

## **ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЛАЗМЫ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ И ЕЕ ГЕНЕРИРОВАНИЕ**

ПЕТРОВ С. В.  
Институт газа НАНУ

Говорить сегодня о состоянии развития и практическом продвижении технологий с использованием плазмы продуктов сгорания углеводородных газов уместно, вернувшись к истокам формирования их основ. Оставляя в стороне многочисленные разрозненные вклады отдельных исследователей и групп, сейчас отчетливо видно, что решающее влияние на развитие процессов с использованием плазмы продуктов сгорания оказали разрабатываемые в Институте газа АН СССР с 1960 г. под руководством И. Н. Карпа научно-технические основы повышения эффективности использования природного газа в высокотемпературных процессах. К числу наиболее важных следует отнести полученные данные по термодинамическому равновесию системы С-Н-N-O в широком интервале изменения исходных параметров, учету влияния диффузии на протекание высокотемпературных процессов химической переработки газа, расчету и конструированию различных топливно-плазменных устройств [1 - 4]. В результате этих работ определилась благоприятная перспектива промышленного применения топливно-дуговых горелок, основанная на таких факторах: 1) возможность регулирования в широких пределах окислительно-восстановительного потенциала плазмы путем изменения соотношения топливо:окислитель; 2) высокая энтальпия плазмы при одинаковой электрической мощности плазмотрона; 3) относительная экономичность, обусловленная непосредственным использованием химической энергии топлива в плазменном факеле и недефицитность плазмообразующих газов; 4) высокие транспортные свойства плазмы вследствие протекания в ней диссоциативно-рекомбинационных процессов [5].

Исходя из этих факторов, область применения топливно-плазменных горелок условно можно разделить на три группы. К первой относятся процессы, связанные, в основном, с получением и применением конвертированного природного газа (прямое восстановление железа, интенсификация выплавки чугуна в доменных печах, пиролиз углеводородов, синтез галогеноуглеродов, карбидизация руд перед выщелачиванием, восстановление серы из сероокисных соединений, плазменная интенсификация горения низкосортных углей и др.) Вторая группа включает энерготехнологические процессы, в которых дефицитные баллонные плазмообразующие газы могут быть заменены с положительным эффектом газоздушной смесью (плазменное напыление защитных покрытий, сфероидизация порошков, безокислительный нагрев стали, производство двуокиси циркония разложением циркона, высокотемпературная цементация стальных изделий, высокотемпературное окисление атмосферного азота и др.). Третья группа - это тепловые процессы, которые в принципе можно осуществлять с любым видом плазмообразующего газа, но где использование плазмы продуктов сгорания топливного газа более экономично (плазменная поверхностная закалка, плавление огнеупоров и стекол, подогрев и плавление скрапа в электропечах, получение синтетических шлаков, декоративная отделка зданий и др.)

Так, среди энерготехнологических процессов первой группы весьма значимой и перспективной представлялась плазменная интенсификация доменной плавки с заменой части кокса конвертированным в топливно-плазменной горелке топливом. Непрерывное удорожание кокса повышает актуальность этого направления. Единственным непреодолимым на сегодняшний день ограничением является отсутствие мощных плазмотронов с длительным (сотни часов) ресурсом работы. Несмотря на значительные усилия разработчиков проблема высокоресурсного плазмотрона остается открытой. Она делает все эффективные плазменные технологические процессы с длинным циклом практически недоступными для широкой промышленной реализации.

Среди теплотехнологических процессов второй группы ожидания, связанные с напылением покрытий в среде плазмы продуктов сгорания топливного газа (природного или пропан-бутана), оправдались. В последние годы успешное развитие получает также процесс плазменной поверхностной закалки.

В связи с этим целесообразно остановиться подробнее на особенностях технологии процессов напыления, поверхностной закалки и оптимальном, исходя из требований указанных технологий, генерировании плазмы продуктов сгорания.

