

Лекция 8.

ОСНОВЫ ФИЗИКИ ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В настоящее время сложилось два направления в применении плазменных технологий. Первое направление охватывает технологии, использующие плазму в традиционных отраслях промышленности: металлургия, металлообработка и энергетика. Вторая область объединяет все многообразие относительно новых плазмохимических технологий, используемых в химической и других отраслях промышленности. К плазмохимическим технологиям относятся процессы получения ацетилена, этилена, синтез-газа и т.д. из природного газа, угля и другого органического сырья, синтез тонких пленок для микроэлектроники и особо чистых ультрадисперсных порошков Si, Al₂O₃, SiC, Si₃N₄, Ti N и др. Технологии плазмохимической переработки и обезвреживания токсичных промышленных и бытовых отходов играют особую роль и являются сегодня перспективными при решении известных проблем экологии. В данной главе рассмотрены физические основы плазменных технологий, имеющих наибольшее применение в действующем производстве. В этих технологических процессах используется как термически равновесная (электродуговая), так и неравновесная (холодная) плазма.

1. Плазменные технологические процессы в металлообработке и машиностроении

В технологических процессах металлообработки используются как высокотемпературные потоки электродуговой плазмы, т.е. термические плазменные струи, так и плазмотроны с вынесенной дугой. Во втором случае в качестве анода обычно служит поверхность обрабатываемой детали. При этом на поверхность детали действует не только поток плазмы, генерируемой в канале ЭДП, но и совокупность электрофизических процессов, протекающих в анодном пятне. В процессах плазменной очистки, упрочнения и модификации поверхностей используют в основном потоки неравновесной плазмы тлеющего или ВЧ разрядов.

Общим для всех плазменных технологий металлообработки является то, что материалы подвергаются комплексному воздействию разных по физической природе потоков энергии. Во всех случаях на обрабатываемую поверхность детали воздействует энергия электрически заряженных компонентов плазмы, тепловая энергия и газодинамический напор плазменной струи, а также

интенсивное излучение плазмы в широком диапазоне длин волн. Кроме того, поверхность обрабатываемой детали пронизывают силовые линии электрического и магнитного полей, на ней происходят различные химические реакции, образуются новые соединения и тонкие пленки.

Локальное воздействие концентрированных потоков всех этих видов энергии приводит к появлению на поверхности материала малых возмущений, которые сопровождаются процессами локального термического нагрева, плавления, выдувания расплава из зоны нагрева и испарения. В кристаллической решетке металла возникают точечные и линейные дефекты в виде внедрения атомов плазмообразующего газа и молекул новых химических соединений, различных вакансий, линейных дислокаций и т.д. Величина энергетического воздействия на поверхность и вклад отдельного вида энергии находятся в сильной зависимости от мощности разряда и типа плазмотрона, рода и расхода плазмообразующего газа.

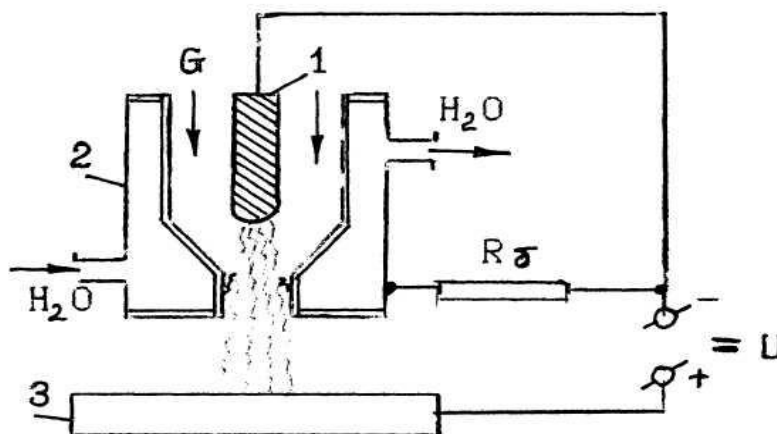


Рис. 8.1. Схема плазменного нагрева детали с помощью ЭДП: 1-катод ЭДП; 2- сопло, анод; 3- деталь; R- балластное сопротивление; G- поток газа.

2. Применение электродуговых плазмотронов в процессах резки и сварки металлов

Современные ЭДП являются чрезвычайно гибкими устройствами, они позволяют плавно регулировать параметры плазменной струи в широком диапазоне и вкладом того или иного вида энергии в процесс обработки материала. Наиболее широко освоенной областью применения термической плазменной технологии можно считать резку и сварку металлов.

