

Г. И. Лащенко

**ПЛАЗМЕННОЕ
УПРОЧНЕНИЕ
И НАПЫЛЕНИЕ**

СВАРКА И РОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

**Киев
Экотехнология
2003**



ПЛАЗМЕННОЕ

ТОПАС

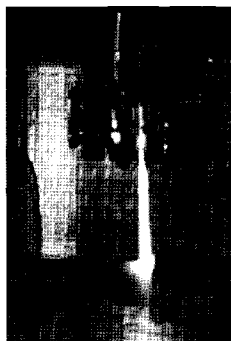
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ



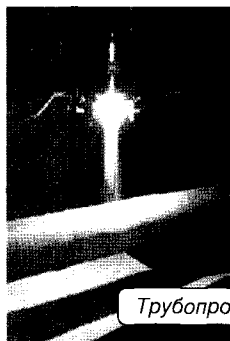
ОБОРУДОВАНИЕ

Напыление защитных покрытий

Защита
от износа

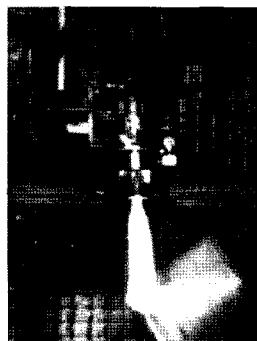


Защита
от коррозии



Трубопровод

Снижение
коэффициента трения



Поверхностное
упрочнение

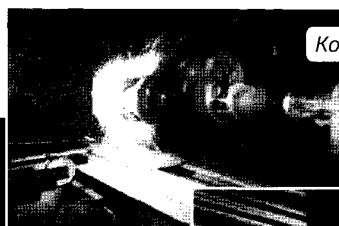


Колесная пара



Лемех

Восстановление
изношенных деталей



Коленвал

Гильза цилиндра



ПРОМЫШЛЕННЫЕ УСЛУГИ:

- Организация участков и цехов (совместно с УкрИСП)
- Изготовление, поставка и ввод в эксплуатацию плазменного и вспомогательного оборудования
- Обучение обслуживающего персонала

Тел./факс: (044) 484 71 34, (044) 472 37 35

E-mail: plasma@topas.relc.com

Г. И. Лащенко

**ПЛАЗМЕННОЕ УПРОЧНЕНИЕ
И НАПЫЛЕНИЕ**

**Київ
«Екотехнологія»
2003**

ББК 34.55
Л 32
УДК 621.793.74

Лашенко Г. И.

Л 32 Плазменное упрочнение и напыление. — К.: «Екотехнологія», 2003. — 64 с.

Обобщены последние достижения в области плазменного упрочнения и напыления поверхностей деталей. Рассмотрены особенности технологии плазменного упрочнения и напыления, а также режимы обработки. Приведены характеристики оборудования для плазменного упрочнения и напыления.

Рассчитана на инженерно-технических работников промышленных предприятий, проектных организаций, студентов вузов.

Узагальнені останні досягнення в області плазмового зміцнення та наплення поверхонь деталей. Розглянуті особливості технології плазмового зміцнення та наплення і режими обробки. Наведені технічні характеристики обладнання для плазмового зміцнення та наплення.

Розрахована на інженерно-технічних працівників промислових підприємств, проектних інститутів, студентів вузів.

ББК 34.55

ISBN 966-95918-8-0

© Лашенко Г. И., 2003

© Оформлення. «Екотехнологія», 2003

Предисловие

Поверхностная обработка деталей с использованием нагрева концентрированными потоками энергии (электронный луч, лазерное излучение, плазменная дуга) является существенным резервом экономии материальных, трудовых и энергетических затрат.

Академик Б. Е. Патон отметил: «По плотности энергии плазменный источник находится в промежуточном, но наиболее выгодном положении между электродуговыми и лучевыми (электронно-лучевыми и лазерными) источниками теплоты. Он позволяет получить более высокую температуру и плотность теплового потока на обрабатываемом изделии в сравнении с дуговыми источниками, хотя и уступает лучевым по концентрации энергии, но значительно дешевле и доступнее их по техническому воплощению».

