

А.А. ХРУЦКИЙ, канд. техн. наук, доц.,
Н.Н. СЛАТВИНСКИЙ, Ю.И. ЧУМАК, старшие преподаватели
Криворожский национальный университет

ПРОГРЕССИВНЫЕ МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ГОРНЫХ МАШИН

В статье рассмотрены прогрессивные направления и методы восстановления деталей горных машин, проведен их анализ, отмечены достоинства и области применения каждого из направлений. В результате анализа современных методов ремонта выделены 3 основных направления: технологии плазменного и газового напыления, мобильные ремонтные комплексы, применение полимерных материалов и металлокерамики. Детали, восстановленные рассмотренными видами напыления, по своим физико-механическим свойствам превосходят новые детали. Применение мобильных ремонтных комплексов позволяет значительно снизить затраты на ремонт за счет уменьшения времени на подготовительные операции поскольку нет необходимости проводить полный демонтаж ремонтируемого оборудования, однако пока технология восстановления ограничивается наплавкой в среде инертных газов. Применение полимерных клеев для соединения деталей при ремонте позволяет восстановить первоначальные геометрические размеры разрушенной детали, обеспечивая работоспособность конструкций при контакте с органическими растворителями, агрессивными средами (кислоты, щелочи и др.) в широком интервале температур и давлений. Применение металлокерамики позволяет восстанавливать детали машин иногда без разборки узлов, однако применение этих методов восстановления приводит к изменениям структуры металла и невозможности в дальнейшем применения других методов восстановления.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Одной из наиболее актуальных задач, стоящих перед современным предприятием, имеющим в своем распоряжении сложное дорогостоящее в обслуживании оборудование, является необходимость обеспечения его надежной работы. Поддержание рабочей готовности технологических активов достигается в основном за счет ремонтного и технического обслуживания оборудования. Целесообразность восстановления деталей диктуется также большими темпами роста парка горных машин и отставанием производства запасных частей к ним. Кроме того, при снятии с производства (переходе на новую марку) горных машин потребность в запасных частях сохраняется еще продолжительное время.

Постоянное возрастание затрат на ремонтнообслуживание требует изыскания более прогрессивных методов ремонта оборудования, обеспечивающих максимальный срок службы детали и наименьшую стоимость ее восстановления.

Анализ исследований и публикаций. Технологии ремонта, используемые на протяжении последних десятилетий, уже не обеспечивают необходимых технико-экономических показателей, требуемых современной промышленностью. А некоторые прогрессивные технологии ремонта, благодаря новым открытиям и разработкам стали намного эффективнее. На сегодня множество организаций предлагает услуги восстановления деталей и узлов машин с использованием новых ремонтных технологий.

Исходя из проведенного анализа литературных источников [1-12], можно выделить следующие перспективные направления восстановления деталей горных машин: технологии плазменного и газового напыления, мобильные ремонтные комплексы и применение полимерных материалов и металлокерамики.

Постановка задачи. Провести анализ перспективных методов восстановления при ремонте изношенных деталей горных машин, рассмотрев их особенности и технические возможности.

Изложение материала и результаты. Главной причиной значительных затрат на ремонт и техническое обслуживание технологического оборудования горнорудных предприятий является его интенсивный износ вследствие работы в агрессивной среде, а восстановление деталей на сегодняшний день применяется в основном при отсутствии запасных частей. Это все приводит к тому, что затраты в сфере эксплуатации горнорудного оборудования постоянно возрастают и увеличиваются в 5-25 раз от первоначальной цены нового оборудования. Поэтому в ходе ремонта необходимо не только восстановить первоначальное состояние оборудования, но и улучшить его основные технические характеристики. Метод восстановления должен обеспечить полноценность детали в условиях эксплуатации и быть экономически целесообразным. При выборе метода восстановления необходимо учитывать стоимость восстановления и долговечность не

только восстанавливаемой детали, но и детали, с ней сопряженной, поскольку износ сопряженной детали зависит от метода восстановления ремонтируемой детали.

Рассмотрим указанные ранее перспективные направления восстановления подробнее.