Плазменная резка используется для раскроя листового проката черных и цветных металлов, нержавеющей и низкоуглеродистой стали с максимальной толщиной разрезаемого материала до 70 мм. На предприятиях используются серийно выпускаемые промышленностью плазменные установки (плазменные резаки) типа УПР-201, АПР-401, АПР-402 и 403, УВПР - "Киев", "Кристалл" и др. Применение технологии плазменной резки позволило увеличить скорость разрезания листового проката в 3 раза, улучшить раскрой листов и снизить расход материала. Это достигается за счет снижения ширины реза, отсутствия облоя и грата (макроскопические неровности и дефекты вблизи линии реза), уменьшения припусков под механическую обработку по сравнению с традиционными технологиями резки. Например, установки для плазменной резки типа "Кристалл" с программным управлением позволяют кроить листовую прокат из низкоуглеродистой стали толщиной до 30 мм и шириной 2,5 м по заданным светокопиром сложным кривым со скоростью резки до 4 м/мин. В качестве плазмообразующего газа используют воздух или кислород. Такие установки широко применяются на судостроительных предприятиях для раскроя деталей корпусов судов.

Участки плазменной резки являются одним из центральных участков технологического процесса также на предприятиях по изготовлению труб большого диаметра для магистральных нефте- и газопроводов [108].

Ученые постоянно совершенствуют конструкции ЭДП для резки и сварки металла. В работе [111] описан электродуговой плазмотрон для резки металла с диаметром сопла-анода от 0,1 до 0,3 мм, который позволяет получать плазменную струю с высокой плотностью энергии до 10 кВт/мм². Разработки и создание ЭДП с сильно сжатой струей плазмы и высокими значениями плотности энергии и длительным ресурсом непрерывной работы позволят еще более увеличить скорость резки и улучшить другие технологические параметры процессов плазменной технологии.

Существующие плазменные технологии сварки позволяют сваривать листы толщиной от 0,5 до 20 мм с высокой эффективностью и качеством. Для *плазменной сварки* применяются установки типа УПС-301, УПС-501, УПС-804 и др. Создание сварочных установок типа УПС дало возможность сваривать толстые детали за один проход. Отдельно следует выделить технологические процессы *микроплазменной сварки*. Микроплазменная сварка резко повысила производительность процесса при сваривании ответственных деталей малых толщин от десятка микрон до 1 мм. Ее применяют при изготовлении тонкостенных трубопроводов из алюминиевых сплавов толщиной 0,6—1,5 мм, при сварке деталей из нержавеющей стали толщиной 0,12—0,24 мм для вакуумной техники и т.д. Плазменная резка и сварка металлов используются также в космическом аппаратостроении. Некоторые результаты применения плазменной резки и сварки в условиях космоса приведены в книге [112]. Обзор технологических

процессов плазменно-дуговой резки в различных средах, в том числе и под водой, применяемых в производстве за рубежом, приведен в работе [113].

Начало разработок и интенсивного развития плазменных технологий резки и сварки металлов связано с созданием первых конструкций плазмотронов промышленного типа в середине 60-х годов. К настоящему времени решены многие технические и технологические проблемы. Однако использование современных конструкционных материалов с более высокой прочностью и вязкостью в машиностроении требует создания более совершенных плазменных технологий их обработки [109, 114, 115 и др]. Кроме того, промышленность регулярно выдвигает все новые проблемы, связанные с резкой и сваркой крупногабаритных изделий из особо прочных материалов для объектов самых различных производств. Над решением этих актуальных задач работают многочисленные коллективы известных научных лабораторий и институтов как в нашей стране, так и за рубежом: Институт электросварки им. Е.О.Патона (Украина), ВНИИЭСО, Институт металлургии им. А.А. Байкова РАН, кафедры технологии металлов и лаборатории сварки ведущих вузов России.

3. Плазменно-механическая обработка металлов

Плазменно-механическая обработка металлов (ПМО) является комбинированным способом обработки современных материалов с повышенными эксплуатационными свойствами. В этом способе энергия низкотемпературной плазмы используется совместно с механической энергией режущего инструмента. Различают следующие основные направления ПМО металлов.

1. Поверхность изделия вблизи области реза нагревается плазмой до высоких температур, близких к температуре плавления металла, затем металл в сильно пластичном состоянии удаляется резцом.

2. Плазма лишь прогревает поверхность, не доводя ее до плавления. Такая технология была разработана ВНИИЭСО совместно с ЛПИ [116]. Это направление технологии ПМО металлов отличается мягким воздействием концентрированного

потока энергии в области реза. В результате создается неравномерность поля напряжения на поверхности. Из-за перехода в пластичное состояние снижается величина работы деформирования поверхностного слоя металла, что влечет за собой снижение прочности поверхности обрабатываемого изделия и изменение параметров трения на поверхностях контакта изделия и режущего инструмента (резца или фрезы). Высокоскоростной прогрев поверхности обрабатываемого изделия при ПМО позволяет более чем в 2 раза увеличить сечение среза, что в обычных условиях достичь невозможно. Это является одной из причин повышения производительности труда и стойкости инструмента при ПМО по сравнению с традиционной технологией токарной обработки металлов.

