

УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ПОЛУАВТОМАТЫ ДЛЯ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Петров С.В. Докт. техн. наук, Коржик В.Н. Докт. техн. наук ИЭС им. Е.О. Патона НАН
Украины
Никитюк Ю.А. ООО «Оберт»

Существует ряд деталей с повышенными требованиями надежности и долговечности, внутренние рабочие полости которых работают в тяжелых условиях нагружения. Несмотря на множество различий в требованиях к поверхностям они могут быть удовлетворены напылением плазменных защитных покрытий. Проиллюстрируем это на примере втулки цилиндра мощных дизелей и кристаллизатора машины непрерывного литья

Разработка, производство и эксплуатация мощных дизелей постоянно сопровождаются поиском путей повышения КПД, снижения затрат, использования доступных и дешевых материалов, облегчения, ускорения и повышения гибкости ремонта. Наиболее значимым для надежной работы дизеля узлом является цилиндро-поршневая группа, а важнейшую роль в этом играет правильный выбор материалов сопряжения трущейся пары «втулка-кольцо». Поскольку допустимая величина износа рабочих поверхностей втулки и кольца составляет всего десятые доли миллиметра, то в последние годы активно развивается новый подход к их конструированию – на дешевое и массивное основание наносить дорогое и эффективное покрытие. Накопленный опыт Европейских, Японских, Американских компаний и авторов статьи показывает, что процесс плазменного напыления является эффективным методом решения указанных проблем. Так фирма Sulzer Metco ввела в эксплуатацию линию по производству дизельного двигателя VW's V10 TDI для моделей Touareg и Phaeton с плазменно напыленным покрытием на внутренней стенке цилиндра на заводе Volkswagen (VW) в Германии. Польза от реализации высокой технологии плазменного напыления заключается в повышении времени жизни и экономичности двигателя за счет снижения износа, коэффициента трения и защиты от коррозии. Кроме того, весь блок цилиндров становится более дешевым, компактным и легким за счет замены стали на алюминиевые сплавы. Плазменные защитные покрытия на деталях цилиндропоршневой группы (ЦПГ) и элементах камеры сгорания (Рис.1) позволяют в 3 - 4 раза уменьшить износ, увеличить время их жизни практически до выработки запаса усталостной прочности материала, улучшить технические характеристики двигателя (снизить расход топлива и масла, количество вредных выбросов, повысить мощность) и получить значительную экономию. Плазменная технология хорошо вписывается в современные тенденции развития двигателестроения, связанные с ростом удельных мощностей дизелей за счет форсирования среднего эффективного давления в цилиндрах и направленные на повышение топливной экономичности двигателя. Как следствие форсирование приводит к увеличению механической и тепловой напряженности деталей дизеля. При этом вопросы долговечности и надежности дизеля, определяемые в целом по отдельным его деталям и в первую очередь по работоспособности цилиндрической втулки, обостряются.

Цилиндровая втулка локомотивного дизеля рассматривается практически всегда, как монолитная деталь и изготавливается из одного материала. Как правило, это серый высокопрочный чугун, легированный редкоземельными элементами. Следует отметить, что внутренняя и наружная поверхности цилиндрической втулки а также её каркас работают в совершенно разных условиях и к ним необходимо предъявлять совершенно разные требования. Если наружная поверхность втулки должна обладать, в первую очередь, высокой кавитационной и эрозионной стойкостью при сравнительно низких температурах, редко превышающих 100 °С, то для внутренней поверхности в этих свойствах нет необходимости. Внутренняя поверхность цилиндрической втулки должна

обладать износо, задиру - коррозионной стойкостью при высоких температурах. Сочетать такие свойства в одном материала достаточно сложно. Наиболее оптимальный путь - внутренняя и наружная поверхности цилиндровой втулки должны быть изготовлены из различных материалов. Часть цилиндровой втулки, служащая ее каркасом, должна обладать только необходимой механической прочностью и нет необходимости легировать эту область втулки дорогостоящими редкоземельными элементами.

