от частиц ферропорошка, не участвовавших в предыдущих разрядах, и от продуктов эрозии в твердой фазе, что повышает стабильность образования токопроводящих цепочек и увеличивает перенос капель расплава порошка на поверхность детали.

Перемещение рабочей поверхности полюсного наконечника может быть как результатом самовращения (см. рис. 4) – в случае его импульсного трибомеханического воздействия на формируемый участок покрытия, так и принудительным (см. рис. 5) – при использовании привода от электродвигателя.

Конструкция устройства для принудительного вращения полюсного наконечника несколько сложнее, чем для самовращающегося. Принудительное вращение позволяет осуществлять проскальзывание поверхности заготовки относительно поверхности полюсного наконечника в момент его импульсного механического воздействия на формируемый участок покрытия, что приводит к сглаживанию неровностей. Проскальзывание поверхностей полюсного наконечника относительно заготовки достигается при разных окружных скоростях вращения.

Рабочая поверхность полюсного наконечника может быть гладкой (рис. 6, *а*), с поперечными (рис. 6, *б*) и продольными (рис. 6, *в*) пазами.

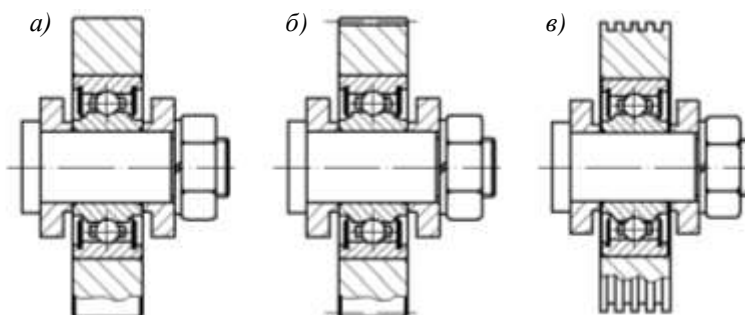


Рис. 6. Конструкции полюсного наконечника с гладкой рабочей поверхностью (*а*), с поперечными (*б*) и продольными (*в*) пазами

Гладкая поверхность полюсного наконечника в конструкции для принудительного вращения обеспечивает увеличение сплошности наносимого покрытия за счет сглаживания выступов на его поверхности.

Поперечные пазы увеличивают количество ферропорошка, транспортируемого и удерживаемого в рабочем зазоре, что повышает толщину наносимого покрытия.

Продольные пазы на поверхности вращающегося наконечника способствуют концентрации магнитного потока, повышают количество порошка, удерживаемого в рабочем зазоре, увеличивают концентрацию энергии разрядного тока, способствуют повышению производительности, стабильности процесса расплавления порошка и его последующего переноса на поверхность детали.

На качество формирования покрытий в электромагнитном поле существенное влияние оказывает взаимная направленность электрического тока и магнитной индукции и фазовые соотношения напряжений, питающие электромагнитную катушку и сварочный трансформатор.

Разработанные установки могут реализовывать различные схемы взаимной направленности электрического тока и магнитной индукции (рис. 7). Наибольший перенос порошка и производительность процесса обеспечивается при подключении по схеме, представленной на рисунке 7, б [6, 9, 12].

Для обеспечения высокой стабильности процесса и переноса капель расплава ферропорошка на формируемый участок покрытия необходимо, чтобы после завершения электрических разрядов за