Метод плазменного напыления относится к числу активно развивающихся направлений в области защитных покрытий. Он занял свое особое место в группе промышленно развитых методов и характеризуется высокой универсальностью, производительностью, легкостью автоматизации, высокой скоростью протекания физических процессов и т. д.

Ограничения применения процессов газотермического напыления связаны, главным образом, с недостаточной прочностью и воспроизводимостью свойств покрытий. Эти недостатки в значительной мере преодолеваются с использованием новой техники сверхзвукового напыления.

Использование сверхзвуковых газовых струй при газотермическом напылении является одним из ведущих направлений современного развития этой технологии. Повышение скорости и кинетической энергии частиц напыляемого материала позволяет, с одной стороны, улучшить условия формирования покрытия, а с другой - ограничить вредное воздействие окружающей среды и снизить интенсивность процессов термического разложения материала.

Возрастание скорости частиц приводит к сокращению времени их пребывания в струе до момента попадания на основу. С одной стороны, это позволяет уменьшить степень развития таких нежелательных явлений, как окисление частиц при взаимодействии с окружающей средой (воздухом) и термическое разложение напыляемого материала. Однако, с другой стороны, при этом уменьшается возможная продолжительность нагрева частиц, что требует использования при сверхзвуковом напылении порошков с меньшим размером частиц, а также формирования струй с большей протяженностью зоны нагрева. Следует учитывать, что разгон и нагрев частиц в сверхзвуковом потоке имеет свои особенности. При введении в сверхзвуковую струю частицы с размером, в несколько раз превышающим длину свободного пробега молекул, перед ней возникает ударная волна, движущаяся со скоростью частицы. Температура газа за ударной волной близка к температуре торможения. По мере ускорения частицы интенсивность ударной волны падает и температура за ней уменьшается. В момент достижения частицей скорости звука (относительно газового потока) ударная волна исчезает и температура струи оказывается

равной температуре невозмущенного потока, которая может быть относительно невысокой, если число Маха потока достаточно велико. Наибольшая доля тепловой энергии при теплообмене в условиях сверхзвуковой струи передается частице в начальный период ускорения.

Таким образом, применение сверхзвуковых струй при газотермическом напылении создает предпосылки к повышению качества покрытий (прочности сцепления, плотности, благоприятной структуры) за счет активизации процесса взаимодействия частиц с основой и между собой, увеличения степени деформации частиц и уменьшения изменений состава материала покрытия в процессе напыления.

Использование в качестве плазмообразующей среды смеси воздуха с углеводородным газом (метаном, пропан-бутаном) [6,7] позволило в 80-х годах реализовать на практике в промышленном масштабе новый тип плазменных установок: в начале единичные экземпляры [8], затем - мелкой "Украина" [9] и крупной "Киев-7" [10] сериями. Указанная аппаратура дозвукового плазменного напыления сыграла значительную роль в расширении масштабов использования данной технологии и объемов производства деталей с защитными покрытиями. При этом усилия исследователей и практиков направлялись на то, чтобы, исходя из реальных условий эксплуатации композиции деталь-покрытие и характера разрушения последнего, назначить достаточный и в то же время достижимый на имеющейся в наличии аппаратуре уровень прочности, пористости, анизотропии свойств, структуры, химсостава покрытия и др. Получено множество корреляционных зависимостей влияния переменных факторов процесса напыления на свойства покрытия из различных материалов и их служебные характеристики. Однако, в пределах возможностей метода дозвукового плазменного напыления, основные недостатки которого обусловлены физикой процесса, покрытие формируется из дискретных расплавленных частиц с ограниченным запасом энергии.

Возможности наиболее важных достижений в материаловедческом аспекте с использованием термической плазмы заключаются в ее способности синтезировать новые соединения, материалы и структуры. Это направление в мире быстро прогрессирует, является многообещающим и в настоящее время привлекает повышенное внимание специалистов [11]. С использованием термической плазмы получают новые керамические и аморфные материалы, интерметаллидные соединения, армированные керамические и интерметаллидные материалы, металломатричные композиции и т. д.

