

ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УПРОЧНЕНИЯ ПРИ РЕМОНТЕ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

С.В Петров., д-р техн. наук

Эксплуатация нагруженных сопряженных и трущихся узлов подвижного состава сопровождается контактно-усталостными повреждениями поверхностей, проявляющимися в виде мелких или крупных участков уноса материала, а в предельных случаях образованием трещин и разрушением. Разрушение и пластическая деформация сопряженных деталей или пар трения прежде всего связаны с явлениями, происходящими на поверхности раздела. Если исключить дефекты литья и термообработки, разрушение изделия при эксплуатации начинается с микротрещин, которые возникают у границ раздела. В большинстве случаев поверхностные слои материала детали определяют её поведение и эксплуатационные свойства. В целом закономерности контактного взаимодействия, связанные с совместимостью материалов и триботехническими аспектами известны. Они являются основой для повышения эксплуатационных показателей качества ремонта изношенных деталей. Оставляя в стороне физико-химические проблемы поверхности твердого тела, данная работа посвящена технологическим возможностям управления механическими, физическими, химическими и структурными свойствами участков сопряжения нагруженных деталей путем поверхностного упрочнения и нанесения упрочняющих защитных покрытий.

В последние годы получила развитие плазменная поверхностная закалка гребней колесных пар. Целью плазменного поверхностного упрочнения колесных пар является повышение их долговечности и надежности при эксплуатации без снижения работоспособности рельс. Для достижения этой цели решены три взаимосвязанные и противоречивые проблемы. *Первая* заключается в поверхностном локальном упрочнении рабочей поверхности гребня на заданную твердость с получением мелкодисперсной структуры металла упрочненного слоя. Именно эти факторы обеспечивают снижение темпов износа гребня и уменьшение коэффициента трения между гребнем и боковой поверхностью головки рельса, что благоприятно влияет на рельсы, особенно в кривых, замедляя их износ. *Вторая* проблема связана с формированием полей внутренних напряжений, действующих как в объеме металла, так и между зёрнами. Быстрые нагрев и охлаждение локального участка массивного колеса приводят к структурным превращениям, связанным с изменением удельного объема, и пластическим деформациям – сжатию и растяжению. Наибольшие проблемы возникают при закалке бандажей. Поскольку это связано с безопасностью движения целесообразно осветить их более подробно. Материал бандажа на колесе находится в условиях сложного напряженного неоднородного состояния. В исходном состоянии за счет натяга происходит пластическое деформирование материала, а уровень растягивающих напряжений превышает предел текучести. В процессе плазменной закалки напряжения перераспределяются. Расчеты показывают, что уровень напряжений вблизи центра пятна нагрева имеет меньшие значения по сравнению с периферией, соответственно максимум напряжений смещается на некотором расстоянии от центра нагрева. Отличие напряжений по величине для различных вариантов расположения плазматрона относительно гребня колеса незначительно и составляет около 5%.

В отличие от напряженного состояния максимум деформаций совпадает с максимумом температур, т.е. находится в центре нагрева. Отличие деформаций по величине для различных вариантов расположения плазмотрона, как и для напряжений, незначительно. При этом можно отметить следующую закономерность. По мере удаления оси плазмотрона от гребня деформации уменьшаются на 13%, а затем увеличивается на 18%. Натяг приводит к значительному росту и смене знака окружных напряжений. После охлаждения колеса возникают остаточные напряжения и деформации. Интенсивность напряжений превышает предел текучести материала, а пластические деформации достигают величины $\varepsilon = 0,15\%$. Материал находится в условиях трехосного растяжения, при отношении главных напряжений 1/5. Размеры наиболее напряженной области бандажа соответствуют области термического воздействия. Зона пластического деформирования материала распространяется от поверхности бандажа на глубину 5-6 мм. Максимальные пластические деформации имеют место на поверхности бандажа в районе непосредственного воздействия струи плазмотрона на бандаж.