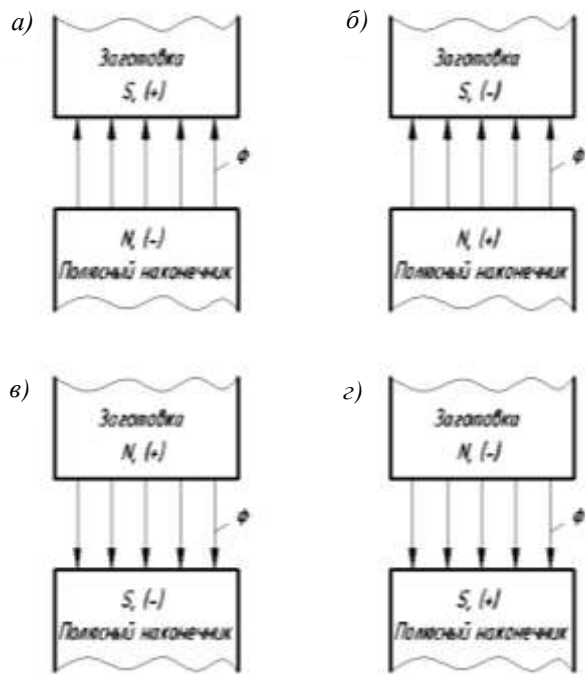


Рис. 7. Схемы взаимного расположения заготовок и полюсных наконечников при электромагнитном упрочнении и наплавке: N, S – магнитная полярность; (+), (–) – электрическая полярность; Φ – поток магнитной индукции

одним импульсом напряжения в цепи технологического тока величина магнитной индукции в рабочем зазоре принимала минимально возможное значение. В этом случае создаются наиболее благоприятные условия для очистки зазора под действием вибрации полюсного наконечника от продуктов эрозии в твердой фазе и от части зерен ферропорошка, не участвовавших в разрядах.

Одновременно повысить производительность и качество покрытия при высокой стабильности процесса возможно в случае, если величина магнитной индукции будет уменьшаться от момента начала к моменту завершения электрических разрядов за один импульс напряжения в цепи технологического тока, а электрические разряды будут завершаться к моменту импульсного механического воздействия полюсного наконечника на формируемый участок поверхностного слоя детали. Максимальная величина магнитной индукции должна быть близка к значению, при котором наблюдается наибольший перенос материала ферропорошка на поверхность детали. Таким образом, частота и фаза следования импульсов напряжений в цепях технологического тока и электромагнитной катушки должны совпадать.

Методика проведения испытаний. Применяемые электрические схемы с источником технологического тока (ТД-500) в существующих установках [5 – 9, 11, 12] не могут обеспечить совпадение частоты и фазы следования импульсов напряжений, так как в них используются двухфазные трансформаторы, питаемые линейным напряжением 380 В, а для питания электромагнитной катушки используют фазное напряжение 220 В.

Для изучения влияния фазового угла смещения между напряжением U_k , питающим электромагнитную катушку для создания вибрации полюсного наконечника и переменного магнитного потока, и напряжением U_t , питающим сварочный трансформатор, предложена принципиальная электрическая схема (рис. 8).

Источником технологического тока служит сварочный аппарат ТДМ 205, подключаемый к однофазному напряжению 220 В. Предохранители FU1...FU4 защищают установку от высокой перегрузки, а тепловое реле РТ – от незначительной длительной перегрузки. Контактные реле К1...К4 и реле Р1, Р2 обеспечивают различные варианты смещения напряжений U_k от U_t . Лампочки L1...L3 показывают, на какую

из фаз включен сварочный трансформатор. Диоды VD1...2 обеспечивают однополупериодное напряжение питания.