Процесс плазменного напыления, совмещенный с целевыми химическими превращениями, является одним из методов, с помощью которого могут быть синтезированы новые материалы. При этом может быть получен новый класс покрытий, содержащих синтезированные в плазме материалы нитриды, карбиды, оксиды [12].

Приведенный анализ условий повышения качества покрытий в полной мере относится и к электродуговой металлизации. Однако, основной прогресс в этой области был достигнут за счет углубления в понимании процесса и совершенствовании материалов. Лишь в последние годы выполнены работы, основанные на увеличении скорости обдувающего газа [13].

Основные проблемы газотермического напыления, связанные с недостаточными для практики точностью и воспроизводимостью свойств напыленных покрытий, могут быть преодолены лишь с учетом всех специфических плазменных эффектов при разработке аппаратуры.

Оптимальная технология предполагает определенный уровень и распределение параметров (температуры, электропроводности, скоростей, составов, их пульсационных характеристик и др.) вдоль и поперек потока. Решение проблемы с оборудованием определяется степенью приближения реально достигнутых параметров к теоретически оптимальным.

Согласно современным представлениям для нанесения плотных покрытий с высокой прочностью сцепления, однородной структурой и воспроизводимыми свойствами необходимо оборудование, позволяющее получать концентрированный поток расплавленных частиц, имеющих достаточно высокую среднюю скорость при минимальном разбросе температур и скоростей. Кроме того, для повышения эффективности процесса напыления аппаратура должна иметь высокую производительность при минимизации энергозатрат и непроизводительных потерь напыляемого материала, быть удобной в эксплуатации и ремонтпригодной.

Развитый автором подход идеологически основан на использовании в качестве плазмообразующего газа смеси воздуха с горючим углеводородным газом (метаном, пропан-бутаном) и стабилизированной протяженной с фиксированной средней длиной электрической дуги; аппаратурно - плазмотрона с одиночной межэлектродной вставкой (МЭВ).

В плазмотронах, генерирующих химически активную плазму продуктов сгорания, используется преимущественно торцевой термохимический катод с (Hf, Zr) активной вставкой (нами проработаны и другие варианты: глухой полый медный, вольфрамовый, постоянно восстанавливающийся из газовой фазы, катоды) и осуществляется вихревая стабилизация дуги. Фиксацией катодного опорного пятна дуги и изоляцией (электрической и тепловой) столба дуги в канале МЭВ роль закрутки в плазмотроне для напыления оказывается исчерпанной. Вдув части плазмообразующего газа в зазор МЭВ - анод необходим для повышения диэлектрической прочности, соответственно исключения пробоя и возникновения двойной дуги, создания газовой завесы на входе канала сопла-анода, выравнивание полей параметров дуговой плазмы. Как следствие, при этом происходит рассеивание столба прианодной части дуги, локализация анодной зоны привязки в узкой кольцевой зоне, быстрое выравнивание температурных, скоростных и концентрационных полей за зоной привязки разряда, дробление масштаба турбулентности и ламинаризация течения.

В плазмотроне для напыления можно выделить две характерные зоны. В первой происходит преобразование электрической энергии в тепловую и формирование оптимальных профиля и уровня параметров: требуемых температурных, скоростных и концентрационных полей с учетом осредненных и пульсационных составляющих. Во второй зоне происходит формирование двухфазного потока, определяемого траекториями дисперсных частиц; разгон, разогрев частиц до температуры плавления и сопутствующие физико-химические превращения: испарение, изменение химического состава и размеров частиц по сравнению с исходным порошком.