Опыт показывает, что плазменный источник поверхностного нагрева можно во многих случаях применять наряду с такими источниками, как лазерный и электронно-лучевой, обеспечивая высокие технико-экономические показатели процесса.

Путем регулирования температурно-скоростных режимов плазменного поверхностного нагрева и охлаждения, а также применения различных плазмообразующих газов можно изменять структурно-фазовое состояние поверхности, создавая оптимальный набор микроструктур, обеспечивающих высокие механические свойства. Особый интерес представляет плазменное напыление, благодаря которому можно достичь достаточно высокую прочность сцепления, приемлемую пористость покрытия и высокие эксплуатационные свойства.

В последние годы созданы технология и оборудование плазменного напыления с использованием в качестве плазмообразующего газа смеси воздуха с горючим углеводородным газом (метаном, пропан-бутаном). Эта технология экономически более выгодна, особенно с повышением мощности и производительности плазменных установок, и позволяет решить ряд проблем улучшения качества покрытий. Создан ряд полуавтоматов и автоматизированных установок для плазменного упрочнения и напыления деталей типа тел вращения и плоских изделий в машиностроении и ремонтном производстве.

В брошюре приведены особенности плазменного поверхностного упрочнения и напыления. Изложены рекомендации по выбору режимов упрочнения и напыления с учетом предварительной подготовки поверхностей деталей. Обобщен опыт разработки и эксплуатации специализированного оборудования для плазменного упрочнения и напыления, включая установки для подготовки поверхности деталей под плазменную обработку, полуавтоматы для плазменного упрочнения и напыления.

Глава 1.

Плазменное поверхностное упрочнение деталей

Технологические процессы, в которых материал подвергают воздействию концентрированных потоков энергии в виде электронного луча, лазера, плазмы (сварка, наплавка, резка, упрочнение, напыление), в настоящее время достаточно распространены в промышленности [1, 2, 3, 4, 5].

К достоинствам обработки электронным лучом в вакууме следует отнести высокие значения эффективного КПД нагрева ($\eta_3=0,85$) при общем КПД технологических электронно-лучевых установок 50%, возможность передачи потоков энергии мощностью более 40–100 кВт, отсутствие окисления нагреваемой поверхности, высокую производительность процесса и др. [4]. В то же время большие капитальные затраты на приобретение и монтаж оборудования, затраты, связанные с его эксплуатацией и обслуживанием, ограничивают применение электронно-лучевой обработки деталей крупносерийным и массовым производством в машиностроении и инструментальной промышленности [4, 5].

Лазерная обработка интенсивно развивается, но основное распространение получили лазеры мощностью до 5 кВт. Лазеры бóльшей мощности являются дорогостоящим оборудованием, эксплуатация которого экономически целесообразна при его загрузке на 80–90%. Кроме того, КПД преобразования энергии накачки в лазерное излучение в лазерных установках обычно не превышает 5%. Правда, в последнее время разработаны компактные диодные лазеры, КПД преобразования энергии в которых достигает 50% [6]. Лазеры этого типа с выходной мощностью 3–5 кВт в настоящее время уже предлагают на рынке. Однако главный их недостаток — высокая стоимость, которая приблизительно составляет от 150 до 200 долл. США на один ватт диодной мощности.

Лазерное излучение обеспечивает наиболее высокую концентрацию нагрева (плотность мощности) 10^8 – 10^9 Вт/см² [3], но не для всех технологических процессов это преимущество может быть реализовано. Так, при упрочнении без оплавления существует критическая плотность мощности $E_{кр}$, выше которой происходит оплавление поверхности [3]. Для различных сталей значение $E_{кр}$ находится в интервале $(2–6) \cdot 10^4$ Вт/см², т. е. используется диапазон плотности мощности, характерный для плазменной обработки.

