

СЕКЦИЯ №3

ТЕХНОЛОГИИ УПРОЧНЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

УДК 669.715.621.43

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ НАНЕСЕНИЕМ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ПЛАЗМЕННО-ПОРОШКОВЫМ МЕТОДОМ

Сидашенко А.И., к.т.н., профессор; Скобло Т.С., д.т.н., профессор; Харьяков А.В., к.т.н.
*Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства
им. П. Василенко, г. Харьков, Украина*

Условия эксплуатации машин и оборудования предъявляют высокие требования к качеству, надежности и долговечности их деталей. По мере износа уровень свойств деталей, как правило, снижается, поскольку на рабочей поверхности возникают различные дефекты и повреждения, а также изнашивается наиболее упрочненный поверхностный рабочий слой.

Проведенные исследования показали, что в настоящий период увеличилось количество дизельных двигателей поступающих на восстановление с максимальным износом деталей. Участились случаи поступления двигателей с сильно изношенными коленчатыми валами из-за нарушения условий эксплуатации, в результате которых возрастает и доля дефектов. К числу последних относятся задиры (схватывания), риски и они при восстановлении требуют большого снятия металла шеек, что приводит к переходу не на следующий, а через ремонтный размер, и вызывает снижение надежности и сокращение сроков эксплуатации двигателя, преждевременному использованию запчастей.

Для оценки эксплуатационной стойкости коленчатых валов производили контроль [1] за эксплуатацией и отказами десяти новых двигателей в период наработки 1000 мото-ч. Исследованы различные виды отказов, которые были разделены на три группы сложности. К первой отнесены: подтекания топлива, масла, воды. Ко второй группе отказы, устранение которых осуществляется заменой узлов и деталей без разборки двигателя. К третьей группе были отнесены отказы, устранение которых требует разборки двигателя (поршни, диски, коленчатый вал и т. д.).

Анализ показал, что 45-49%, от общего числа отказов двигателей, приходится на дефекты третьей группы сложности. Наиболее часто встречающимся видом отказов, в этой группе, является износ шатунных и коренных шеек коленчатого вала.

При более тщательном изучении причин выхода из эксплуатации двигателей было обнаружено, что на отказ по причине износа шеек коленчатого вала приходится 28% от общего числа.

Для определения вероятности безотказной работы коленчатых валов изготавливаемых из стали 45 был проведен статистический анализ эксплуатационной стойкости 50 новых валов.

Оценен износ коренных и шатунных шеек. Зафиксирована наработка до капитального ремонта каждого вала. В результате был установлен гамма - процентный ресурс коленчатых валов, выходящих из строя по причине износа коренных и шатунных шеек. Он составил $\gamma_{80\%тср}=4100ч$ и $\gamma_{80\%эмп}=4000ч$ [2].

Из проведенного исследования видно, что гарантия 6000 ч, выдаваемая заводом-

изготовителем на двигатели, завышена.

Наиболее часто выходящими из строя деталями трансмиссии, работающими в условиях тяжелых ударных знакопеременных нагрузок, являются крестовины карданных валов.

Одним из способов восстановления работоспособности этих деталей является метод нанесения компенсирующих износ покрытий.

Для обеспечения необходимых потребительских свойств деталей и стабильной работы машин необходимо определить эффективные параметры обработки, материалы покрытий и разработать цепочку технологических операций, которые бы не оказывали влияния на изменение линейных размеров при обработке, не требовали бы последующей правки вала, не изменяли бы структуры и свойств материала детали.

Существует множество методов нанесения покрытия на изношенные детали. Однако все традиционные методы наплавки, широко применяемые в производстве, сопровождаются изменением геометрии детали, образованием специфической переходной зоны с характерными структурными изменениями, которые уменьшают эффективное сечение детали и ее усталостную прочность при эксплуатации. Среди методов нанесения покрытий, на наш взгляд, наиболее эффективными, особенно в последнее время, являются методы с применением высококонцентрированных источников энергии, которые не оказывают влияния на сердцевину детали и не формируют протяженной переходной зоны при обработке. Это методы электронно-лучевой, лазерной, электроискровой и плазменной наплавки.

Целью работы являлось повышение долговечности ответственных деталей путем разработки эффективного материала и параметров технологии нанесения покрытий с использованием плазменного метода.