Технологии плазменного и газового напыления. На сегодня разработано достаточно много технологий плазменного и газового напыления и их модификаций. Выделим основные из них: электроискровое легирование или электроискровое нанесение покрытий, финишное плазменное упрочнение, плазменно-дуговая наплавка, плазменная модификация, газопламенное напыление покрытий, высокоскоростное напыление и детонационно-газовый метод напыления.

В табл. 1 приведены характеристики методов плазменного и газового напыления. Следует отметить, что многие характеристики имеют довольно большие диапазоны значений. Это объясняется тем, что при нанесении покрытий рассмотренными методами могут использоваться совершенно разные материалы, имеющие соответственно разные свойства. Причем могут напыляться как черные и цветные металлы и их соединения, так и керамика и металлокерамика.

Электроискровое легирование или электроискровое нанесение покрытий [5]. Сущность: метод основан на явлении переноса материала электрода на обрабатываемую поверхность с помощью электрических разрядов. В процессе переноса материала электрода на поверхность детали происходит диффузионное проникновение и перемешивание материалов. В итоге на обрабатываемой поверхности формируется 2 слоя: внутренний слой глубиной до 50 мкм (диффузионный) и наружный слой толщиной до 20 мкм, состоящий из материала электрода.

Электроискровое легирование или электроискровое нанесение покрытий [5]. Сущность: метод основан на явлении переноса материала электрода на обрабатываемую поверхность с помощью электрических разрядов. В процессе переноса материала электрода на поверхность детали происходит диффузионное проникновение и перемешивание материалов. В итоге на обрабатываемой поверхности формируется 2 слоя: внутренний слой глубиной до 50 мкм (диффузионный) и наружный слой толщиной до 20 мкм, состоящий из материала электрода.

Таблица 1

Сравнительные характеристики методов плазменного или газового напыления

Метод нанесения покрытия	Толщина наносимого слоя, мм	Микротвердость покрытия, ГПа	Прочность сцепления покрытия, МПа	Пористость покрытия %	Шероховатость покрытия, Ra, мкм	Производительность установки, см ² /мин	Коэффициент трения покрытия
Электроискровое нанесение покрытий	0,01-0,5	≤20	33-38	0,5-25	1,0-0,8	0,25-12	0,07-0,08
Финишное плазменное упрочнение	≤1	17 - 52	40-60	≤1	0,07-0,38	3,6-90	0,07
Плазменно-дуговая наплавка	0,25-	1,85-10	20-80	0,3-15	1,4-1,71	30	0,08-0,4
Плазменная модификация	-	4 - 10	-	-	-	20-30	0,03- ,05
Газопламенное напыление покрытий	0,5-3,5	3-12	15-60	1-8	1,5-4	36	0,15-0,16
Высокоскоростное напыление HVOF, HVOAF	0,5-15	1,6-10	≥80	≤ 1	≤ 4	2-62	0,1 0,4
Детонационно-газовый метод напыления	0,01-3	8,2-18	80-250	0,5-1	3-4	700	0,4-0,5

Область применения: увеличение твердости, коррозионной стойкости, износо- и жаростойкости; снижении способности к схватыванию поверхности при трении; восстановление размеров деталей машин; проведение на обрабатываемой поверхности микрометаллургических процессов для образования на ней необходимых химических соединений; создание на рабочей поверхности переходных слоев определенной шероховатости; применение в декоративном искусстве, восстановление посадочных мест подшипников, торцевых уплотнения, рабочих поверхностей лопаток паровых турбин и т.д.

Достоинства: возможность использования в качестве легирующих материалов металлов и их сплавов, металллокерамических композиций, тугоплавких соединений и т.п., снижение износа деталей в 3-5 раз; возможность локального формирования покрытий в указанных местах; высокая адгезия; отсутствие нагрева и деформаций изделия; сравнительная простота технологии; простота и надежность оборудования; низкая энергоемкость; высокий коэффициент переноса материала (60-80 %).

Финишное плазменное упрочнение [6]. *Сущность:* нанесение износостойкого алмазоподобного нанопокрyтия при атмосферном давлении в результате разложение паров жидких технологических препаратов, вводимых в плазмохимический генератор дугового плазмотрона, с последующим прохождением плазмохимических реакций и образованием покрытия на изделии.