Плазменные источники обеспечивают плотность мощности 10^4 – 10^5 Вт/см², т. е. меньше, чем электронный и лазерный луч, но их единичная мощность может достигать 160 кВт и более, а эффективный КПД нагрева — 0,72. Плазменное оборудование по стоимости и сложности изготовления вполне сопоставимо с электродуговым. Его широко применяют для резки, наплавки, напыления, сварки и более ограниченно для упрочнения.

Способы плазменного упрочнения

Следует выделить два направления использования плазменного нагрева. Первое связано с использованием нагрева, осуществляемого плазмой тлеющего разряда в вакуумной камере при давлении остаточного воздуха 1,33–13,3 Па [7, 8]. Этот процесс получил распространение для химико-термической обработки инструмента и других малогабаритных деталей. К недостаткам способа следует отнести наличие вакуумной камеры и ограничение обрабатываемых деталей ее размерами. Кроме того, плотность мощности, передаваемая обрабатываемой детали, небольшая.

К этому же направлению следует отнести и технологию электролитно-плазменного упрочнения [9]. Электролитный нагреватель, включенный в электрическую цепь в качестве анода, подводят к изделию, которое является катодом. Замыкание электрической цепи между анодом-электронагревателем и поверхностью изделия происходит через электролит (водный раствор соли). Преобразование электрической энергии в тепловую идет преимущественно в приграничном к изделию слое. В результате нагрева этот слой переходит в парогазовое состояние, в нем под воздействием приложенного напряжения возбуждаются микродуги. Плотность мощности достигает $2,4 \cdot 10^3$ Вт/см². Так как в качестве электролита используют водный раствор соли, то этим же электролитом можно производить охлаждение и закалку нагретых участков поверхности.

Для повышения производительности обработку выполняют несколькими электролитными нагревателями. Технология позволяет в широких пределах изменять скорость нагрева и охлаждения (50–400 °С) и толщину закаленного слоя (1–10 мм). Твердость сталей после закалки составляет: 35ХГСА — 50–55 HRC₃; 40X — 55–60 HRC₃; 65Г — 60–68 HRC₃. После упрочнения переходников буровых штанг данным способом их работоспособность повысили в 2–3 раза.

Второе направление применения плазменного нагрева базируется на использовании сжатой дуги прямого или косвенного действия, генерируемой специальным плазмотроном [10]. Под воздействием стенок канала сопла и струи плазмообразующего газа столб дуги сжимается,

его поперечное сечение уменьшается, а температура в центральной части столба дуги повышается до 10 000–50 000 К. В результате внутренний слой, соприкасающийся со столбом дуги, превращается в плазму, а наружный слой, омывающий стенки канала сопла, остается сравнительно холодным, образуя электрическую и тепловую изоляцию между потоком плазмы и каналом сопла. Этот охлажденный слой газа препятствует отклонению столба дуги от заданного направления и замыканию его на стенку канала сопла. Напряжение сжатой дуги составляет 60–200 В, что в три-десять раз больше, чем в свободной дуге. Плотность тока сжатой дуги достигает 100 А/мм², т. е. на порядок выше, чем у свободной, а удельная мощность достигает 2·10⁶ Вт/см².

Упрочнение сталей с нагревом концентрированными потоками энергии (КПЭ) по аналогии с другими видами закалки заключается в формировании на этапе нагрева аустенитной структуры и ее последующем превращении в мартенсит на этапе охлаждения. При этом подводимая тепловая энергия больше энергии, необходимой для перестройки кристаллической решетки, а сама перестройка происходит с некоторой конечной скоростью. Поэтому превращение осуществляется в интервале температур от $A_{c1}^{нач}$ до $A_{c1}^{кон}$, т. е. окончание аустенитного превращения смещается в область высоких температур T (рис. 1, область 1) [2].

Вследствие высокой скорости нагрева диффузионные процессы перестройки решетки объемно-центрированного куба избыточного феррита в решетку гранецентрированного куба аустенита могут не заканчиваться на линии GS диаграммы Fe–Fe₃C и сдвигаться в область более высоких температур (область 2). Также может происходить микроплавление границы цементита с аустенитом (область 3).