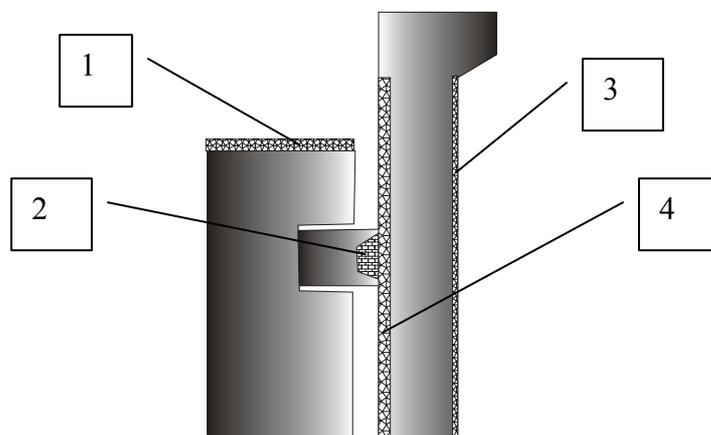


Рис.1. Плазменные защитные покрытия на деталях цилиндропоршневой группы

- 1 – термобарьерное каталитическое покрытие поршня;
- 2 – износостойкое покрытие поршневого кольца;
- 3 – кавитационностойкое покрытие наружной поверхности втулки цилиндра;
- 4 - износостойкое, задиристое, термобарьерное покрытие внутренней поверхности втулки цилиндра.

Исходя из условий работы цилиндровой втулки, ее можно разбить на три основные зоны, к каждой из которых предъявляются различные требования:

1. Первая зона, внутренний поверхностный слой цилиндровой втулки, должна обладать низкой теплопроводностью, высокой износостойкостью, противозадирными свойствами, стойкостью к термическим циклам, низким коэффициентом трения в паре с поршневым кольцом. Материал этой зоны должен иметь достаточную механическую и термическую прочность.
2. Вторая, каркас цилиндровой втулки, как основная несущая часть втулки, должна иметь необходимую механическую прочность.
3. Третья зона, примыкающая к наружной поверхности втулки, должна обладать высокой кавитационной и эрозионной стойкостью.

В настоящее время применяемые материалы для изготовления цилиндрических втулок, не могут оптимально удовлетворить все эти требования. В связи с этим, наиболее целесообразным является формирование каждой зоны детали из материалов с заранее заданными свойствами так, чтобы во взаимосвязи между собой зоны представляли единое целое. Задача облегчена тем, что внутренняя и наружная зоны втулки представляют собой поверхностные слои малой толщины.

Использование технологии плазменного напыления позволяет формировать на цилиндровой втулке поверхностные слои с необходимым набором свойств. Напыляемое покрытие на внутренней поверхности цилиндровой втулки должно обладать не только высокой износостойкостью, но и создавать так называемый “тепловой барьер” для уменьшения термических напряжений и тепловых потерь через втулку в охлаждающую дизель воду.

Покрытие внутренней поверхности втулки цилиндра может осуществляться различными способами газотермического напыления сверхзвуковым газопламенным,

электродуговым и плазменным. Выбор наиболее рационального способа осуществляется исходя из двух принципиальных аспектов – это тепловая и кинетическая энергия напыляемых частиц. Наиболее высокие значения этих параметров достигаются при сверхзвуковом газопламенном и плазменном напылении. Однако, для сверхзвукового газопламенного напыления необходима повышенная дистанция, её сокращение приведет к недопустимому перегреву основы. Наиболее приемлемым методом нанесения защитных покрытий на внутреннюю и внешнюю поверхности втулки цилиндра является плазменное напыление, при котором нагрев, плавление, диспергирование и перенос напыляемого материала осуществляется плазменной струей продуктов сгорания углеводородного газа с воздухом, полученной в электрическом дуговом разряде.

Стенка втулки цилиндра, поршневое кольцо и смазка двигателя внутреннего сгорания взаимодействуют как трибологическая система с установившимся равновесием по скорости износа её компонент и угару смазочного масла. Такой характер работы обуславливает следующие требования к материалу покрытия втулки:

- низкий коэффициент трения и низкий износ материала поршневого кольца в граничных условиях смазки;
- более низкий износ материала покрытия в сравнении с материалом кольца;
- высокое сопротивление термоударам;
- совместимость свойств покрытия с требованиями к финишной обработке зеркала цилиндрической втулки.

Благодаря тому, что для плазменного напыления используются порошки, выбор материала покрытия осуществляется в основном исходя из следующего:

- отсутствие дефицитных и дорогих компонентов;
- обеспечение требуемых износостойкости и коэффициента трения;
- наличие заданной пористости и маслостойкости поверхности в процессе эксплуатации.