Участками активного локального воздействия на протяженную электрическую дугу в плазмотроне для напыления являются прикатодная и прианодная ее части. Столб дуги здесь играет пассивную роль, обеспечивая лишь нагрев газа. Длина дугового канала может меняться от 1 до 12 калибров в зависимости от требуемой мощности. При токе дуги 300 А электрическая мощность составит соответственно 30 и 140 кВт. Геометрические соотношения

дугового канала, параметры газового вихря, материал стенок канала следует выбирать из условий обеспечения пространственной стабильности горения разряда, отсутствия каких-либо случайных колебаний, пробоев на стенку при максимальной напряженности электрического поля и минимизации потерь тепла. На малых длинах МЭВ 1-2 калибра, когда потери тепла в стенку канала определяются лишь излучением дуги (при добавлении углеводородного газа к воздуху они снижаются) целесообразно организовывать рекуперативное охлаждение МЭВ плазмообразующим газом. К. п. д. плазмотрона при этом достигает 90%. На длинах МЭВ до 5-6 калибров стенки канала могут быть выполнены из малотеплопроводного материала (нержавеющая сталь, силицированный графит). На длинах 6-12 калибров в связи с ростом конвективной составляющей и теплопроводности плазмы продуктов сгорания с максимумом  $\sim 3500$  К (при достижении такой температуры в узком кольце между дуговой плазмой и стенкой канала) плотность теплового потока становится соизмеримой с тепловой нагрузкой выходного электрода-анода. Эта часть дугового канала выполняется из меди и интенсивно охлаждается. Дальнейшее увеличение длины канала одиночной МЭВ более 10-12 калибров теряет смысл, поскольку тепло, выделяющееся в электрической дуге, уже не расходуется на нагрев газа, а уходит в стенку канала и становится технически трудно осуществимым из-за двойного дугообразования.

Добавка горючего углеводородного газа к воздуху на обдув катода приводит к повышению напряжения на дуге на 25-30% и снижению стойкости катода примерно на такую же величину (без принятия специальных мер).

Обнаруженный эффект более сильного влияния добавки метана к газу (воздуху, аргону, азоту) на обдув катода, чем в смеси с основным плазмообразующим воздухом на прирост напряжения на дуге позволяет легко поддерживать напряжение на дуге на постоянном уровне при изменении суммарного соотношения топливо:окислитель. Поскольку расход газа на обдув катода примерно в 10 раз меньше, чем плазмообразующего, а влияние на напряжение дуги более сильное, то компенсация прироста напряжения от увеличения расхода метана в смеси плазмообразующего газа незначительным снижением расхода метана на обдув катода практически не влияет на общий состав смеси, такое регулирование с целью поддержания напряжения на дуге постоянным вне зависимости от состава смеси позволяет полностью использовать установленную мощность источника электропитания.

Стабильность прикатодной части разряда во времени и пространстве чрезвычайно важна в плазмотроне для напыления, поскольку любые пульсации либо дрейф параметров, возникающие здесь, сносятся потоком и оказывают существенное влияние на характеристики дуги в целом и, соответственно, генерируемой плазменной струи. Проблема повышения стойкости катода и стабилизации параметров прикатодной части разряда в газозвушной смеси решается на стадии запуска плазмотрона, созданием оптимальной структуры газового вихря, интенсификацией охлаждения катода.

Запуск плазмотрона с термохимическим катодом на газозвушной смеси должен происходить таким образом, чтобы исключить капельный вынос материала активной вставки катода, выгорание медной обоймы, возникновение двойной дуги. Переходные процессы выхода плазмотрона на рабочий режим должны обеспечить последующее длительное стабильное горение разряда.

Обнаружен режим горения с резко контрагированным пятном дуги [14]. Реализуется режим работы катода, при котором материал эмиссионной пленки

под пятном дуги восстанавливается из газовой фазы. При выполнении этих условий в течение длительной работы плазмотрона не происходит заглужения дуги в кратере катода из-за испарения материала активной вставки, поэтому отсутствует дрейф дуги. Это один из основных факторов сохранения воспроизводимых во времени параметров плазменной струи.

В прианодной части дуги совмещаются процессы управления формированием плазменной струи с требуемыми параметрами и обеспечения стабильности ее генерирования в течение длительного (не менее рабочей смены) периода.

Наиболее эффективным из всех известных приемов разрушения стабилизированной дуги и быстрого заполнения профиля температур, скоростей в канале является вдув газа в зазор МЭВ - анод с противокруткой по отношению к основному плазмообразующему газу в количестве 30-50% от суммарного расхода.