Для реализации поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- разработать эффективные порошковые композиции для нанесения покрытий на шейки коленчатых валов и шипы крестовин;
- оценить влияние химического состава покрытия на физико-механические и эксплуатационные свойства деталей;
- теоретически оценить и экспериментально подтвердить выбор эффективных параметров плазменного метода нанесения покрытий, обеспечивающего требуемые свойства деталей в эксплуатации;
- провести промышленное опробование и внедрение результатов разработок. Оценить их экономическую эффективность.

Для решения вопроса качественного нанесения покрытий на детали из углеродистых и низколегированных сталей, методически работа была построена следующим образом:

- осуществляли сбор и анализ статистических данных по наработке до отказа двигателей, а также определение наиболее значимых дефектов коленчатых валов и шипов крестовин;
- анализировали существующие методы восстановления коленчатых валов дизельных двигателей и крестовин карданных валов трансмиссии;
- подбирали порошковые композиции для нанесения восстановительных покрытий на шейки коленчатых валов и шипы крестовин;
- проводили эксперименты по определению эффективных режимов плазменно-порошкового метода нанесения покрытий;
- получили математическую модель тепловых процессов, имеющих место при нанесении покрытий. Выполнили расчет температурных полей. В соответствии с этим корректировали параметры в экспериментальных исследованиях;
- выполняли лабораторные, стендовые и эксплуатационные испытания рекомендуемого покрытия; оценили экономические показатели разработок, внедренных в производство.

Анализом была установлена возможность [3] использования для покрытий большо-

го количества порошковых материалов. Их выбор определяется требованиями, предъявляемыми к деталям и условиям их эксплуатации. В зависимости от этих факторов рассматривали используемые порошковые композиции, эффективные для нанесения покрытий на вышеприведенные детали. Установлено, что наибольшей твердостью и износостойкостью обладают сплавы, которые обеспечивают формирование карбидов вольфрама, бора, титана, хрома.

Однако основным недостатком этих материалов является их высокая стоимость. Поэтому для восстановления деталей из углеродистых и низколегированных сталей чаще всего используют легированные материалы на основе железа. Они обеспечивают достаточно высокую твердость (от 55 до 60 HRC₃), а при содержании хрома 3-5% обладают хорошим сочетанием твердости и вязкости. Такие материалы в 3-10 раз дешевле твердосплавных порошков [3].

При выборе порошковой композиции исходили из технических требований, предъявляемых к восстанавливаемым деталям. Микроструктура рабочего слоя термически обработанного коленчатого вала должна быть однородной, мелкозернистой, не безуглеродженной (без прослоек и сетки феррита на расстоянии не менее 8 мм от поверхности шейки). Твердость шеек более 52 HRC. Глубина рабочего слоя не менее 2,5 мм; $\sigma_b = 830 - 850$ МПа. Предел выносливости $\sigma_{-1} \geq 110$ МПа.

Шипы крестовин должны обладать повышенной вязкостью и хорошо сопротивляться истиранию, а твердость соответствовать 57-65 HRC.

При изготовлении их в условиях специализированного производства в наружной зоне цементованного слоя не должно быть сплошной цементитной сетки.

Ввиду того, что все рассматриваемые, наиболее распространенные, материалы имеют повышенное содержание углерода, то нами были выбраны порошки ФМИ – 2, и ПЖН4Д2М на основе железа, которые в сочетании могут обеспечить концентрацию углерода, близкую к материалу деталей. Для определения оптимального состава покрытия был проведен эксперимент, в ходе которого наносили покрытия на детали порошковыми композициями с различным сочетанием этих порошков, т.е. различного химического состава.

Сопоставительными исследованиями нанесения покрытий с использованием различной доли порошковых композиций установлено, что для удовлетворения требований технических условий наиболее эффективной является композиция, состоящая из 40% ФМИ – 2 + 60% ПЖН4Д2М, что обеспечивает достижение требуемой твердости, равной 52-55 HRC, при восстановлении шеек коленчатых валов.

Для обеспечения требований по твердости рабочего слоя крестовин на уровне 57-65 HRC нами рекомендуется для покрытия использовать порошковую композицию, состоящую из 50% ФМИ – 2 + 50% ПЖН4Д2М [4].

Покрытия с оптимальным соотношением порошковых композиций для коленчатых валов и крестовин карданных валов обеспечивают однородную структуру с дисперсными дендритами без видимых пор, трещин и частиц нерасплавленного порошка. Основной структурой покрытия является аустенит с небольшой долей феррита и карбидами.