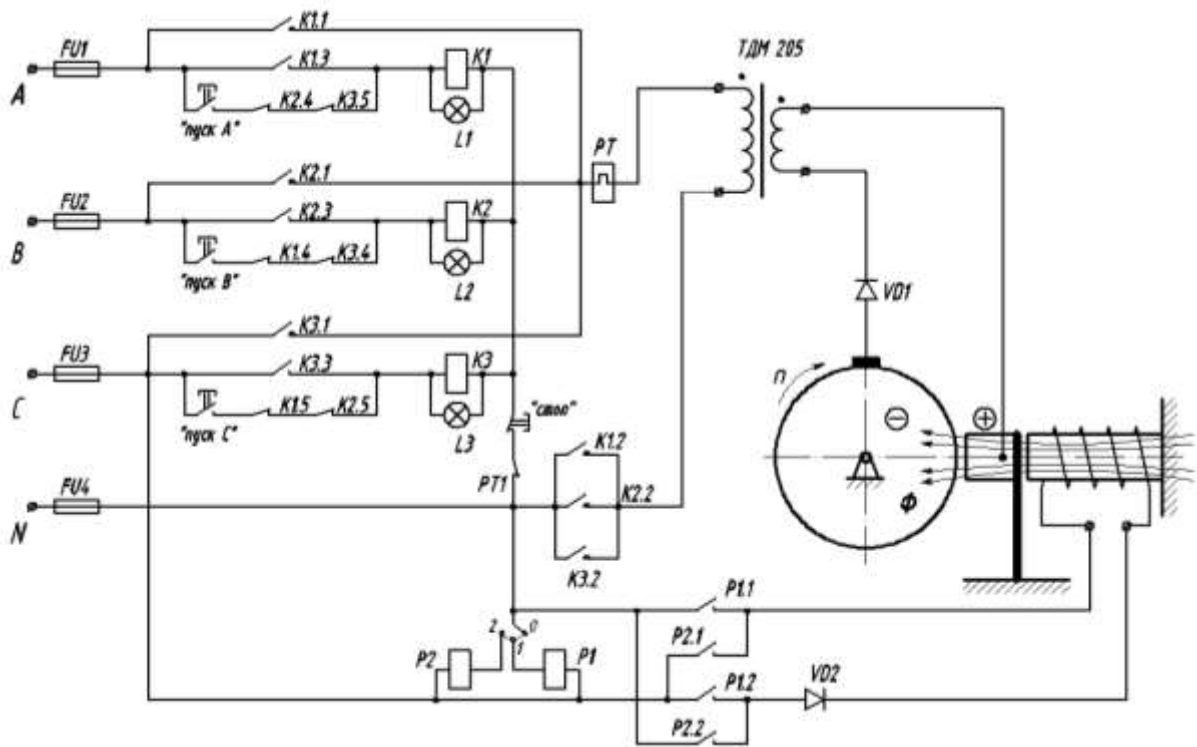


Рис. 8. Принципиальная электрическая схема установки для упрочнения поверхности детали ферропорошками в электромагнитном поле

Предложенная электрическая схема (см. рис. 8) позволяет реализовать шесть возможных вариантов фазового смещения напряжения цепи технологического тока относительно напряжения электромагнитной катушки (рис. 9) по схеме (см. рис. 7, б) максимального переноса капель расплава ферропорошка на формируемый участок покрытия.

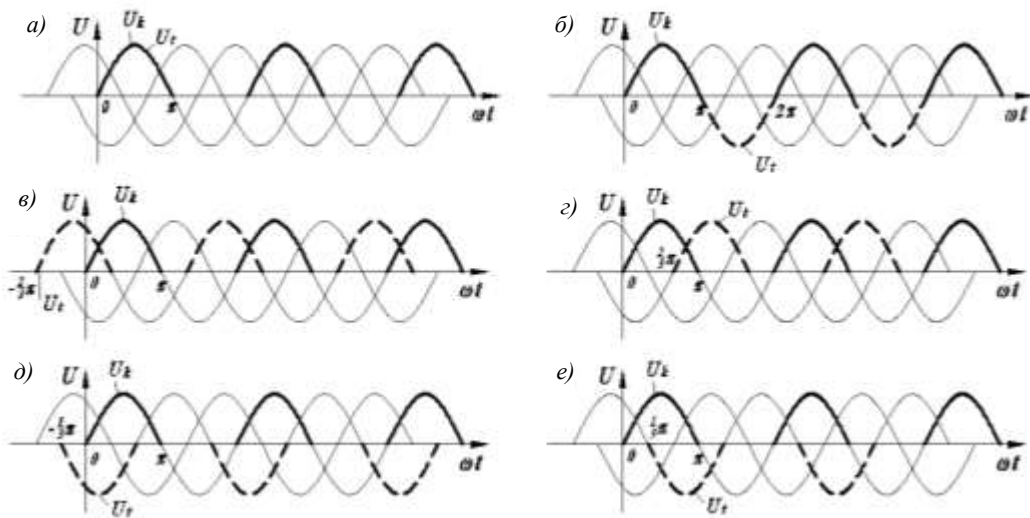


Рис. 9. Варианты фазового смещения напряжения цепи технологического тока U_t относительно напряжения цепи электромагнитной катушки U_k :
 ω – угловая частота переменного тока; t – время

Схема, представленная на рисунке 9, а, позволяет реализовать режим работы установки без фазового смещения (смещение составляет 0°).