Если добавка горючего углеводородного газа к воздуху на обдув катода приводит к улучшению одних показателей (рост напряжения, снижение выхода энергии с излучением, расширение области устойчивой работы) и ухудшению других (повышение эрозии катода, ухудшение стабильности катодного пятна), для компенсации которых необходимо принимать специальные меры, то в прианодной части добавка  $\text{CH}_4$  приводит к улучшению всех показателей. Локализация зоны привязки разряда завершается на расстоянии 2 калибров, а полное заполнение профиля - 3 калибров. Существенное (на порядок) снижение эрозии анода вследствие отсутствия окисления меди, и формирования диффузной привязки дуги на аноде в плазме продуктов сгорания обеспечивает сохранность геометрии сопла в процессе работы. Это обстоятельство играет решающую роль для практического использования сверхзвукового плазмотрона.

Расчетно-теоретические и экспериментальные исследования установили возможность длительного (более 30 часов) стабильного генерирования протяженной слабонедорасширенной сверхзвуковой плазменной струи продуктов сгорания, обеспечивающей высокопроизводительное напыление качественных покрытий из всех групп материалов, с использованием звукового сопла. Область джоулевого тепловыделения может совмещаться с газодинамической критикой и областью свободного расширения. Фазовые превращения и теплообмен между фазами изменяют параметры течения, но не влияют на устойчивость волновой структуры струи. Боковой вдув напыляемого порошка в сверхзвуковую плазменную струю возможен в области газодинамической критики (на расстоянии  $\sim 0,6$  калибра до среза сопла) или в первую "бочку".

Реализован новый подход к построению аппаратуры для электродугового распыления проволок. Он основан на использовании продольно продуваемой, расположенной вдоль оси потока электрической дуги, горящей между двумя подающимися проволоками: центральной и боковой. В качестве распыляющего газа используется сверхзвуковой  $M = 1,1-1,3$  поток горячих продуктов сгорания (рис.4). Эти новшества обеспечивают высокую стабильность горения дуги, соответственно плавление проволок, повышение скорости частиц до 150-200 м/с, снижение их размеров до 50-150 мкм, что приводит к улучшению качества покрытий.

Технологические особенности напыления покрытий в плазме продуктов сгорания связаны с ее теплофизическими свойствами. Хорошо заполненный

профиль температур и скоростей в плазменной струе продуктов сгорания, протяженная высокотемпературная зона способствуют эффективному и равномерному прогреву и разгону всех частиц порошка независимо от траектории их полета. Связывание кислорода продуктами неполного горения обеспечивает определенную защиту напыляемого материала от окисления в полете. Высокий запас тепла в плазменной струе предполагает наиболее эффективное использование плазмы продуктов сгорания в процессах, где эффективный нагрев изделия является целесообразным: напыление с оплавлением, плазменная закалка. Оптимальная дистанция напыления находится в пределах 200-300 мм. В случаях, когда следует избегать перегрева изделия и покрытия, используется дополнительное охлаждение - воздушное, углекислотное, водяное спрейерное, капельно-воздушное.

В процессах дозвукового плазменного напыления преобладает дробление частиц порошка размером  $\sim 50$  мкм. С использованием сверхзвуковых потоков в ряде случаев наблюдается преобладание коагуляции, когда на основе в покрытии встречаются частицы размером значительно превосходящие исходный порошок. Процесс сверхзвукового плазменного напыления чувствителен к фракционному составу напыляемого порошка. Для получения высококачественных покрытий следует использовать узкую фракцию с размером частиц 20-40 мкм керамических, 20-60 мкм металлических.