Третья проблема связана с изменением тонкой структуры металла в результате плазменного поверхностного нагрева. В зависимости от режима плазменной закалки могут быть получены практически противоположные результаты. В случае правильной технологии (оптимального термического цикла) будет получена преимущественно троосто-сорбитная тонкопластинчатая структура в смеси с бесструктурным мартенситом у поверхности, имеющая несколько повышенную микротвердость и характеризующаяся плавным переходом к основному металлу. Полученная тонкая структура отличается дисперсностью субструктурных элементов (субзерен, блоков, ячеек), равномерным распределением дислокаций без градиентов по дислокационной плотности. В этом случае, структура исходного металла облагораживается и все механические характеристики улучшаются. В случае нарушения технологии (отклонении термического цикла от оптимального) формируется грубопластинчатая структура (феррито-перлитная) с ферритными оторочками. Она характеризуется наличием неметаллических включений сульфидного типа, более крупных по размеру субструктур, а также неравномерным распределением дислокаций и формированием резких градиентов дислокационной плотности, формирующихся, как правило, в области контакта жестких и мягких структурных составляющих (цементных пластин с ферритными прослойками в перлите, либо на границах перлитных зерен с ферритными оторочками и т.п.). Здесь могут возникать трещины.

В эксплуатации рабочая поверхность колеса находится под действием комплекса различных нагрузок. Обнаружено, что при одновременном наличии трех факторов: 1) материал обода находится в сложно-напряженном состоянии с 2) поверхностным наклепом, когда 3) на поверхность накладываются какие-либо термомеханические воздействия, связанные с нагревом: плазмой, от трения тормозных колодок или рельс, возникающих при блокировании колес во время торможения – рабочий поверхностный слой материала колеса может практически утратить способность сопротивляться разрушению. Внешне это выражается в полной потере пластичности, охрупчивании, появлении на поверхности сетки трещин, напоминающих рыбу чешую, а на уровне тонкой структуры – в накоплении дефектов и её разупорядочении. При этом повышается способность поверхностных микротрещин к распространению вглубь бандажа. Попадание таких микротрещин в неблагоприятное поле растягивающих напряжений первого рода может привести к разрыву бандажа. Подобные разрушения в полной мере можно

отнести к категории неожиданных с глубоко “спрятанной” истинной причиной. Авторами выполнен анализ структуры и физико-механических свойств приповерхностных слоев колесной стали в зоне контакта с рельсом, формирующихся под действием комплекса разнородных факторов. Выявлены первоначальные причины разрушения колеса при одновременном наличии вышеупомянутых трех факторов, что стало научной основой для повышения их надежности.

Технология плазменной поверхностной закалки колёсных пар, разработанная НПП ТОПАС позволяет повысить контактно-усталостную прочность металла и, как следствие, увеличивает ресурс и надежность колесных пар тягового и подвижного состава. Интенсивность износа гребней колесных пар с плазменным упрочнением значительно ниже, чем у серийных (в 2,5...3 раза). Данная технология имеет две отличительные особенности: 1) локальное (в зоне наибольшего износа) поверхностное упрочнение гребня колеса на глубину 2,5...3 мм и ширину 35 мм с твердости 280 НВ (в исходном материале) до 430 НВ в среднем по зоне упрочнения и 480 НВ для тонкого фрикционного приповерхностного слоя. Это обеспечивает оптимальное соотношение твердости контактирующих поверхностей колеса и рельса; 2) изменение структуры упрочненной зоны колеса - с феррито-перлитной смеси с размером исходных зерен 30...40 мкм до смеси мелкоиглочатого мартенсита с розеточным трооститом 50:50%. Это улучшает механических свойств (в том числе снижает коэффициент трения в контакте гребня с боковой поверхностью рельса на 30-50%) и повышает трещиностойкость материала колеса в зоне плазменного упрочнения.

Для реализации данной технологии разработана новая специализированная “Установка высокоскоростной плазменной закалки двух модульная” УВПЗ-2М (Рис.1), которая позволила ввести в эксплуатацию более 30 участков плазменного поверхностного упрочнения колёсных пар (Рис.2), как без выкатки колес из-под локомотива (Рис.3), так и с выкаткой на специализированной автоматической линии (Рис.4).