Область применения: изготовление деталей машин со специальными свойствами поверхности: износостойкостью, антифрикционностью, коррозионностойкостью, жаростойкостью, разгаростойкостью, антисхватыванием, стойкостью против фреттинг - коррозии и др.

Достоинства: уменьшение параметров шероховатости поверхности; минимальный нагрев в процессе обработки; возможность упрочнения локальных объемов деталей; высокая адгезионная прочность сцепления покрытия; формирование специфического микрорельефа поверхности способствует эффективному его заполнению смазочно-охлаждающей жидкостью; высокая производительность; минимальное потребление и низкая стоимость расходных материалов; низкая потребляемая мощность; транспортабельность и маневренность оборудования; экологическая чистота процесса; минимальный уровень шума.

Плазменно-дуговая наплавка порошковыми и проволочными материалами [8,9]. *Сущность:* нанесение покрытия из расплавленного присадочного порошкового или проволочного материала на металлическую поверхность, на которой он кристаллизуется, с использованием в качестве источника нагрева плазменной дуги, горящей между электродом плазмотрона и изделием. В качестве плазмообразующего газа используется аргон, вторичный газ обеспечивает защиту для сварочной ванны - гелий, водород или азот.

Для напыления может использоваться практически любой порошковый материал - металлические сплавы, металллокерамика и керамика.

Область применения: изготовление и восстановление деталей со специальными износ- и коррозионностойкими свойствами поверхности, а также восстановление размеров изношенных и бракованных деталей за счет нанесения покрытий, обладающих высокой плотностью и прочностью сцепления с изделием, работающих в условиях высоких динамических, знакопеременных нагрузок или подверженных абразивному изнашиванию.

Достоинства: максимальное сцепление и уплотнение частиц с минимальным перегревом детали; получение литой структуры; отсутствие пористости (около 0,3 %); незначительный припуск на последующую механическую обработку; максимальная производительность; минимальный расход вольфрамового электрода; точно заданная глубина проплавления и толщина покрытия; высокая равномерность по толщине слоя; возможность обеспечения необходимого состава, структуры и свойств уже в первом наплавленном слое металла; малые остаточные напряжения и деформации; отсутствие разбавления наплавленного покрытия основным металлом; возможность процесса наплавки деталей малых размеров; высокий уровень механизации и автоматизации технологического процесса.

Плазменная модификация [1]. *Сущность:* осуществление скоростных химико-термических реакций взаимодействия металла основы с плазменной струей, генерируемой при атмосферном давлении воздушно-дуговым плазмотроном.

Следует отметить, что при этом методе на поверхность детали не наносится никаких материалов. Изменяется структура и, соответственно, физико-механические свойства базового материала в приповерхностной зоне детали.

Область применения: изготовление изделий со специальными свойствами поверхности - износостойкостью, антифрикционностью, коррозионностойкостью и др.

Достоинства: интенсивность изнашивания деталей снижается в 4-10 раз; залечивание микродефектов; образования коррозионностойкого поверхностного слоя; увеличения твердости; уменьшения коэффициента трения.

Газопламенное напыление [12]. *Сущность:* расплавление в потоке сгорающего в кислороде газа (ацетилена или пропана) материала покрытия (проволока или порошок) с последующим

нанесением (напылением) его сжатым воздухом на деталь, где происходит кристаллизация и формирование покрытия.

В микроне зоне удара частиц расплава о покрываемую поверхность они деформируются и растекаются, последовательно слипаясь друг с другом, затвердевают и формируют плоский слой. Связь напыляемых частиц с основой происходит за счет тепловой и кинетической энергии, которая определяется температурой и скоростью этих частиц. Связь покрытия с основой - адгезионная, осуществляется за счет межмолекулярных сил и механического сцепления его с неровностями развитой шероховатой поверхности.

Область применения: защита деталей и конструкций от изнашивания и коррозии, ремонт оборудования, восстановления размеров, упрочнение рабочих поверхностей новых деталей, декоративная обработка поверхностей; восстановление и упрочнение рабочих поверхностей подшипников качения и скольжения, гидроцилиндров, валов, поворотных цапф, зубчатых колес, кулачков, тормозных барабанов, лопастей вентиляторов, дымососов, эксгаустеров, деталей конвейеров, буровых коронок, черпаков, воздуходувок, рекуператоров, и т.п.