Использование сверхзвуковых струй в технологии плазменного напыления приводит к существенным количественным и качественным изменениям свойств покрытий и расширяет технологические возможности метода напыления. Обнаружено взаимное диффузионное проникновение элементов покрытия и основы, за счет чего в 2-3 раза возрастает прочность сцепления. В  $\sim 4$  раза увеличивается степень расплющивания частиц при ударе и затвердевании на основе, что приводит к повышению степени аморфизации материалов из сплавов Fe - Mo - Cr - Ni - B с 65% до 90%, снижению среднего размера пор в  $\sim 10$  раз, пористости до 0-2%. Эти факторы приводят к увеличению сопротивления покрытия износу, коррозии и т. д.

Разработан [15,16] новый процесс высокоскоростной поверхностной плазменной закалки. Здесь используется пролонгированный нагрев детали плазменной струей продуктов сгорания.

Термическое упрочнение стальных деталей является одним из наиболее эффективных и действенных способов увеличения ресурса работы нагруженных элементов машин и механизмов, а также снижения их материалоемкости. Во многих случаях, технически и экономически оправдана локальная термообработка. При этом упрочняют только наиболее нагруженную рабочую поверхность детали, оставляя нетронутой сердцевину. Для поверхностного упрочнения деталей в промышленности широко применяли термическую высокочастотную и газопламенную обработку. Дальнейший прогресс в повышении качества термообработки рабочих поверхностей деталей связывают с применением концентрированных источников энергии: электронного и лазерного луча, плазменной струи. При этом достигаются более высокие качество упрочнения и эксплуатационные свойства. Из всех способов термообработки высококонцентрированными источниками нагрева плазменный является наиболее экономичным и производительным. Он характеризуется меньшей стоимостью, доступностью технологического оборудования и большими размерами упрочненной зоны.

Теплофизические особенности плазменного воздействия на материалы (очень высокие скорости нагрева и охлаждения, высокая температура нагрева, малая длительность пребывания нагретого металла в интервале температур, превышающих критические) обуславливают отличительные признаки фазовых структурных превращений, и, следовательно, характер сформировавшихся структур при плазменном упрочнении в сравнении с традиционными способами (печной, ТВЧ, газопламенной и др.). Важнейшей отличительной особенностью структур, сформировавшихся при плазменном упрочнении, является высокая степень дисперсности материала закаленной зоны, которая определяет комплекс эксплуатационных характеристик. Особенностью формирования закаленного слоя при пролонгированном тепловом воздействии является плавное изменение структуры и микротвердости по глубине.

Для увеличения ресурса работы колесных пар подвижного и тягового состава разработана технология плазменного поверхностного упрочнения, обеспечивающая повышение контактно-усталостной прочности металла за счет оптимизации цикла нагрева-охлаждения, исходя из закономерностей структурных, фазовых и полиморфных превращений упрочняемого материала.

Нагрев под закалку осуществляется высокоэнтальпийной плазменной струей, стелющейся вдоль нагреваемой поверхности, и со встречным относительным перемещением. Нагретая зона охлаждается сразу при выходе из плазмы, в основном, за счет отвода тепла в тело массивной стальной детали, кондуктивного и радиационного теплоотвода с поверхности в атмосферу. Нагрев каждого участка поверхности происходит с нарастающей плотностью теплового потока в соответствии с изменением теплофизических параметров плазмы по мере приближения к устью струи. Эти параметры, в свою очередь, могут регулироваться в широком диапазоне. Особенностью такого процесса является "мягкий" прогрев с относительно небольшой скоростью нарастания температуры до начала аустенизации стали. При этом параметры греющей среды, время взаимодействия с учетом температуропроводности материала согласуются так, чтобы обеспечить наибольшую глубину прогрева. "Мягкий" прогрев плавно переходит в "жесткий" с высокой скоростью нарастания температуры в поверхностном слое для более полной аустенизации, гомогенизации и растворения карбидов.

Рассматриваемая схема процесса поверхностного плазменного нагрева под закалку характеризуется высоким к.п.д. (60-80%) и согласованностью темпов нарастания плотности теплового потока греющей среды с теплофизическими свойствами стали.