Технология ПМО без расплавления поверхности изделия применяется в тех случаях, когда крайне нежелательны глубокие деформации поверхности изделия, наблюдаемые при интенсивном термическом нагреве.

Плазменные технологии стали незаменимыми при обработке изделий из труднообрабатываемых материалов, в частности литейных заготовок из нержавеющей стали или чугуна большого диаметра (около 2 м).

В современных технологиях ПМО используют преимущественно плазмотроны с вынесенной дугой как наиболее эффективные для этих процессов. Большую роль здесь играют физические свойства плазмообразующего газа. Как показали опыты, наиболее высокая эффективность прогрева поверхности материала достигается при использовании плазмы химически активных газов, в частности воздуха. Обусловлено это появлением экзотермических реакций в приграничной зоне: плазма — поверхность детали. Однако при обработке изделий из жаропрочных сплавов с высокой концентрацией окисляющихся элементов кислород следует исключить и целесообразно использовать плазму аргона или ее смеси с азотом. Более подробная информация о технологиях ПМО металлов изложена в работе [107].

Основы технологий плазменного напыления и плазменного формообразования

Проблемы увеличения износостойкости вновь изготавливаемых деталей или восстановленных изношенных рабочих поверхностей деталей и узлов механизмов и оборудования остаются актуальными до настоящего времени. Дело в том, что часто из-за износа эксплуатационники вынуждены производить замену дорогостоящих

отдельных деталей и узлов машин и механизмов новыми до выработки полного ресурса механизма в целом.

Современной технологией *упрочнения поверхностей новых и восстановления поверхностей изношенных деталей и узлов является технология плазменного напыления*. Сущность технологии плазменного напыления заключается в следующем: в поток плазмы вносят напыляемый материал в виде порошка или прутка, этот материал прогревается и оплавляется в высокотемпературной зоне, ускоряется потоком плазмы и наносится на поверхность изделия. Прочность сцепления покрытия с основой довольно высокая и находится в пределах 40—60 МПа. Низкая пористость покрытия, менее 12%, является также преимуществом плазменного напыления. В ряде случаев на изделия можно наносить покрытия из материалов, обладающих лучшими эксплуатационными свойствами и характеристиками, чем основа изделия. Так, например, при правильном подборе порошковых материалов можно повысить износостойкость поверхности восстановленной детали в 1,5—2 раза по сравнению с новой.

Процессы сцепления и образования прочных связей покрытия с подложкой сильно зависят от времени пребывания частиц напыляемого порошка в высокотемпературной зоне плазменной струи. Это время должно быть оптимальным, т.е. достаточным для активации атомов и выбирается оно опытным путем. Определенную роль играют давление и температура в зоне контакта, а также длительность самого процесса напыления.

Истинная природа сил связи между покрытием и подложкой и роль каждой из этих сил до конца не определены. По мнению ряда исследователей, наибольшую роль играют силы механического сцепления пленки из напыляемых частиц с микронеровностями подложки. Велика роль процессов сплавления в тонком, приповерхностном слое, а также сил межатомного (химического) взаимодействия частиц в зоне контакта [117, 118 и др].

Многочисленные опыты показали, что качество плазменного напыления в сильной степени зависит от качества предварительной подготовки поверхности и напыляемого материала. Напыляемый порошок необходимо просушить, чтобы избежать комкообразования. С поверхности детали надо удалить поврежденный участок и подвергнуть ее пескоструйной обработке. При этом на поверхности появляются микронеровности, способствующие лучшему сцеплению подложки с покрытием. Далее монтируют защитную оснастку и производят напыление избранного материала на заданный участок

поверхности детали. После получения покрытия необходимой толщины оснастку демонтируют и производят механическую, финишную, обработку детали до чертежных размеров. Необходимая толщина покрытия восстанавливаемой детали обычно не превышает 1—2 мм.

В настоящее время термические технологии плазменного напыления применяются при упрочнении, восстановлении и ремонте крупногабаритных деталей и узлов авиационных двигателей, авто- и сельхозтехники, силовых установок судов, оборудования нефтедобычи и т.д. Примерами таких деталей являются детали газотурбинных двигателей, коленчатые валы и распредвалы автомобилей, детали нефтяных насосов и компрессоров, запорная арматура и др.