Схема (см. рис. 9, б) обеспечивает режим работы в противофазе (смещение составляет 180°).

Схема (см. рис. 9, в) реализует режим с опережением напряжения цепи технологического тока относительно напряжения цепи электромагнитной катушки на 120°.

Схема (см. рис. 9, г) обеспечивает режим с отставанием напряжения цепи технологического тока относительно напряжения цепи электромагнитной катушки на 120°.

Схема (см. рис. 9, д) реализует режим с опережением напряжения цепи технологического тока относительно напряжения цепи электромагнитной катушки на 60°.

Схема (см. рис. 9, е) обеспечивает режим с отставанием напряжения цепи технологического тока относительно напряжения цепи электромагнитной катушки на 60°.

Определение порядка или последовательности чередования фаз в трехфазной симметричной системе ЭДС (напряжений) производится с помощью указателя последовательности чередования фаз. В простейшем исполнении он состоит из двух одинаковых ламп накаливания и конденсатора (рис. 10) [13].

Емкость конденсатора C подбирают так, чтобы емкостное сопротивление $X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$ равнялось сопротивлению каждой лампы: $R_1 = R_2 = X_C$.

Если концы указателя подключить к концам симметричной трехфазной системы ЭДС, то потенциал нулевой точки схемы на рисунке 10 будет определяться положением точки N' на векторной диаграмме (рис. 11).

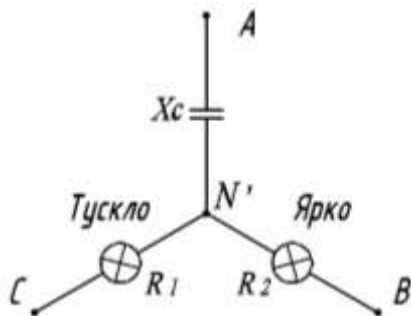


Рис. 10. Указатель последовательности чередования фаз

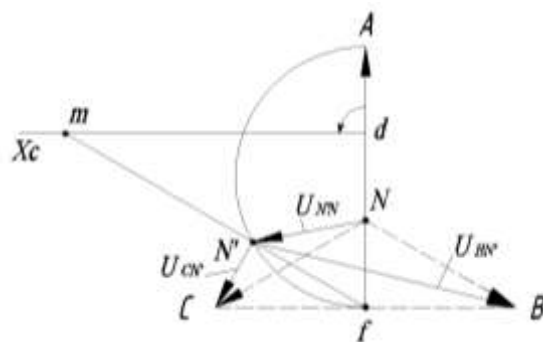


Рис. 11. Векторная диаграмма

Из диаграммы (см. рис. 11) видно, что напряжение на лампах накаливания будет различно: на лампе, включенной в фазу B , оно определяется вектором $U_{BN'}$; на лампе, включенной в фазу C , – вектором $U_{CN'}$.

Так как $U_{BN'} > U_{CN'}$, то лампа в фазе B будет гореть более ярко, чем лампа в фазе C .

Следовательно, если фазу трехфазной системы ЭДС, к которой подключен конденсатор, принять за фазу A , то фаза, к которой окажется подключенной ярко горящая лампа, – фаза B , а фаза с тускло горящей лампой – фаза C .

Результаты и их обсуждение. На установке (см. рис. 3), подключенной по принципиальной электрической схеме (см. рис. 8), было упрочнено для каждого варианта фазового смещения (см. рис. 9) по пять предварительно взвешенных образцов (рис. 12 – 17) на одинаковых режимах упрочнения [8, 14]:

- разрядный ток – до 100 А;
- магнитная индукция в рабочем зазоре – 0,6 Т;
- окружная скорость вращения образца – 0,3 м/с;
- рабочий зазор – 1,5 мм;
- зернистость применяемого ферропорошка марки ФБ-1 – 200...400 мкм;
- подача ферропорошка в рабочий зазор – 17 г/мин.