Данная технология характеризуется новыми возможностями повышения контактно-усталостной прочности металла и, как следствие, увеличение надежности колесных пар тягового и подвижного состава. Интенсивность износа гребней колесных пар с плазменным упрочнением значительно ниже, чем у серийных (в 2,5-3 раза). Разработанная технология закалки колесных пар обеспечивает две отличительные особенности: 1) локальное (в зоне наибольшего износа) поверхностное упрочнение гребня колеса на глубину 2,5-3 мм и ширину 35 мм с 280 НВ (в исходном материале) до твердости 450 НВ. 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 мелкоугольчатого мартенсита с розеточным трооститом 50:50%. Эти обстоятельства способствуют улучшению механических свойств (в т.ч.

снижается коэффициент трения в контакте гребня с боковой поверхностью рельса) и повышается трещиностойкость материала колеса в зоне плазменного упрочнения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Карп И.Н., Сорока Б.С., Дашевский Л.Н., Семернина С.Д. Процессы сгорания природного газа при высоких температурах.- Киев: Техника. 1967.- 382 с.
2. Гринченко Н.Н. Исследование сжигания газа в электроусиленных пламенах и разработка электрогазовых горелок. Автореферат диссертации кандидата технических наук.- Киев. 1973.- 26 с.
3. Гололобов О.И. Исследование процесса закалки продуктов высокотемпературных химических реакций в сверхзвуковом сопле. Автореферат диссертации кандидата технических наук.- Киев.1971. - 29 с.
4. Ониськова О.В., Марцевой Е.П., Числовский В.В. Моделирование реакторов плазмохимических гомогенных процессов. - Киев.: Наукова думка. -1982.- 200 с.
5. Карп И.Н. Научно-технические основы эффективного использования природного газа в высокотемпературных энерготехнологических процессах. Автореферат диссертации доктора технических наук. -Киев.- 1979.- 36 с.
6. Петров С.В., Карп И.Н. Плазменное газозвдушеное напыление.- Киев.: Наукова думка. - 1993.- 495 с.
7. Петров С.В. Технология и оборудование для нанесения покрытий в газозвдушенной плазме // Сварочное производство.- 1992.- № 6.- С.2-5.
8. Газотермические покрытия из порошковых материалов /Ю.С.Борисов, Ю.А.Харламов, С.Л.Сидоренко, Е.Н.Ардатовская// Газотермические покрытия из порошковых материалов.- Киев.: Наукова думка. - 1982. - 544 с.
9. Опытнo-промышленная плазменная установка для напыления покрытий /С.Я.Шехтер, А.М.Резницкий, В.Ю.Суворов и др.// Сварочное производство. - 1982.- № 8. - С.41.
10. Эсбиян Э.М. Новое серийное оборудование для плазменного напыления покрытий // Автоматическая сварка.- 1988.- № 11.- С.74 - 75.
11. Ronald W. Smith. Emerging U.S. Thermal Plasma Materials Processing Research and Development / Word Progress in Plasma Applications, Palo Alto, CA, February 9-11, 1993.
12. Петров С.В. Плазменный синтез в технологии газотермического напыления // Порошковая металлургия.- 1997.- № 9/10.- С.34 - 38.
13. Карп И.Н., Петров С.В., Рудой А.П. Электродуговая металлизация в высокоскоростном потоке продуктов сгорания метана // Автоматическая сварка .- 1991.- № 1.- С.62 - 65.
14. Карп И.Н., Петров С.В. Работа катода в атмосфере продуктов сгорания // Материалы VIII Всесоюзной конференции “Физика низкотемпературной плазмы”. Минск.- 1991.-ч.1.- С.130 - 131.
15. Лашко А.Д., Петров С.В., Сааков А.Г. Плазменное поверхностное упрочнение колесных пар// Залізничний транспорт України.- 1997.- № 2-3.- С.22 - 25.
16. Petrov S.V. Plasma Surface Hardening of Wheelsets.// Proceedings of the Eleventh International Conference on Surface Modification Technologies held in Paris, France, September 8-10, `1997.- P.516-525.