При обработке сварочной дугой скорость нагрева достигает 1000–3000 °C/с. При таких скоростях нагрева смещение всех стадий аустенизации в сталях в область более высоких температур может достигать 100–300 °C. В результате нагрева КПЭ формируется структура, особенности которой обусловлены

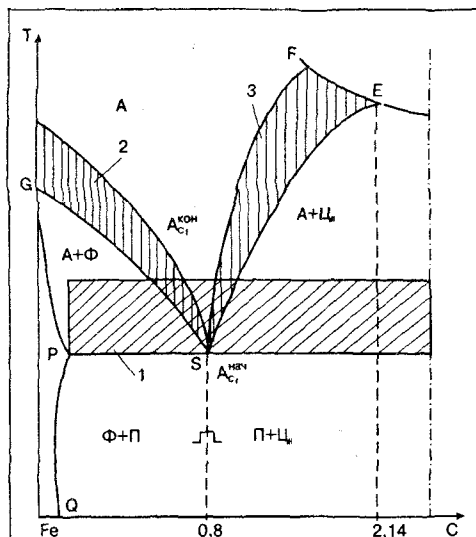


Рис. 1. Участок диаграммы Fe–Fe₃C с особенностями структурных превращений при высокоскоростном нагреве

степенью завершенности процесса аустенизации, определяемой скоростью и температурой нагрева, временем воздействия, исходной структурой и др. При достаточно высокой температуре нагрева или при относительно большом времени воздействия возможно формирование однородного аустенита. Уменьшение температуры нагрева и времени воздействия в результате повышения критических точек и замедления процесса гомогенизации приводит к большой неоднородности аустенита в стали, особенно по углероду. Кроме аустенита, в этих условиях при высокой температуре возможно существование нерастворившихся карбидов.

Степень неоднородности структуры, образовавшейся в результате нагрева КПЭ, зависит от дисперсности исходной структуры. Причем чем дисперснее исходная структура, тем меньше неоднородность аустенита.

Процесс обработки КПЭ с целью термоупрочнения характеризуется высокими скоростями охлаждения, которые приводят к закалке поверхностных участков. Для получения мартенсита в сплавах железо—углерод в интервале температур минимальной устойчивости аустенита (400–600 °С) необходимо обеспечить скорость охлаждения больше критической, которая для большинства сплавов железа находится в интервале 50–200 °С/с. Охлаждение при нагреве КПЭ характеризуется значительно большими скоростями. Так, скорость охлаждения при плазменном упрочнении изменяется в пределах от 10^4 до 10^6 °С/с [1]. Плазменное упрочнение осуществляют без оплавления и с оплавлением поверхности детали.

Установлены энергетические пороги, определяющие режимы упрочнения (рис. 2) [12]. Энергетический порог W_1 соответствует нагреву металла до температуры начала аустенитного превращения. Дальнейшее увеличение плотности мощности приводит к возрастанию твердости обрабатываемой стали, которая достигает наибольшей величины при нагреве без оплавления при втором значении энергетического порога W_2 . Затем увеличение плотности мощности приводит к незначительному повышению твердости, а третий порог W_3 соответствует началу оплавления поверхности.

Плазменное упрочнение без оплавления поверхности наиболее распространено, так как позволяет