Наши исследования и опыт эксплуатации установок плазменного упрочнения свидетельствуют о том, что этот процесс может быть автоматизирован. Решение всех трех описанных выше проблем сводится к обеспечению повторяемости на каждом колесе оптимального термического цикла. Для этого создана система автономной оптимизации, идея которой видна на рис.5.

Исходя из требований гарантированного обеспечения точности и повторяемости процесса упрочнения разработан компьютерный блок автономной оптимизации для установок УВПЗ-2М. Блок автономной оптимизации обеспечивает:

- оперативное программирование режимов и параметров, отображение текущего состояния контролируемых параметров технологического процесса, протоколирование и сохранение в энергонезависимой памяти параметров технологического процесса плазменной поверхностной закалки колесных пар, вывод на персональный компьютер накопленной информации;

- обработку аналоговых сигналов с пирометра “Смотрич”, источника электропитания плазмотронов “Плазма-2”, датчиков давления и входных дискретных сигналов с исполнительных механизмов и формирование выходных команд управления по заданной программе с целью автоматического поддержания оптимального термического цикла.

Более чем семилетняя эксплуатация локомотивов и вагонов с плазменно упрочненными гребнями колесных пар позволила сделать следующие выводы.

- Плазменное упрочнение - это высокопроизводительный эффективный метод двух - трёх кратного продления ресурса колесных пар и может быть реализован в условиях типового депо. Данная технология обеспечивает повышение надежности при эксплуатации колесных пар.

-Гарантированное воспроизведение наилучших показателей эксплуатационной надежности и износостойкости пары рельс - колесо обеспечивается при полной автоматизации процесса и точном соблюдении параметров закалки на каждом колесе.

- Вследствие подавления пластической деформации закалка даже одного элемента трибосистемы (гребней колес) на высокую твердость не только не оказывает отрицательного воздействия на другой элемент (на путь), но напротив, улучшает его состояние.

На базе установки УВПЗ-2М разработана новая технология высокоскоростного плазменного отпуска наклепаной (упрочненной) поверхности качения колесных пар. Эта технология успешно внедрена в ряде депо. (Рис 6). Твердость поверхностного слоя металла колес повышается за счет наклепа при движении с 285 НВ до 330 – 350 НВ, а на ползунах, возникающих при торможении с заблокированными колесами, твердость может достигать 50-55 HRC.

В такой ситуации отпуск поверхностного слоя металла перед перепрофилированием поверхности катания колес значительно облегчает работу режущего инструмента и станка. Это дает возможность повысить скорость обточки в 2-3 раза, улучшить поверхностные свойства металла колеса и получить значительную экономию.

В ключе ремонта с упрочнением решена проблема качественного восстановления тяжело нагруженных коленчатых валов мощных локомотивных дизелей. Проблема восстановления таких коленвалов решена с использованием технологии и аппаратуры сверхзвуковой электродуговой металлизации УСМ-4 (Рис.7). При этом были преодолены основные недостатки электродугового напыления, связанные с низким качеством покрытий – повышенное выгорание легирующих элементов распыляемого металла проволок под действием струи воздуха, низкая прочность покрытия и высокий коэффициент трения между покрытием и вкладышем.

Скачок в повышении качества покрытий до уровня, обеспечивающего достаточный запас эксплуатационной надёжности и триботехническим характеристикам, достигнут благодаря двум новшествам:

- использованию в качестве расплывающего газа сверхзвукового потока горячих продуктов сгорания метана с воздухом на установке УСМ-4;
- использованию для напыления специальной порошковой проволоки ПП-2М.