Достоинства: увеличение сроков службы существующих компонентов; восстановление существующих деталей до состояния «как новая»; ремонт компонентов с браком мех. обработки; высокая адгезия покрытия; возможность восстановления изношенных деталей много раз; стоимость восстановления составляет порядка 30 % от стоимости новых деталей; нанесение покрытия на изделия, изготовленные практически из любого материала; широкий спектр напыляемых материалов: цветные металлы, стали, керамики, твердые сплавы; отсутствие термических деформаций деталей вследствие невысокого нагрева поверхности (менее 120 °С); высокая производительность процесса; маневренность и возможность автоматизации процесса.

Высокоскоростное напыление HVOF, HVOF [10,11]. Сущность: нагрев порошковых частиц с одновременным ускорением их при нанесении на обрабатываемую поверхность до сверхзвуковых скоростей. Частицы порошка посредством газовой струи переносятся на деталь, обладая высокой кинетической энергией, которая при ударе о подложку превращается в тепловую. В качестве напыляемых материалов используются различные металлические и металлокерамические порошки, в частности, карбид вольфрама. Следует отметить, что при таком нанесении частицы не проплавляются.

Область применения: восстановление объектов любых размеров: мосты, суда, трубопроводы, строительные конструкции, котлы, коленчатые валы, лопатки турбин и т.д.; повышение износостойкости и разгаростойкости инструмента; повышение долговечности деталей машин, работающих в условиях трения и износа (шестерни, валы, втулки, гильзы, кулачки, резьбовые соединения и др.); повышения коррозионной стойкости и облегчения сборки-разборки после длительной эксплуатации метизов (болты, гайки) и других деталей машин, длительно работающих в коррозионных средах; обработка деталей из рядовой конструкционной стали с целью замены деталей из бронзы, латуни, нержавеющей стали.

Достоинства: замена хромирования; нанесение покрытия, по сравнению с хромированием, происходит быстрее и проще; не такое канцерогенное; покрытия лучше работают в тяжелых условиях не склонны к водородному охрупчиванию; высокая прочность сцепления и низкая пористость; обладают антикоррозионными свойствами и температурной выносливостью.

Детонационно-газовый метод напыления [7]. Сущность: является одним из видов газотермического нанесения покрытий, использующих энергию взрыва горючих газовых смесей (в основном пропан-бутана) в смеси с кислородом, а также со сжатым воздухом (азотом, аргоном) для разгона порошковых частиц при нанесении на обрабатываемую поверхность до сверхзвуковых скоростей. Является циклическим процессом, обладает высокой удельной мощностью и значительным упрощением преобразования энергии в полезную работу.

Область применения: применяется в авиационной и космической технике, машиностроении, судостроении, при восстановлении оборудования для нефтедобычи и химического производства; для упрочнения и повышения износостойкости деталей машин; обеспечивает защиту от кавитации и эрозии, а также антикоррозионную и химическую защиту; позволяет осуществить металлизацию керамики, фибропластов и различных пластмасс, керамическую изоляцию с высокой электрической прочностью, формирование каталитических носителей для экологически чистой энергетике;

Достоинства: неоднократное восстановление изношенных деталей любых механизмов и машин; высокая адгезия покрытия; низкая пористость покрытия; отсутствие деформации напыляемой детали вследствие невысокого нагрева; позволяет напылять широкий круг материалов: металлы и их сплавы, оксиды, твердые сплавы; высокая производительность установки.

Мобильные ремонтные комплексы [4]. *Сущность:* мобильные ремонтные комплексы за счет малых габаритов и веса, а также оригинальной системы крепления на дефектном узле позволяют производить работы на любой высоте, под любым углом и в любой плоскости. Они основаны на использовании мобильных ремонтных технологий наплавки и металлообработки с применением мобильных станков и специальной оснастки.