Электронно-микроскопическими исследованиями с применением микродифракционного анализа, а также микрорентгеноспектральным анализом выявлен тип формируемых фаз и содержание легирующих добавок в карбидной фазе покрытия. Упрочняющей фазой являются дисперсные специальные карбиды $(Cr, Fe)_{23}C_6$ и карбиды цементитного типа $(Fe, Cr)_3C$. Доля упрочняющей фазы в оптимальных составах покрытий достигает 6 – 8%. Было выявлено, что в специальных карбидах $(Cr, Fe)_{23}C_6$ содержание Cr достигает 43,9 %, а в карбидах цементитного типа $(Fe, Cr)_3C$ – его доля не превышает 13% [4].

Разработана математическая модель [5] и программа расчета температурного поля при нанесении восстановительных покрытий плазменной струей. Особенностью разработанной модели является учет существенных конвективных тепловых потоков в жидкой фазе.

Построение такой модели позволяет прогнозировать структуру (и, как следствие, свойства) восстановленного слоя и детали и гибко изменять режимы обработки для получения необходимых свойств изделия (твердость, микротвердость структурных составляющих, протяженность переходной зоны).

Произведенные расчеты показали [5], что регулирование толщины расплавленного слоя эффективнее осуществлять изменением скорости движения плазменной дуги, чем мощности источника нагрева. Расчетами установлена возможность регулирования величины переходной зоны значением мощности. Также установлены пределы ее значений (0,1-3 мм), выше которых увеличение мощности мало влияет на толщину формируемого покрытия.

Проведенный сопоставительный анализ данных, полученных расчетным и экспериментальным путем (оценкой структуры и свойств), показал, что предложенная модель адекватно отображает тепловые процессы, которые имеют место при нанесении покрытий.

В результате расчетов были определены зависимости изменения температуры на поверхности восстанавливаемой детали от мощности плазменной струи и скорости движения источника нагрева, а также просчитано приращение температуры перед струей по направлению ее движения.

Оптимальными расчетными параметрами для нанесения покрытий на шейки коленчатого вала оказались $I_{св} = 200-260$ А, $V = 2,8-3,8$ об/мин, и покрытие наносили с предварительным подогревом вала (до $T = 200^{\circ}\text{C}$, что соответствует низкотемпературному отпуску для снятия остаточных напряжений, в течение двух часов) и без предварительного подогрева. Шаг наложения валиков составлял 2-2,5 мм. Они обеспечивают толщину покрытия, равную 2,0 мм и глубину переходной зоны до 1,5 мм. [6]

Для уточнения расчетных данных и определения влияния каждого параметра на величину микротвердости и ее однородность в нанесенном слое, а также на величину зоны термического влияния, формируемую при восстановлении, был спланирован и проведен эксперимент, в ходе которого изменяли основные параметры обработки: силу тока, скорость вращения детали и наличие или отсутствие предварительной термической обработки.

Были получены уравнения регрессии, которые описывают влияние скорости вращения детали, величины силы тока и проведения операции предварительной термообработки для снятия напряжений и стабилизации структуры на величину зоны термического влияния, уровень микротвердости и ее однородность по сечению покрытия и степень неоднородности структуры, оцененная по изменению микротвердости. При этом скорость вращения детали изменяли в пределах $V = 2,8-3,8$ об/мин; силу тока $I = 200-260$ А и предварительный отжиг при $T=200^{\circ}\text{C}$ и без него. При этом установлено, что анализируемые факторы по-разному влияют на уровень свойств [6].

Выявлено, что протяженность зоны термического влияния, главным образом, определяется скоростью вращения детали, силой тока и их парным взаимодействием. Чем выше скорость обработки, тем меньше величина зоны термического влияния. На ее протяженность не оказывает влияние предварительный подогрев восстанавливаемой детали.

Микротвердость также зависит от изменения силы тока обработки. С ее снижением от 260 до 200 А она падает на 11,3%. При этом покрытия, нанесенные рекомендуемой порошковой композицией, имеют однородную структуру аустенита с карбидами и отдельными включениями легированного феррита, формируемого у границы сплавления [6].

Наиболее значимое влияние на неоднородность структуры и микротвердости оказывают парные взаимодействия силы тока, скорости вращения детали с операцией предварительного нагрева деталей (отжигом).

Для оценки износостойкости полученных покрытий были проведены лабораторные и промышленные испытания.