В числе удовлетворяющих требованиям работы цилиндрической втулки локомотивных и судовых дизелей могут использоваться различные покрытия. К наиболее соответствующим указанным выше требованиям и развиваемых авторами следует отнести аморфизированные покрытия. Важной отличительной особенностью аморфизированных газотермических покрытий является обнаруженный эффект сохранения уровня твердости, в процессе их нагрева от 300 К до 1000 К. Т.е. относительно высокий уровень νH , $\propto H$ при температурах до 1000 К (практически на уровне этих значений при комнатной температуре, $\nu H \sim 4500$ МПа). В то время, как для кристаллических покрытий из промышленных сплавов, которые разработаны для эксплуатации в условиях изнашивания при повышенных температурах (Стеллит31, Co-Cr-Ni-W-C, T-800-Co-Cr-Mo-Si и др.), наблюдается резкое снижение νH с ~ 7500 МПа при комнатной температуре до ~ 3000 МПа при нагреве выше 850...900 К. В целом, по уровню твердости в интервале температур 300...1000 К рассматриваемые покрытия с аморфной структурой превосходят кристаллические покрытия из описанных марок промышленных сплавов. Такую особенность можно объяснить упрочняющим эффектом вследствие образования микрокристаллических фаз при кристаллизации аморфной структуры покрытий в интервале температур 600...970 К (в зависимости от состава). Электронномикроскопические исследования показывают, что размер кристаллических фаз,

образующихся при нагреве до таких температур, обычно не превышает 0,1 мкм. При металлографическом анализе структурные изменения в таких случаях обычно не обнаруживаются. Структура поверхностных слоев деталей, в том числе и покрытий, их напряженное состояние – один из основных факторов, который определяет сопротивление разрушению при циклических знакопеременных нагрузках. Аморфизированные газотермические покрытия повышают усталостную прочность основы в среднем на 10...40%. Наиболее высокий уровень усталостной прочности σ_{-1} наблюдается для

покрытий, нанесенных методом сверхзвукового напыления благодаря более высокому уровню остаточных напряжений сжатия. Так как фазовый состав в плазменных покрытиях толщиной 200 и 400 мкм практически не отличаются, то установленное позитивное влияние аморфизированного покрытия на усталостную прочность объясняется особенностью напряженного состояния композиции «основа-покрытие». Установлено, что на границе соединения «основа-покрытие», а также в слоях покрытия, которые прилегают к основе (глубиной до 50 мкм), действуют напряжения сжатия, максимальная величина которых достигает (-3 МПа). Очевидно, что такие напряжения служат причиной повышения усталостной прочности. С увеличением толщины покрытия постепенно уменьшаются напряжения сжатия в приграничных слоях, а на поверхности покрытий наблюдается их переход в растягивающие напряжения. Таким образом, проведенные испытания на усталостную прочность в условиях знакопеременных нагрузок при деформациях ниже предела упругости показали, что аморфизированные газотермические покрытия в основном приводят к повышению долговечности материала основы. Такое влияние исследуемых покрытий с аморфной структурой обусловлено особенностями напряженного состояния, а именно – формированием в них сжимающих остаточных напряжений, особенно в слоях, прилегающих к границе «покрытие – основа». Изменение уровня этих напряжений в зависимости от конструктивных параметров покрытий или разных технологических факторах, определяет соответствующее влияние на усталостную прочность системы «основа – аморфизированное покрытие».

В условиях граничного трения аморфизированные покрытия характеризуются в 1,2...1,5 более высокой стойкостью к износу и на 50...80% более низким коэффициентом трения. Вместе с тем, покрытия, имеющие пористость выше 4,5...6,0 % способствуют интенсивному изнашиванию контртела. При сравнении различных составов покрытий в условиях трения скольжения установлено, что лучшие триботехнические характеристики имеют аморфизированные газотермические покрытия из сплавов Fe-B, Ni-B, Fe-B-C-Si, Fe-Si-C, которые превосходят покрытия из более сложнелегированных сплавов систем Fe-Ni-B, Fe-Cr-B, Fe-Mo-Cr-Ni-B. Изучение коррозионных свойств аморфных металлических сплавов показало их высокую коррозионную стойкость, которая связана с системой легирования. В аморфизированных газотермических покрытиях в ряде случаев в аморфной матрице присутствуют нанокристаллические включения, пористость и т.п., которые в разной мере влияют на физико-химические свойства. Так, плазменные покрытия из сплава $Fe_{71}Cr_{10}P_{12}C_7$, содержащие кристаллические включения, по коррозионной стойкости сопоставима с компактной аморфной лентой. Скорость коррозии в 1 н. HCl находится на уровне 10^{-6} А/см², что близко к скорости коррозии аморфной ленты, полученной методом «спиннингования» расплава.