В этом случае кинетическая энергия напыляемых частиц повышается в 4-5 раз, скорость их полета возрастает с 70-150 м/с до 250-300 м/с. Снижение времени контакта расплавленных капель с атмосферой во время полёта до основы плюс пониженная концентрация кислорода в окружающей струе продуктов сгорания обеспечивают более полное сохранение углерода и легирующих элементов в покрытии. В сравнении с типовым процессом электродугового напыления степень выгорания углерода падает с 40-60 % до 3-6 %, а кремния и марганца с 20-25 % до 2-3 %. Технологи позволила получить композиционные покрытия из порошковой проволоки с достаточно большим (двух кратным) запасом прочности – прочность сцепления покрытия с основой возрастает с 20-40 МПа до 60-80 МПа, пористость снижается с 8-15% до 0-1.5 %, микротвёрдость повышается на 40-60% в результате высокоскоростной закалки из жидкого состояния. В покрытии формируются остаточные напряжения сжатия, они затрудняют образование трещин, увеличивают

сопротивление усталости деталей и повышают износостойкость материала. Полученное покрытие отличается высокими триботехническими характеристиками – имеет высокие антизадирные свойства и низкий коэффициент трения во всем рабочем диапазоне нагрузок. Он составляет 0,02-0,03, что соответствует “жидкостному” или граничному трению с минимальной толщиной масляной плёнки. Рост коэффициента трения, связанный с нарушением её сплошности (разрушением) между покрытием и вкладышем наступает при 1,5 кратном превышении температуры или давления. Отличительной особенностью таких покрытий является однородная ламелеобразная структура, низкая (~ 1,0 %) пористость, что предотвращает усадку покрытия при эксплуатации деталей, равномерное распределение свободного графита. Благодаря этому покрытие выдерживает длительные высокие цикличные нагрузки и перегрузки, имеющие место при работе мощных дизелей. Из-за остаточной пористости покрытие удерживает масло, особенно необходимое при пуске холодного двигателя. Свободный графит во время работы выходит на поверхность и выполняет роль дополнительной твёрдой смазки. Опыт многолетней эксплуатации (в течение 7 лет эксплуатации около двух сотен восстановленных локомотивных коленчатых валов какие-либо технические дефекты не зафиксированы) показал, что срок службы восстановленных шеек коленвалов больше новых в два раза. Причём, замечательным является то обстоятельство, что в экстремальных и аварийных ситуациях (прекращение подачи масла, наличие абразивных частиц) покрытие проявляет большую живучесть в сравнении с основным материалом коленвала.

Базируясь на технологических исследованиях и опыте сверхзвуковой электродуговой металлизации спроектирована и изготовлена промышленная полуавтоматическая линия для восстановления изношенных поверхностей шеек коленчатых валов дизелей 12VFE 17/24 дизель поездов Д1 Венгерского производства, а также любых других коленчатых валов меньших размеров.

Линия содержит полуавтоматы абразивно струйной обработки и металлизации (Рис.8). Полуавтоматы предназначены для работы в комплекте с программируемым контроллером РК 5100 и установкой сверхзвуковой электродуговой металлизации УСМ-4.

Техническая характеристика металлизационной установки УСМ-4

Рабочее напряжение на дуге, В	36-38
Ток дуги, А	150-250
Производительность напыления, кг/ч	8-15
Диаметр распыляемой проволоки, мм	1,2-2,4
Расход воздуха, м ³ /ч	30-40
Расход природного газа, м ³ /ч	4-5
Давление газов, Мпа	0,5-0,6

Полуавтомат металлизации (техническая характеристика приведена в таблице) представляет собой сборочный комплекс, включающий камеру металлизации, установку аспирационную, шкаф управления, электрооборудование, установку сверхзвуковой металлизации УСМ-4, систему воздухопроводов и ограждений. Камера металлизации обеспечивает защиту обслуживающего персонала и окружающей среды от опасных и вредных воздействий процесса металлизации.

Абразиво струйная подготовка поверхности и напыление шеек коленчатых валов может производиться в ручном и автоматическом режимах с гарантированным

обеспечением точности и воспроизводимости всех требований технологического процесса, а следовательно качественных показателей напылённых покрытий.

Полуавтоматическая линия предназначена для упрочнения как новых, так и изношенных коленчатых валов с целью повышения их эксплуатационной надёжности и продления срока службы.

На базе указанной полуавтоматической линии организован и сдан в промышленную эксплуатацию участок по восстановлению коленчатых валов различного назначения в локомотивном депо Илловайск. В настоящее время на нём проводится восстановление коленчатых валов для Украинской железной дороги.