Стендовыми испытаниями выявлено [7], что на момент окончания приработки по-

верхностей величина износа нового стального вала на 41% больше, чем вала с рекомендуемым покрытием. В период установившегося износа разность достигает 68,34%.

Аналогичные исследования были проведены и для процесса нанесения покрытия на шипы крестовин карданных валов [8]. Выполнен анализ влияния температурных параметров обработки. Установлено, что при обработке током в интервале значений 120-150 А падение концентрации всех элементов было существенным: для Ni составило 29,47%, а Cr – 26,53%. При нанесении покрытий с использованием тока в диапазоне 150-180 А величина угара легирующих элементов, по сравнению с первым интервалом, изменяется незначительно, и они распределяются по сечению покрытия более равномерно. В этом интервале температур концентрация химических элементов снижалась незначительно и не превышала 0,58% и 5,55% для Ni и Cr соответственно.

При изготовлении крестовины подвергают цементации на глубину до 1,5 мм. При нанесении покрытия на насыщенный углеродом слой имеет место диффузия углерода и насыщение им зоны сплавления, что значительно ухудшает качество восстановления. Диффузия углерода существенно изменяет фазовый состав переходного слоя, снижает прочность сцепления покрытия с основой. В существующих технологических процессах цементованный слой удаляют механической обработкой, что приводит к удорожанию себестоимости восстановления и к снижению эффективного рабочего сечения детали. При этом увеличивается и расход порошковых материалов при необходимости увеличивать толщину покрытия. Наиболее целесообразным представляется применение предварительной (перед нанесением покрытия) обработки плазменной дугой поверхностного цементованного слоя для снижения концентрации углерода на поверхности шипа крестовины, и последующего восстановления (меньшего объема наращиваемого слоя) на обезуглероженную поверхность детали.

Результаты проведенного эксперимента подтвердили целесообразность проведения такой операции. Зона цементации, после обработки плазменной дугой имела мелкозернистую феррито-перлитную структуру без карбидных включений по границам зерен.

На изменение концентрации легирующих элементов в восстановленном слое оказывает влияние наличие или отсутствие предварительной обработки восстанавливаемой поверхности детали. Так, при использовании предварительной обработки поверхности детали плазменной струей с подачей тока ионизации, равным 80 А, отмечали некоторое падение (по отношению к непрогретому) концентрации всех легирующих элементов в покрытии. Понижение концентрации Si составило 35,0%, Mn – 36,0%, Cr – 32,0%, Ni – 30,0%, Mo – 39,0%.

В случае обработки с предварительным подогревом, в переходной зоне по сравнению с основным металлом отмечалось повышение концентрации всех химических элементов за счет интенсификации диффузионных процессов. Так, концентрация Si, Mn, Cr, Ni и Mo в переходной зоне предварительно подогретых шипов на 60%, 3,8%, 14,7%, 17,5% и 50% соответственно выше, чем у необработанных [8].

В результате проведенных исследований было установлено, что оптимальными параметрами обработки для промышленного внедрения технологии оказались: предварительный прогрев шипа крестовины плазменной дугой (ток $I=80$ А, напряжение $U=40$ В) для обезуглероживания предварительно частично цементованного и изношенного слоя; нанесение покрытия при сварочном токе $I = 150$ А и напряжении дуги $U = 40$ В.

Разработанная технология нанесения восстановительных покрытий плазменно-порошковым методом успешно может быть использована не только при ремонте сельскохозяйственной техники, но и в различных отраслях народного хозяйства. Установлена эффективность этого метода и при восстановлении деталей турбин паровых и атомных электростанций [9]. Выбор материала покрытия в этом случае определяется требованиями эксплуатации, а параметры предварительной обработки структурой и свойствами восстанавливаемой детали. Использование порошковых композиций на базе системы Ni - Cr - Si - В

– Мп – Мо – Си обеспечивает повышение долговечности таких деталей в 1,5 раза и определяется не только покрытием, но и свойством переходной зоны и -термического влияния, которые регулируются набором технологических операций и параметрами процесса.

Экономический эффект от внедрения технологии восстановления коленчатых валов нанесением предложенного покрытия плазменно-порошковым методом при восстановлении 1000 шт. составил 279093 грн.