Область применения: ремонт крупногабаритного оборудования, которое не возможно транспортировать на стационарные ремонтные предприятия; оборудования, которое невозможно демонтировать; ремонт оборудования, разборка и сборка которого тянет за собою значительный простой; ремонт оборудования аварийно вышедшего из строя во избежание дальнейшего развития аварии или значительного простоя предприятия; восстановление отверстий (отверстия на стрелах экскаваторов, проушины на ковшах погрузчиках и экскаваторах, шарнирные сочленения на бульдозерах, любые отверстия под пальцы, и др.); одновременная соосная расточка нескольких разнесенных друг от друга отверстий на расстоянии до 2,5 метров; восстановление посадочных мест под подшипники, цапф и т.д.; фрезерная обработка плоскостей любых конфигураций в любом пространственном положении; расточная обработка цилиндрических и конических посадочных мест под втулки скольжения и подшипники качения; восстановительная наплавка различных металлов.

Достоинства: отсутствие необходимости демонтировать оборудование для ремонта; отсутствие необходимости в транспортировании оборудования на ремонтные предприятия; возможность поэтапного контроля за качеством выполнения работ и соблюдением технологии выполнения работ.

Применение полимерных клеев [3]. Инновационные материалы, которые сейчас применяются при сборке узлов и механизмов, - это анаэробные клеи (резьбовые фиксаторы) и герметики, клеи и герметики предварительного нанесения, цианакрилатные клеи промышленного назначения.

Основой анаэробных составов являются полимеризационноспособные соединения акрилового ряда, чаще всего диметакриловые эфиры полиэтиленгликолей, для которых характерна высокая скорость превращения в пространственношитые полимеры. Анаэробная реакция протекает при контакте с металлическими поверхностями и при отсутствии контакта с воздухом.

Область применения: фиксация резьбовых соединений при сборке узлов и механизмов для предотвращения отворачивания от вибрации, что дает снижение веса сборочных узлов; фиксация соединения вал-втулка для нагруженных передач для упрощения процесса сборки (допускаются нагрузки выше, чем при соединении с натягом на 120-160 %); герметизация резьбовых соединений и различных узлов; для герметизации микротрещин, пропитка металла; уплотнение плоских разъемных соединений; фиксация трудносклеиваемых материалов в производстве.

Достоинства: высокая температуростойкость (до 250 °С); исключительная герметичность соединений; допускается контакт с питьевой водой; защита от коррозии; высокая химическая стойкость; высокая устойчивость к надрезам и возникновению щелей; быстрая полимеризация (15-30 мин.); устойчивость к давлению (до 120 МПа); долговечность; обеспечение уплотнения с высокой степенью герметичности; фиксация взаимного положения деталей с различными видами соединений (резьбовыми, с гладкими поверхностями, фланцевыми).

Металлокерамика [2]. *Сущность:* технология металлокерамических покрытий решает проблему трения путем воздействия на конкретную пару трения (не набор разрозненных деталей) в режиме штатной эксплуатации. Технология дает возможность избирательной компенсации износа мест трения и контакта деталей за счет образования металлокерамических защитных слоев. Для ее осуществления требуется, чтобы детали машин были изготовлены из черных металлов, и тогда на поверхностях трения и контакта стальных и чугунных деталей машин путем добавления в масло специального порошка образуется металлокерамическое покрытие в виде слоя толщиной до 0,5-0,7 мм, который образуется в результате реакции замещения атомов Mg в узлах кристаллической решетки частиц ремонтно-восстановительного состава атомами Fe поверхностного слоя стали и чугуна. В местах слома при больших температурах (900-1200 °С) в результате микрометаллургических процессов почти мгновенно протекает реакция замещения с образованием новых кристаллов.

Основные свойства металлокерамического защитного слоя: микротвердость поверхностей до 600 кг/мм², коэффициент трения 0,003-0,007; взаимная диффузия металла и состава приводит к образованию кристаллического рельефа на глубину 10-30 мкм.

Область применения: любые машины и механизмы любой конструкции. Нагрузки и обороты механизмов, сорт стали и чугуна, применяемое масло не имеют значения. Конструкция механизма интересна только с точки зрения способа доставки состава до той или иной пары трения.

Достоинства: компенсация выработки трущихся деталей, при котором детали восстанавливаются в первоначальных конструктивных размерах и в дальнейшем износ трущихся деталей прекращается; одинаковый со сталью коэффициент термического расширения; способность противостоять пластическим деформациям и ударным нагрузкам; способность обеспечивать «сухое» трение; способность увеличиваться в объеме в зависимости от энергии контакта, т.е. не только компенсировать износ, но и оптимизировать зазоры в сопряжениях деталей механизмов; позволяет эксплуатировать механизмы практически без износа; уменьшение потерь на трение; повышение КПД; восстановление компрессии и увеличение мощность компрессоров; снижение расхода топлива и электроэнергии на 10-20 %.