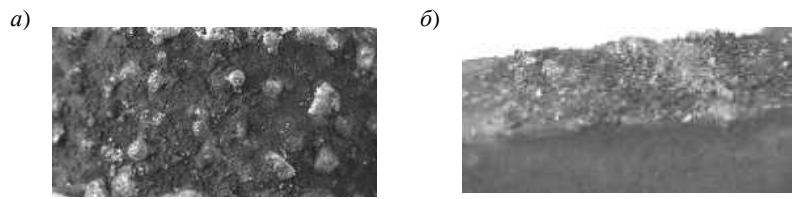


Рис. 12. Поверхность образца (а) и полюсного наконечника (б) после упрочнения на режиме без смещения напряжения цепи технологического тока относительно напряжения цепи электромагнитной катушки

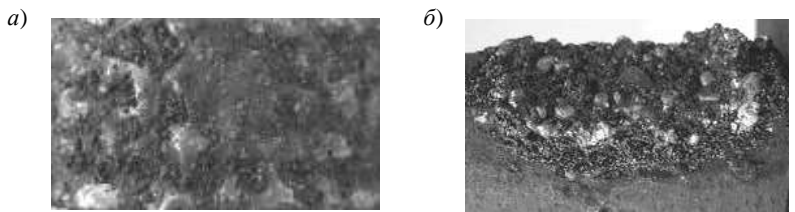


Рис. 13. Поверхность образца (а) и полюсного наконечника (б) после упрочнения на режиме со смещением напряжения цепи технологического тока относительно напряжения цепи электромагнитной катушки на 180°

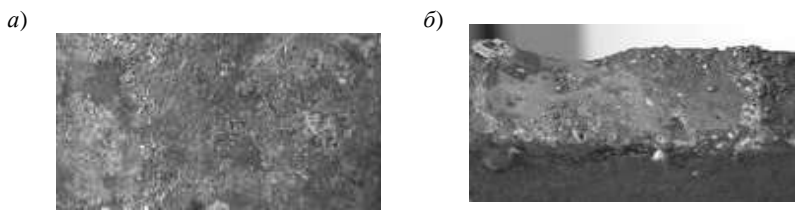


Рис. 14. Поверхность образца (а) и полюсного наконечника (б) после упрочнения на режиме с опережением напряжения цепи технологического тока относительно напряжения цепи электромагнитной катушки на 120°

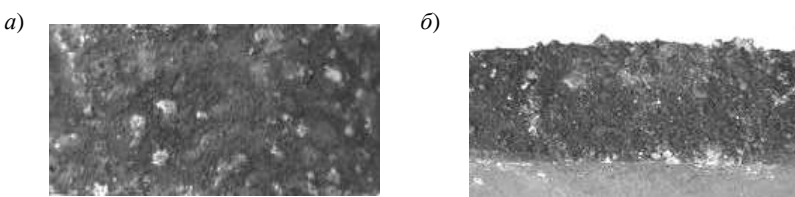


Рис. 15. Поверхность образца (а) и полюсного наконечника (б) после упрочнения на режиме с отставанием напряжения цепи технологического тока относительно напряжения цепи электромагнитной катушки на 120°

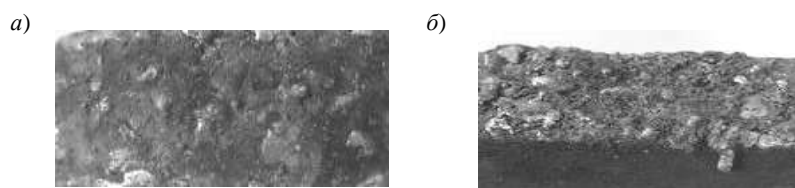


Рис. 16. Поверхность образца (а) и полюсного наконечника (б) после упрочнения на режиме с опережением напряжения цепи технологического тока относительно напряжения цепи электромагнитной катушки на 60°