Разработки внедрены на Шевченковском СРТП, а потребителями восстановленных коленчатых валов являются Сумская, Полтавская, Харьковская и Черниговская области Украины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Харьяков А.В., Науменко А.А. Восстановление деталей плазменно-порошковым методом и его экономическая эффективность // Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства, Вип. № 39. Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні. – Харків. – 2005. – С. 254 – 259.
2. Автухов А.К., Харьяков А.В. Оценка эксплуатационной стойкости коленчатых валов и восстановление их микроплазменной наплавкой. Повышение надежности восстанавливаемых деталей машин. Сб. научн. тр. ХГТУСХ, Харьков, 1997. – С. 84-88.
3. Харьяков А.В. Исследование свойств материала покрытий нанесенных плазменно-порошковым способом // Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства, Вип. № 42 Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні. – Харків. – 2006. – С. 113-119.
4. Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Харьяков А.В., Науменко А.А. Влияние химического состава порошковых композиций и параметров плазменной обработки на свойства покрытий при восстановлении деталей// Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, Вип. 35, Кіровоград, – 2005. – С. 383-388.
5. Скобло Т.С., Харьяков А.В., Науменко А.А., Мартиненко А.Д. Методика моделирования температурного поля при плазменно-порошковой наплавке с учетом приращения температуры // Сб. докладов международной научно-практической конференции “Опыт, проблемы и перспективы развития технического сервиса сельскохозяйственной техники”. – Минск: БГАТУ, 2006. – С. 116-123.
6. Харьяков А.В. Особенности формирования восстановленного слоя при плазменно-порошковой наплавке коленчатых валов двигателей СМД – 60. Новые решения в современных технологиях. Вестник ХГПУ. Выпуск №81. – Харьков 2000. – С. 51-52.
7. Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Харьяков А.В., Мартыненко А.Д. Износостойкость коленчатых валов тракторных двигателей. Труды 8 – й международной научно-технической конференции «Физические и компьютерные технологии». Харьков: ХНПК «ФЭД», 2003. – С. 163-166.
8. Харьяков А.В. Исследование влияния режимов плазменно-порошковой наплавки на качество восстановления крестовин карданных валов. Вісник Національного Технічного університету “ХПІ”. Нові рішення у сучасних технологіях. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2001. - № 15. С.66-72.
9. Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Триполко В.К., Харьяков А.В., Науменко А.А. Восстановление деталей из различных материалов плазменно-порошковым методом // Сб. докладов 7-й Международной конференции “Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов”. – Харьков. – 2006. – С. 168-172.

Аннотация

Повышение долговечности деталей нанесением износостойких покрытий плазменно-порошковым методом

Разработанная порошковая композиция на основе Fe легирована системой элементов Ni - Cr - Si - B - Mn - Mo - Cu, которая обеспечила повышение долговечности деталей в 1,5 раза в сравнении с изготовленными по существующей технологии деталями.

Abstract

Increase of machine parts durability by coating wearproof coverages with the use of plasma-powder methods

The powder composition has been developed on the basis of Fe alloyed with the system of elements Ni-Cr-Si-B-Mn-Mo-Cu, which provides durability increase of 1,5 times more in comparison with the parts made according to the existing technology.

УДК 629.113.004.67

АКТИВИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРИПЕКАНИЯ ПОРОШКОВ ИНДУКЦИОННЫМ НАГРЕВОМ И СИЛОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

Ярошевич В.К., д. т. н., профессор

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

Абрамович Т.М., к.т.н., профессор

*Таганрогский государственный педагогический институт,
г. Таганрог, Российская Федерация*

Припекание и технологический процесс получения покрытий заключается в нанесении на поверхность детали порошковой формовки или слоя порошка и нагреве их до температуры, обеспечивающей спекание порошкового материала и образование прочной диффузионной связи с деталью [1] (ГОСТ 17359-82). Использование токов высокой частоты (индукционное припекание) обеспечивает значительное (на 2-3 порядка) ускорение диффузионных процессов при нагреве, резко уменьшает время выдержки порошка при высокой температуре, в результате чего не требуется применение защитно-восстановительных сред [2].

Силовое (механическое) воздействие в сочетании с индукционным нагревом является эффективным средством повышения качества порошковых покрытий. Механическое давление на порошок увеличивает площадь контакта его с основой, разрушает окисные пленки и способствует формированию покрытий с высокой плотностью и прочностью сцепления. В зависимости от вида нагружения его можно разделить на статическое, динамическое и комбинированное (рисунок).

Активирующие силовые факторы могут иметь предварительный или одновременный с температурным характер действия. Наиболее распространенным в порошковой металлургии активирующим механическим фактором является предварительное статическое нагружение («холодное» прессование).