Выводы и направление дальнейших исследований. Таким образом, проведен анализ существующих перспективных методов восстановления деталей горных машин.

Детали, восстановленные всеми видами рассмотренных плазменных и газовых напылений по своим физико-механическим свойствам превосходят новые детали. С помощью практически всех рассмотренных методов на детали можно наносить покрытия не только из цветных и черных металлов и их сплавов, но и из керамики и металлокерамики. Применение мобильных ремонтных комплексов позволяет значительно снизить затраты на ремонт за счет уменьшения времени на подготовительные операции, поскольку нет необходимости проводить полный демонтаж ремонтируемого оборудования. Однако пока технология восстановления ограничивается наплавкой в среде инертных газов. Применение полимеров и металлокерамики позволяет иногда восстанавливать детали машин иногда без разборки узлов. Однако применение этих методов восстановления приводит к изменениям структуры металла и невозможности в дальнейшем применения других методов восстановления. Направлением дальнейших исследований является определение технико-экономического критерия и критерия долговечности для всех рассмотренных методов ремонта.

Список литературы

1. **Кадыржанов К.К.** Ионно-лучевая и ионно-плазменная модификация материалов / **К.К. Кадыржанов** .- Москва: Московский университет, 2005. - 640 с.
2. **Кіндрачук М.В.** Трибологія: підручник / **М.В.Кіндрачук, В.Ф.Лабунець, М.І.Пашечко, Є.В. Корбут.**– Київ: МОН.НАУ-друк, 2009. – 392 с.
3. **Максанова Л.А.** Полимерные соединения и их применение: Учебное пособие / **Л.А.Максанова, О.Ж.Аюрова.** -Улан-Удэ: изд. ВСГУТУ, 2004.
4. Мобильные ремонтные технологии группа компаний Intratool можна найти на: <http://intratool.com>.
5. **Нгуен Х.Л.** Изучение технологии нанесения упрочняющих покрытий электроискровым методом / **Х.Л.Нгуен, Е.А.Шенин.**-Оренбург: ГОУ ОГУ, 2008. - 16 с.
6. **Тополянский П.А.** Высокоэффективное финишное плазменное упрочнение алмазоподобными покрытиями рабочих поверхностей технологической оснастки и режущего инструмента / **П.А.Тополянский** // *Формы +.* Оснастка для переработки полимерных материалов, 2007. - №11. - С.23-27.
7. **Ульшин В.А.** Оптимизация параметров детонационно-газового напыления с использованием генетического алгоритма / **В.А.Ульшин, М.Ю.Харламов** // *Автоматическая сварка*, 2005. – №2. – С. 32-37.
8. **Devis J.R.** Handbook of Thermal SprayTecnology. / **J.R. Davis** and Associates, ASM International, 2004
9. Plasma polymerization of hybrid organic–inorganic monomers in an atmospheric pressure dielectric barrier discharge / **Sabine Paulussen, Robby Rego, Olivier Goossens, Dirk Vangeneugden, Klaus Rose** // *Fraunhofer-Institut fuer Silicatforschung, Wuerzburg, Germany*, 2005, March. - Pp 672–675.
10. **Stokes J.** The Theory and Application of the HVOF Thermal Spray Process. / **J. Stokes.**- Dublin:Dublin City University, 2005. - 204 p.
11. Thermal stress analysis of HVOF sprayed WC–Co/NiAl multilayercoatings on stainless steel substrate using finite element methods / **M.Toparli, F.Sen, O.Culha, E.Celik** // *Journal of Materials Processing Technology*, 2007. - Vol. 190. pp. 26-32.
12. **Warm spraying-a novel coating process based on high-velocity impact of solid particles** / Seiji Kuroda, Jin Kawakita, Makoto Watanabe, Hiroshi Katanoda // *National Institute for Materials Science. Science and Technology of Advanced Materials*, 2008. - Vol. 9, Number 3 pp. 41–58.

Рукопись поступила в редакцию 23.02.16