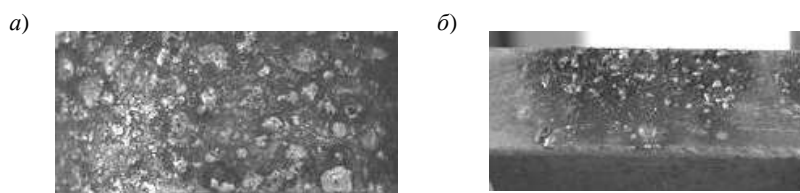


Рис. 17. Поверхность образца (а) и полюсного наконечника (б) после упрочнения на режиме с отставанием напряжения цепи технологического тока относительно напряжения цепи электромагнитной катушки на 60°

Анализ полученных результатов (см. рис. 12 – 17) позволяет сделать следующие **выводы**.

Максимальный привес как образцов, так и полюсных наконечников приходится при упрочнении по варианту (см. рис. 12), обеспечивающему режим работы установки со смещением напряжения цепи технологического тока относительно напряжения цепи электромагнитной катушки на 180° (см. рис. 9, а). Однако при этом процесс идет не стабильно, с сильным разогревом поверхностей детали и полюсного наконечника. Не происходит очистка рабочего зазора от продуктов эрозии в твердой фазе и от части зерен ферропорошка, не участвовавших в разрядах. Покрытие образуется пористое, а его соединение с основой слабое из-за неполного проплавления ферропорошков. В результате происходит налипание зерен ферропорошка как на рабочую поверхность полюсного наконечника, так и на деталь, вызывая резкое уменьшение величины рабочего зазора, что приводит к короткому замыканию.

Минимальный привес детали, при малой пористости и максимальной сплошности нанесенного покрытия достигается при упрочнении по варианту (см. рис. 14), когда напряжение U_t , питающее сварочный трансформатор, опережает напряжение U_k , питающее электромагнитную катушку, на угол 120° (см. рис. 9, в). Процесс упрочнения также идет не стабильно. Увеличение длины дуги приводит к росту температуры в рабочем зазоре, и в результате к сильному разогреву поверхности детали и оплавлению рабочей поверхности полюсного наконечника. Оплавление поверхности полюсного наконечника увеличивает рабочий зазор и снижает количество порошка, удерживаемого в нем.

При упрочнении по варианту (см. рис. 16), когда напряжение U_t , питающее сварочный трансформатор, опережает напряжение U_k , питающее электромагнитную катушку, на угол 60° (см. рис. 9, д), процесс происходит более стабильно, но незначительно увеличивается привес детали по сравнению с предыдущим вариантом. Однако сильный разогрев полюсного наконечника значительно снижает его ресурс и приводит к высокому тепловложению в деталь, что может вызвать ее коробление.

Все вышерассмотренные варианты из-за нестабильности процесса упрочнения, низкой производительности и больших тепловложений в деталь не могут быть рекомендованы к практическому применению.

При упрочнении по другим вариантам (см. рис. 12, 15, 17) процесс протекает стабильно. Среди них максимальный привес образца наблюдается при упрочнении (см. рис. 12), когда угол смещения составляет 0° (см. рис. 9, а). При этом происходит незначительный нагрев детали и полюсного наконечника. Перенос расплава порошка осуществляется крупными плотными каплями.

При упрочнении по варианту (см. рис. 15), когда напряжение U_t , питающее сварочный трансформатор, отстает от напряжения U_k , питающего электромагнитную катушку, на угол 120° (см. рис. 9, з), перенос расплава порошка осуществляется более мелкими каплями, что повышает сплошность покрытия. При этом несколько снижается привес образцов и увеличивается привес полюсных наконечников.

Упрочнение по варианту (см. рис. 17), когда напряжение U_t , питающее сварочный трансформатор, отстает от напряжения U_k , питающего электромагнитную катушку, на угол 60° (рис. 9, е), обеспечивает перенос расплава порошка мелкими каплями, что значительно увеличивает сплошность и уменьшает шероховатость покрытия, при этом снижается привес образцов и полюсных наконечников. Из-за незначительного переноса расплава порошка на рабочую поверхность полюсного наконечника и невысокой эрозии, рабочий зазор остается длительное время постоянным, что значительно повышает стабильность процесса упрочнения. При данном варианте стойкость полюсного наконечника максимальна.