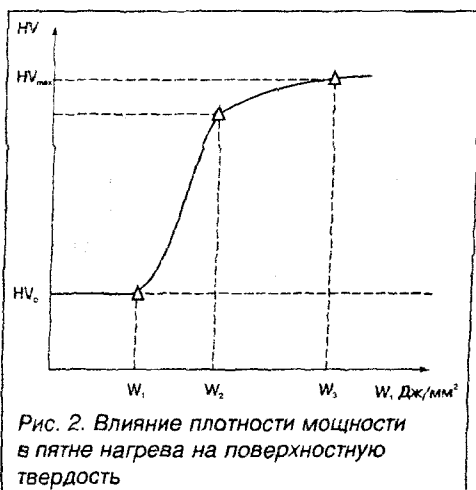


Рис. 2. Влияние плотности мощности в пятне нагрева на поверхностную твердость

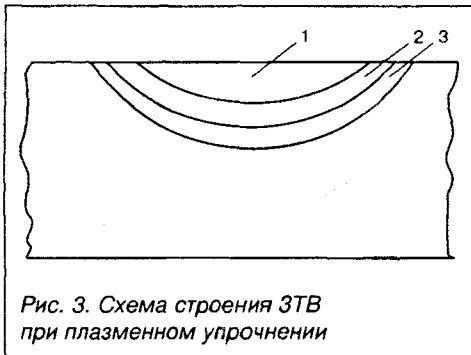


Рис. 3. Схема строения ЗТВ при плазменном упрочнении

в широких пределах регулировать твердость, размеры и эксплуатационные характеристики обрабатываемой зоны при сохранении высокого качества поверхности. Упрочнение с оплавлением поверхности обычно используют для достижения особых эксплуатационных свойств.

При плазменном термоупрочнении отдельные слои обрабатываемого участка прогреваются по глубине до различных температур,

вследствие чего зона термического воздействия (ЗТВ) имеет слоистое строение. В зависимости от микроструктуры и микротвердости в сталях по глубине ЗТВ различают три слоя (рис. 3).

Зона оплавления 1 (первый слой) имеет место при закалке с оплавлением. Как правило, зона оплавления имеет столбчатое строение с кристаллами, вытянутыми в направлении теплоотвода. Основная структурная составляющая — мартенсит, карбиды обычно растворяются. При оптимальных режимах закалки с расплавлением обезуглероживание не происходит, нет пор и шлаковых включений. При плазменной закалке без оплавления первый слой отсутствует.

Второй слой — зона закалки 2 из твердой фазы. Его нижняя граница определяется температурой нагрева до A_{c1} . В этом случае наряду с полной закалкой происходит и неполная. По глубине данный слой характеризуется структурной неоднородностью. Ближе к поверхности имеются мартенсит и остаточный аустенит, полученные при охлаждении из гомогенного аустенита. Ближе к исходному металлу наряду с мартенситом имеются элементы исходной структуры: феррит в доэвтектоидной стали и цементит в заэвтектоидной.

В переходной зоне 3 (третий слой) металл нагревается ниже точки A_{c1} . Если сталь имеет исходное состояние после закалки или отпуска, то в результате плазменной обработки в этом слое образуются структуры отпуска — троостит или сорбит, характеризующиеся пониженной твердостью.

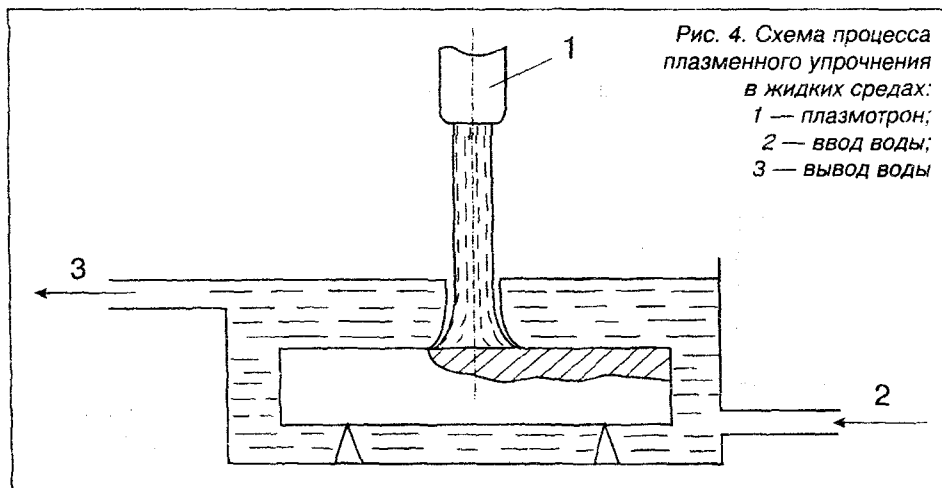
Зона термического влияния плазменной струи (дуги) имеет форму сегмента, по своему строению она аналогична ЗТВ электронного и лазерного лучей.