Кристаллизатор - важнейшая часть любой машины непрерывного литья - предназначен для формирования заданного профиля заливаемого в него металла или сплава. В кристаллизаторе образуется прочная" корочка затвердевшего металла, способная служить своеобразной емкостью для кристаллизующегося расплава. Большинство литейных дефектов, слитка, начиная от прорывов металла и кончая искажениями размеров заданного профиля и трещинами, в большей или меньшей степени связаны с конструкцией кристаллизатора и материалами, из которого он изготовлен. Кристаллизатор представляет собой теплообменник и, следовательно, материал, из которого он изготавливается, должен быть теплопроводным. Поэтому с начала применения непрерывного литья материалом служила нелегированная медь.

В связи с этим кристаллизаторы из меди довольно быстро выходят из строя. Причины следующие:

- деформация стенок в вертикальном и поперечном направлениях из-за напряжений в них выше предела текучести меди; возможно, что эта деформация связана с изменением размеров стенки под действием циклической термической обработки

в результате термоструктурных напряжений, вызываемых анизотропностью кристаллов по коэффициенту линейного расширения и упругим свойствам;

- появление трещин из-за термической усталости;
- износ в результате трения слитка о поверхность кристаллизатора, приводящий к нарушению его теплового баланса.

Возникла проблема, касающаяся материала кристаллизаторов и повышения их стойкости. Особенно остро она проявилась при литье слябовых слитков стали на радиальных машинах непрерывного литья, хотя в большей или меньшей степени эта проблема касается и литья сортовых слитков стали, слитков из меди, медных сплавов, никеля и др.

Помимо своей основной функции - придания формы и затвердевания непрерывной заготовки, стенки кристаллизаторов имеют решающее значение для общей экономичности МНЛЗ. Факторами экономической оценки являются стоимость металла стенок кристаллизаторов и срок их службы. Срок службы - это время или количество плавок, в течение которых стенки сохраняют достаточную стабильность размеров, чтобы обеспечить изготовление непрерывных заготовок, соответствующих стандартам качества.

Срок службы стенок кристаллизаторов зависит от химического состава перерабатываемой стали, требований к качеству заготовки, конструкции кристаллизатора, типа МНЛЗ и параметров процесса разлива. Кроме этого, на долговечность стенок влияет воспроизводимость параметров разлива и состояние МНЛЗ.

Долговечность стенок - даже при одинаковых размерах, конструкции и качестве - может меняться от МНЛЗ к МНЛЗ и по-разному оцениваться различными пользователями.

Исходя из этого можно сформулировать основные требования к материалу стенок кристаллизаторов:

- Высокая теплопроводность - избыток тепла должен отводиться через стенки кристаллизатора к воде. При этом имеет место значительное повышение температуры стенки кристаллизатора: температуры на менисках могут достигать 200-450 °С.
- Сохранение прочности при высоких температурах, а следовательно достаточно высокая температура рекристаллизации, чтобы предотвратить или минимизировать разупрочнение стенок. Наиболее критической зоной является мениск и части, подверженные воздействию жидкого металла при входе в кристаллизатор.
- Механическая прочность является решающим фактором для минимизации механического износа стенок на выходе стальной заготовки.
- Ползучесть, возникающая при непрерывной длительной эксплуатации. Разность температур в стенках кристаллизатора как на одном уровне - через стенку, так и между верхним и нижним концами обуславливают значительные термические напряжения. В процессе непрерывной эксплуатации такие напряжения приводят к ползучести и прогрессирующей деформации.

С появлением МНЛЗ развиваются два направления в повышении стойкости кристаллизатора:

1. Создание медных сплавов, отвечающих вышеуказанным требованиям. Введение в медь определенных легирующих элементов позволяет увеличивать степень твердости (например, бронза, латунь) по сравнению с медью промышленного качества. Однако, повышение прочности удается получить лишь ценой снижения теплопроводности.

На практике используются сплавы, содержащие фосфор (например, М1Р), который даже в небольших количествах значительно повышает температуру рекристаллизации, вызывая при этом минимальное снижение проводимости, и сплавы, содержащие серебро, например, МС, повышающее температуру рекристаллизации, проводимость и сопротивление ползучести. Сплавы, содержащие фосфор и серебро, имеют структуру твердого раствора. Механическая

прочность достигается путем холодной деформации.

Значительно более высокой прочности, чем у сплавов со структурой твердого раствора, можно достичь посредством дисперсионного твердения, т.е. термообработкой соответствующих медных сплавов. Такие сплавы обладают хорошей теплопроводностью, а также высоким сопротивлением ползучести и высокой температурой рекристаллизации. К таким сплавам можно отнести сплав БрХ и БрХЦр (так называемую хромовую и хромциркониевую бронзу).