Разработаны технология и оборудование для восстановления с упрочнением гильз цилиндров мощных дизелей. Технология основана на использовании сверхзвукового плазменного напыления специальной порошковой проволоки в среде плазмы продуктов сгорания. Получение покрытия осуществляется на установке, укомплектованной плазмотроном для напыления внутренних поверхностей. Плазмотрон выполнен с одиночной межэлектродной вставкой и рекуперативным охлаждением, работает на сверхкритическом перепаде давлений. Порошковая проволока подается под срез сопла плазмотрона. Распыление проволоки на данной установке имеет существенные особенности, основанные на саморегулировании дуги. При подаче проволоки, которая находится под потенциалом анода, в плазменную струю продуктов сгорания опорное пятно дуги автоматически уходит с поверхности канала сопла на проволоку. Прекращение подачи проволоки приводит дугу в исходное состояние. Т.е. в первом случае дуга горит в канале и полностью замыкается на электроды плазмотрона, во втором – между катодом и проволокой, а анод разгружается, ток в него практически отсутствует. В режиме, совместного нагрева дугой и струей в сравнении с плавлением только в плазменной струе скорость плавления проволоки, дисперсность распыла и скорость полета частиц значительно выше. Именно эти особенности внутреннего саморегулирования системы определяют повторяемость служебных свойства напыленного слоя и технологичность процесса.

Материал и свойства покрытия (прочность, пористость, микротвердость, фазовый состав и др.) подобраны таким образом, чтобы обеспечить требования по усталостной прочности и триботехническим характеристикам. Испытания показали, что ресурс работы восстановленной гильзы увеличится вдвое.