Плазменное упрочнение доэвтектоидных сталей 30ХГСА, 45Х, 50ХН и 65ХЗМФ в зоне закалки формирует мартенсит с твердостью 7500–8800 МПа [1]. В переходной зоне по глубине увеличивается неоднородность структуры в такой последовательности: мартенсито-

троостит, мартенсит и трооститная сетка, которая переходит в трооститоферритную неоднородность, а на границе с исходной — в ферритную.

В зоне закалки из твердой фазы эвтектоидных и заэвтектоидных сталей М76, 9ХФ, 150ХНМ и др. следует выделить верхнюю область, расположенную ближе к обрабатываемой поверхности, характеризующую растворенными карбидами, и нижнюю, характеризующую нерастворенными карбидами. В верхней области твердый раствор насыщен углеродом, что способствует образованию повышенного количества остаточного аустенита. В нижней области остаточного аустенита значительно меньше, вследствие чего достигается максимальная твердость 10 000–11 000 МПа.

При плазменном нагреве не всегда удается избежать накопления теплоты в обрабатываемом изделии. С целью устранения накопления теплоты в изделии используют плазменное упрочнение в жидких средах [12]. Обрабатываемое изделие погружают в жидкость таким образом, чтобы над его поверхностью была жидкая прослойка определенной толщины (рис. 4). Последняя зависит от параметров плазменной струи и свойств жидкости. Благодаря газодинамическому напору плазменной струи в жидкой прослойке создается воронка, через которую происходит термическое воздействие плазмы на обрабатываемую поверхность. Обработку осуществляют в полузамкнутом объеме, ограниченном со всех сторон жидкостью. При движении плазменной струи относительно детали нагретая до температуры структурных превращений поверхность сразу закрывается жидкостью, которая охлаждает ее. Если использовать не воду, а активные жидкие среды типа растворов



различных солей, на поверхность можно дополнительно химически воздействовать.

Установлено, что коэффициент сосредоточенности и максимальный тепловой поток в центре пятна нагрева при обработке в воде возрастают примерно на 20% [12]. Площадь пятна нагрева уменьшается на такую же величину по сравнению с плазменной закалкой на воздухе. При плазменном упрочнении в жидкой среде скорость охлаждения повышается в пять-шесть раз, вследствие чего максимальная твердость сталей возрастает до 20% по сравнению с упрочнением на воздухе.

Преимуществом рассматриваемого способа является практически полное отсутствие деформаций обрабатываемого изделия. Выше отмечалось, что повышение скорости нагрева сокращает температурно-временный интервал роста зерна и гомогенизации аустенита. Однако в ряде случаев этого недостаточно для эффективного управления формированием структуры, так как при плазменном упрочнении одновременно со скоростями нагрева увеличиваются и скорости охлаждения. Это тормозит распад аустенита, смещая его в мартенситную область. Решить поставленную задачу позволяет сочетание высоких скоростей нагрева и термоциклирования [13, 15].

С увеличением числа циклов мартенситная структура упрочненного слоя характеризуется более высокой степенью дисперсности по сравнению с дисперсностью при обычной закалке, что способствует повышению трещиностойкости упрочненных слоев [13].

При плазменном нагреве могут быть реализованы не только закалка, но и способы скоростной химико-термической обработки с насыщением поверхности углеродом (цементация), азотом (азотирование), цианированием (углеродом и азотом) и др. [7, 11].

Все способы химико-термической обработки можно разделить на две группы, приняв за основную характеристику состояние вещества, содержащего диффундирующий (насыщающий) элемент. Источниками диффундирующего элемента могут быть вещества, находящиеся в твердом, жидком, парообразном и плазменном состояниях.