Сравнение материалов, используемых зарубежными и отечественными производителями для стенок кристаллизаторов, позволяет найти много общего. Например, крупнейший в Европе производитель стенок кристаллизаторов компания КМЕ (Австрия) использует материалы, аналогами которых являются М1Р, МС, БрХ, БрХЦр. Кроме того, КМЕ изготавливает кристаллизаторы из сплавов медь-кобальт-бериллий и медь-никель-бериллий и т.д. и т.п..

2. Путем нанесения различных покрытий. Здесь существует большой спектр материалов покрытий и способов их нанесения. Однако основной вывод: не простая это работа - повышать износостойкость кристаллизаторов и проблема пока остается открытой.

Вместе с тем, накопленный опыт современных методов нанесения покрытий, а именно: выполненные опытно-исследовательские работы по нанесению износостойкого покрытия на рабочую поверхность кристаллизатора методами детонационного, плазменного, импульсного плазменного напыления свидетельствуют о том, что покрытие высокоскоростным газотермическим напылением способно обеспечить всем вышеперечисленным требованиям к кристаллизатору.

Вышеприведенные предпосылки стали основой создания специализированного оборудования (плауавтоматической линии) для реновации и упрочнения внутренних поверхностей деталей. Линия (Рис.2.) содержит основное технологическое оборудование, это: полувтомат для абразивоструйной обработки (1) с аппаратом абразивоструйным нагнетательного типа (2) полувтомат напылительный (3) шкаф управления линией (4), установку плазменную, которая включает источник электропитания (5), шкаф управления (6), питатели – дозаторы (7), плазматрон для напыления внутренних поверхностей с удлинителем (8).

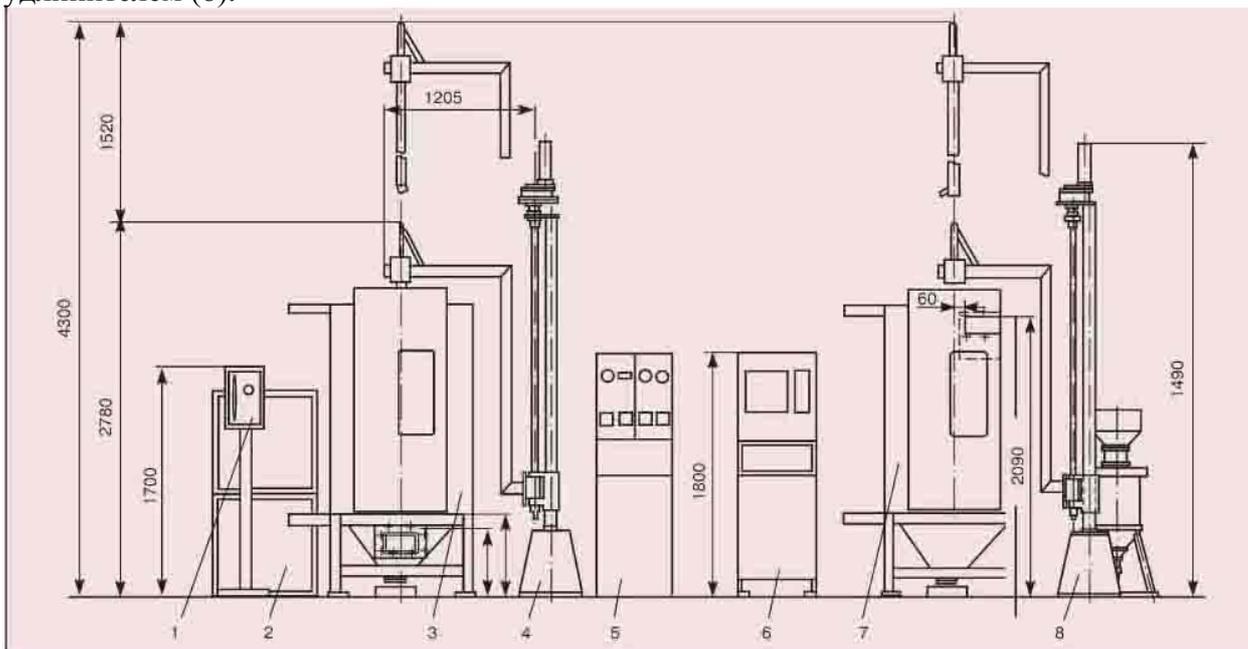


Рис.2. Линия плазменного напыления внутренних поверхностей.