Рис.1. Конфигурация установки плазменного поверхностного упрочнения УВПЗ-2М

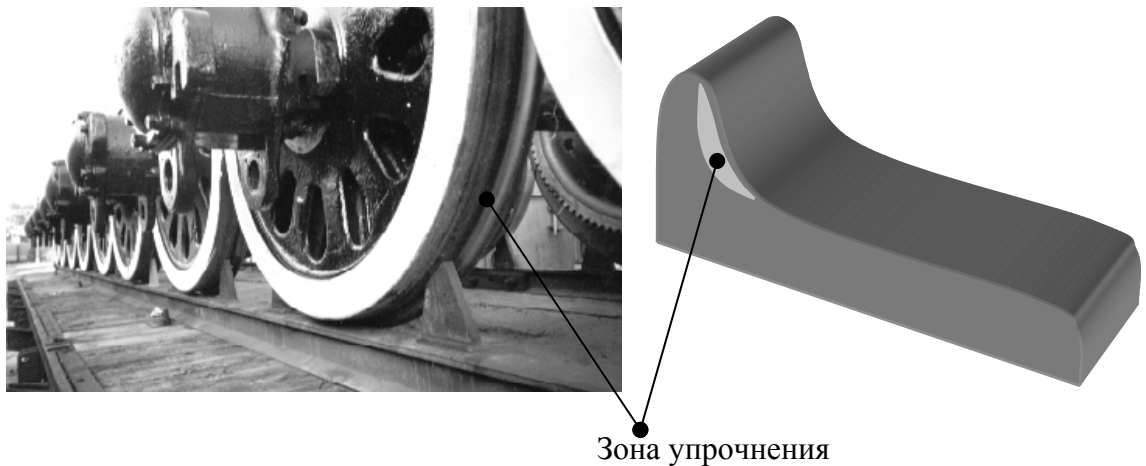


Рис.2. Плазменно упрочненные колесные пары

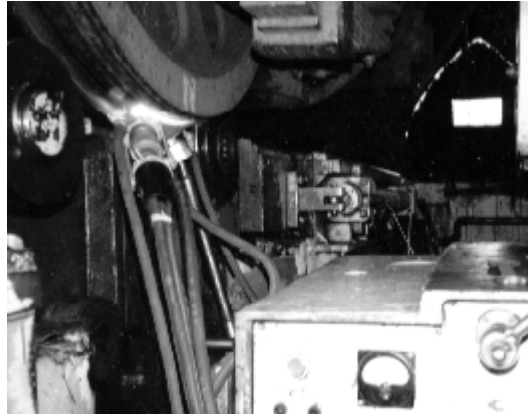


Рис.3. Плазменное упрочнение гребней колесных пар без выкатки из-под локомотива

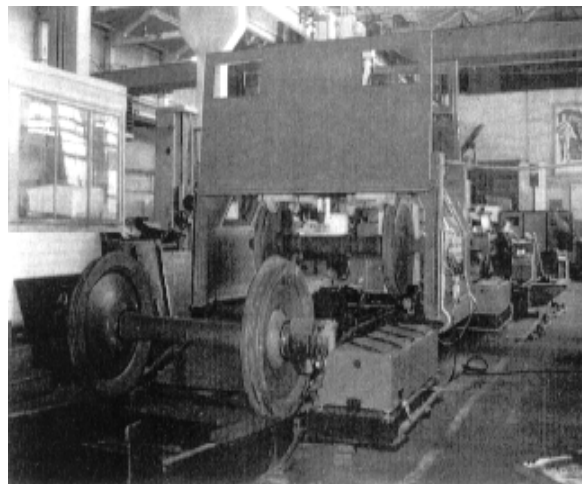


Рис.4 Автоматическая линия для плазменной обработки колесных пар

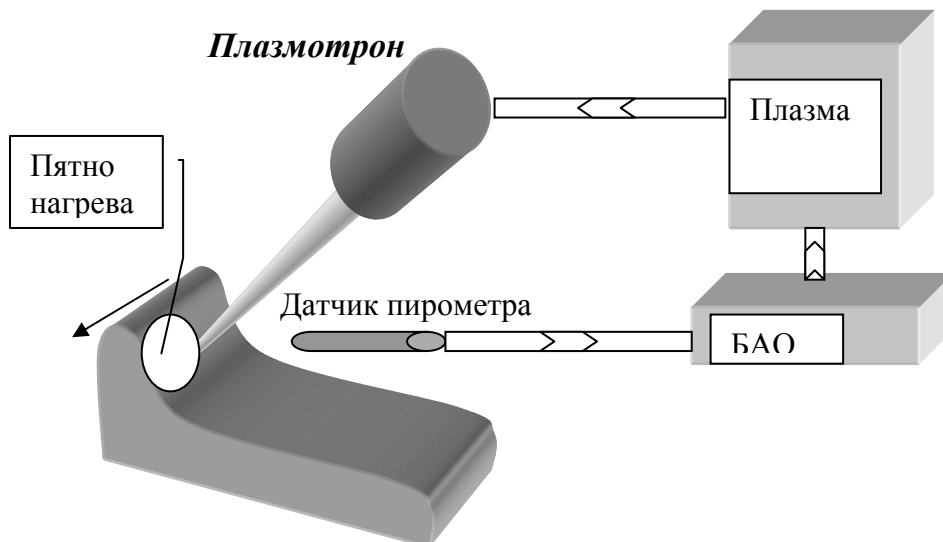


Рис.5. Схема управления и стабилизации термического цикла

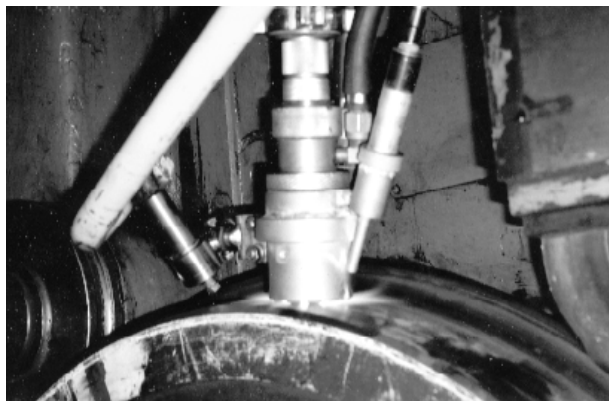


Рис.6. Отпуск ползунов



Рис.7. Восстановление коленвала сверхзвуковой электродуговой металлизацией



Рис.8. Общий вид полуавтомата металлизации