Заключение. Технологический процесс формирования поверхности в электрическом поле, когда отсутствует фазовое смещение напряжения U_t , питающего сварочный трансформатор, относительно напряжения U_k , питающего электромагнитную катушку (см. рис. 9, а), можно рекомендовать для упрочнения поверхностей (см. рис. 12) с последующей обработкой до первоначального размера, оставляя при этом только диффузионный слой.

Технологический процесс, в котором напряжение U_t , питающее сварочный трансформатор, отстает от напряжения U_k , питающего электромагнитную катушку, на угол 120° (см. рис. 9, б), рекомендуется для восстановления и упрочнения (см. рис. 15) изношенных до 0,1...0,3 мм поверхностей деталей.

Технологический процесс, в котором напряжение U_t , питающее сварочный трансформатор, отстает от напряжения U_k , питающего электромагнитную катушку, на угол 60° (см. рис. 9, в), целесообразно использовать при комбинированном восстановлении и упрочнении (см. рис. 17) поверхностей деталей машин со значительным износом (например, с последующей наплавкой углеродистой проволоки).

ЛИТЕРАТУРА

1. Технологические основы управления качеством машин / А.С. Васильев [и др.]. – М.: Машиностроение, 2003. – 256 с.
2. Хейфец, М.Л. Процессы самоорганизации при формировании поверхностей / М.Л. Хейфец, Л.М. Кожуро, Ж.А. Мрочек. – Гомель: ИММС НАНБ, 1999. – 276 с.
3. Гордиенко, А.И. Синергетические аспекты физико-химических методов обработки / А.И. Гордиенко [и др.]. – Минск: ФТИ; Полоцк: ПГУ, 2000. – 172 с.
4. Gordienko, A.I. Combined physico-chemical treatment: synergetic aspects / A.I. Gordienko [etc]. – Minsk: Technoprint, 2004. – 200 p.
5. Кожуро, Л.М. Обработка деталей машин в магнитном поле / Л.М. Кожуро, Б.П. Чемисов. – Минск: Наука и техника, 1995. – 232 с.
6. Мрочек, Ж.А. Прогрессивные технологии восстановления и упрочнения деталей машин / Ж.А. Мрочек, Л.М. Кожуро, И.П. Филонов. – Минск: Технопринт, 2000. – 268 с.
7. Акулович, Л.М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле / Л.М. Акулович. – Новополоцк: ПГУ, 1999. – 240 с.
8. Абрамов, В.И. Исследование технологического процесса упрочнения деталей ферропорошками в пульсирующем магнитном поле / В.И. Абрамов: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.02.08 / Физ.-техн. ин-т Акад. наук БССР. – Минск, 1982. – 19 с.
9. Ракомсин, А.П. Упрочнение и восстановление изделий в электромагнитном поле / А.П. Ракомсин; под. ред. А.П. Витязя. – Минск: Парадокс, 2000. – 201 с.
10. Акулович, Л.М. Выбор магнитных и электрических параметров процесса магнитоэлектрического упрочнения в среде азота / Л.М. Акулович, М.А. Рощеня // Вопросы прочности и пластичности металлов: сб. – Минск: ФТИ АН БССР, 1974. – С. 213 – 214.
11. Чистосердов, П.С. Технология размерно-чистой и упрочняющей обработки / П.С. Чистосердов [и др.]. – Минск: Университетское, 1993. – 188 с.
12. Кожуро, Л.М. Ресурсо- и энергосберегающие технологии в сельскохозяйственном машиностроении и ремонтном производстве / Л.М. Кожуро, А.В. Крутов, П.С. Чистосердов. – Минск: БГАТУ, 2003. – 249 с.
13. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи / Л.А. Бессонов. – М.: Высш. шк., 1978. – 528 с.
14. Оптимизация технологических параметров формирования износостойких покрытий электромагнитным способом / Ж.А. Мрочек [и др.] // Электронная обработка материалов. – 1991. – № 2. – С. 22 – 25.

Поступила 17.01.2007