Полуавтоматы абразивоструйный и напылительный (Рис.3а,б) выполнены на едином принципе. Они содержат камеру в первом случае с внутренней резиновой обшивкой для сохранности абразива, во втором случае с шумоизолирующей обшивкой. В камерах размещен поворотный стол для закрепления и вращения детали. Камеры также оборудованы приточно-вытяжной вентиляцией и системами датчиков. В состав полуавтоматов входят две колонны с инструментом (Рис.3б) - в первом случае с абразивоструйным пистолетом, во втором с плазмотроном. Абразивоструйный пистолет и плазмотрон имеют две степени свободы – возвратно-поступательное перемещение и поперечное. Все перемещения выполнены на базе регулируемых приводов постоянного тока.



а



б

Рис. 3 Полуавтоматы для напыления и абразивоструйной подготовки

Управление полуавтоматами и плазменной установкой осуществляется со шкафа управления (Рис.4а). Разработанное программное обеспечение позволяет гибко управлять всеми параметрами процесса и их стабилизировать. Это особенно важно для напыления, поскольку качество покрытия может гарантироваться точностью поддержания всех технологических параметров. Плазменная установка содержит свой шкаф управления (Рис.4б) и может работать как автономно, так и с единого пульта управления полуавтоматами (Рис.4а).



а



б

Рис.4 Шкаф управления полуавтоматом (а), плазменной установкой ПЛАЗЕР (б)

На лицевой панели шкафа управления установлен монитор для наблюдения за процессом напыления. Главным элементом (сердцем установки) является плазмотрон для внутреннего напыления (Рис.5). Он выполнен по трехэлектродной схеме с боковым подводом коммуникаций. Номинальная мощность 50 кВт, может работать на дозвуковом и сверхзвуковом режимах. В качестве плазмообразующего газа используется смесь сжатого воздуха с природным газом. Плазмотрон является универсальным по исходному материалу - порошки или проволока.



Рис.5. Плазмотрон для напыления внутренних покрытий

Такое исполнение делает линию для напыления покрытий на внутренние поверхности универсальной и гибкой как по виду деталей, так и по составу и свойствам напыленных покрытий.



Рис.6. Цилиндрические втулки с плазменным покрытием

К настоящему времени несколько тысяч втулок различного типа локомотивных и речных дизелей (Рис.6) с плазменно напыленным покрытием. Опыт промышленной эксплуатации (более трех лет на локомотивах с пробегом более 500 тысяч км и пяти тысяч часов на речных дизелях подтверждает выполненные исследования. Износ втулок на речных дизелях за навигацию составляет в среднем 0,02 мм против 0,08 по нормативу. Доказано, что плазменная технология позволяет из отработавших свой срок по износу внутренней поверхности чугунных втулок изготавливать практически новые и более износостойкие.

В вагонных и локомотивных депо, на вагонно- и локомотиворемонтных заводах имеется большое количество осей колёсных пар подвижного состава с предельно заниженными общими размерами. Ежегодный выход таких маломерных, но практически «здоровых» осей с изношенными буксовыми шейками исчисляется на различных дорогах от сотен до тысяч. Газотермическое напыление, пожалуй, единственная подходящая технология ремонта таких осей с заниженными общими размерами посадочных мест и единичными дефектами. Фирма Wilhelm Schmidt, Германия, наносит на подступичные части осей газопламенным методом молибденовое покрытие, ВНИИЖТ рекомендует электродуговое напыление стальной проволоки типа 30ХГСА. Исходя из требований к покрытию, метод сверхзвукового электродугового напыления является наиболее подходящим для этих целей. Он обеспечивает наиболее высокую прочность и плотность покрытия.

Авторами разработана полуавтоматическая линия (Рис.7) для восстановления осей с изношенными буксовыми шейками.



Рис.7. Полуавтоматическая линия для восстановления осей с изношенными буксовыми шейками.

В данном полуавтомате для напыления покрытий применяется специальный плазмотрон (Рис.8). Это обусловлено требованием обеспечить близкую к нулю пористость, прочность покрытия, приближающуюся к прочности компактного материала с минимальными потерями при напылении из-за использования дорогих материалов при больших объемах производства деталей с покрытиями. Плюс необходимость обеспечения

точности процесса, воспроизводимости показателей качества при длительной работе оборудования.



Рис.8 Плазматрон для напыления покрытий на оси.