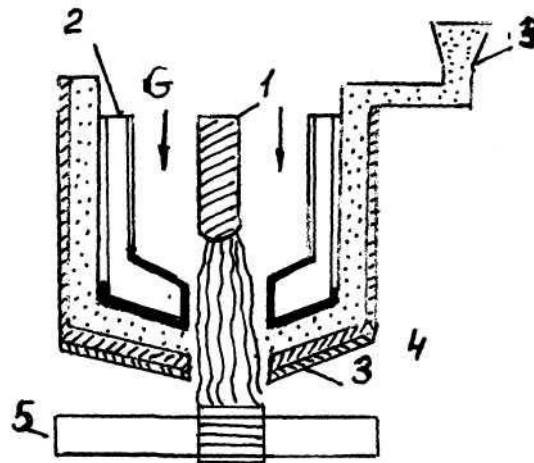


Рис. 8.2. Схема установки для плазменного напыления: 1- катод ЭДП; 2- сопло, анод ЭДП; 3- наружное сопло; 4 – питатель порошка; 5- деталь; G – поток плазмообразующего газа поверхностью вставки.

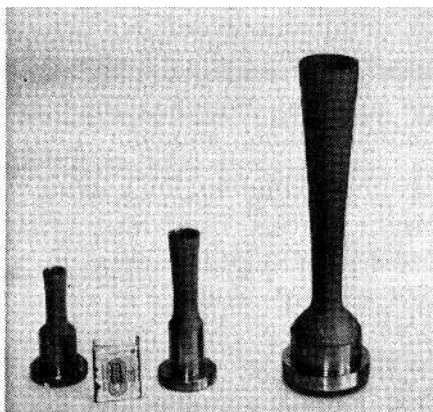


Рис. 8.3. Сопла насосов, изготовленных методом плазменного формообразования.

Дополнительно к этому, материал вставки выбирают с большим, чем у изделия, значением коэффициента теплового расширения, поэтому после небольшого охлаждения шаблон испытывает большее сжатие, чем деталь, и без особого труда удаляется из внутренней области изготовленной детали. В заключение остаются операции механической обработки торцов и посадочного места. Внутренняя область изделия, обычно, дополнительной обработки не требует.

Технология плазменного формообразования является высокопроизводительной и относится к наукоемким. Для серийного изготовления сопел парожеткторных насосов типа **НВЗ** такая технология была разработана сотрудниками ВНИИТ на-сосмаш (Казань) и внедрена на участках плазменной технологии на Казанском механическом заводе ПО "Вакууммаш", а также на НПО "Завод СК им. СМ. Кирова" (Казань) [120]. Участки плазменного формообразования созданы на основе серийной установки плазменного напыления типа "Киев-7" и серийного полуавтомата типа 15В-Б.

В качестве напыляемого материала для изготовления указанных деталей используются порошки из нержавеющей стали и железа. На рис. 8.3 приведены фотографии сопел парожетторных насосов, изготовленных методом плазменного формообразования.

О плазменных технологиях модификации поверхностных свойств материалов

Модификация поверхностных свойств происходит при "мягком" воздействии потока низкотемпературной плазмы на материалы. При этом изменяются механические свойства поверхности, а также ее физические и химические свойства. Например, улучшаются микротвердость и пластичность, изменяются электро- и теплопроводность. Образование в тонком поверхностном слое новых химических соединений иногда ведет к повышению химической стойкости поверхности и детали в целом в агрессивных средах.

В плазменной технологии *азотирования* при обработке поверхности металлов используют потоки азотной плазмы тлеющего или ВЧ разрядов. Это приводит к насыщению поверхностных слоев азотными соединениями. В результате повышается микротвердость и химическая стойкость поверхности. Плазменная технология азотирования применяется в машиностроении для упрочнения режущего инструмента и других деталей.

Если в качестве плазмообразующего газа взять природный газ или иные углеводороды, то на поверхности обрабатываемой детали образуются соединения металла с углеводородом, поверхность насыщается углеродом. Такой процесс плазменной обработки поверхности называется ***цементацией***. Обработка поверхности изделий потоком плазмы из смеси углеводородов и азота приводит к образованию на поверхности циановых соединений, или ***цианированию***.

Следует отметить технологические процессы обработки поверхности стекол в потоке неравновесной плазмы заданного химического состава. Как показали опыты, обработка потоком «холодной» плазмы позволяет уменьшить шероховатость и плотность микродефектов, увеличить микротвердость и прочность, а также химическую стойкость поверхности стекол. В работе [108, с.41—44] показано, что обработка оптических элементов высокочастотной

плазмой аргона привела к уменьшению светорассеяния в 2 раза, а также улучшила ряд оптических свойств стекол. Эти технологические процессы применяются на оптико-механических предприятиях.