Первая группа способов — диффузионное насыщение металлов из твердой, жидкой или паровой сред. При этом диффузионному проникновению предшествует установление физического контакта между насыщаемой поверхностью и источником диффундирующего элемента. Сюда относятся традиционные способы химико-термической обработки стальных деталей:

- цементация, которую производят в твердом и газовом карбюризаторах при температуре 800–950 °С с выдержкой в течение нескольких часов;

- цианирование, заключающееся в одновременном насыщении поверхности изделий углеродом и азотом при температуре 540–960 °С с выдержкой в течение нескольких часов. Широкое распространение получило жидкостное и газовое цианирование;
- азотирование, которое осуществляют при температуре 500–700 °С с использованием жидкого аммиака.

Вторая группа — диффузионное насыщение металлов из активных жидких и паровых газовых сред. При этом сначала происходит физико-химическое превращение в исходной среде. Активизация осуществляется в результате химических реакций в жидких или газовых средах, а также на насыщаемой поверхности металлов. В большинстве случаев исходную газовую или жидкую среду активизируют ионизацией с помощью электрических разрядов или электролиза. К этой группе способов относят ионную цементацию, ионное азотирование, электроискровое поверхностное легирование, плазменное упрочнение с использованием активных жидких сред, плазмообразующих газов и др.

В отличие от ионных процессов, реализуемых с помощью тлеющего разряда при пониженном давлении газа, плазменную химико-термическую обработку осуществляют при атмосферном давлении с использованием более простой аппаратуры. Процесс цементации стали состоит из трех накладывающихся друг на друга стадий. Первая — это образование в цементирующем газе активных атомов углерода, насыщающих сталь. Высокая температура плазменной дуги способствует быстрому протеканию этой стадии. Вторая — поглощение активных атомов углерода поверхностью стали. Для этого сталь должна находиться в аустенитной стадии, чтобы атомарный углерод мог внедряться в ее кристаллическую решетку. Если поглощение идет эффективно и продолжительное время, то на поверхности после достижения предельной растворимости углерода в аустените может образоваться цементит. При плазменном нагреве из-за его непродолжительного времени образование цементита маловероятно. Третья стадия — диффузия атомов углерода внутри стали, которая происходит в результате разного содержания углерода по глубине изделия, снижающегося по мере удаления от поверхности.

Цементации главным образом подвергают стали с низким содержанием углерода (0,1–0,25%). Цементация всегда сопровождается закалкой и низким отпуском. После этого поверхность стальных деталей приобретает высокую твердость и износостойкость, сердцевина же остается вязкой вследствие низкого содержания в ней углерода.

При плазменном нагреве процесс цементации и закалки совмещен во времени. В качестве плазмообразующих газов в этом случае

применяют углекислый газ или углеводородные газы (метан, пропан) и их смеси с воздухом.

В результате использования углекислотной плазмы для цементации и закалки удается достигнуть твердости 650–720 HV — для стали 45, 720–800 HV — для стали 65Г и 200–220 HV — для Ст3 [14]. При этом на поверхности стальных деталей образуются напряжения сжатия, увеличивающие предел выносливости и долговечности деталей.

Азотирование применяют для создания очень твердого, износостойкого и хорошо сопротивляющегося коррозии тонкого слоя. Простая углеродистая сталь малоприспособна для азотирования: ее поверхность получается недостаточно твердой и вместе с тем хрупкой. Для азотирования чаще применяют легированную сталь, содержащую 0,30–0,40% С; 1,35–1,65% Cr; 0,2–0,3% Mo; 0,7–1,2% Al.

Хорошие результаты дает азотирование нержавеющей и жаропрочных сталей. В легированных сталях при азотировании образуются нитриды алюминия, титана, ванадия, хрома, молибдена, вольфрама, которые придают азотированному слою очень высокую твердость.

Детали, подлежащие азотированию традиционными способами, предварительно подвергают закалке и отпуску. Это делается для того, чтобы тонкий и хрупкий слой, получаемый при азотировании, опирался на прочную и однородную подкладку (сердцевину детали) и не продавливался в процессе эксплуатации. При плазменном упрочнении азотирование совмещено с закалкой. При азотировании стали 40 с использованием в качестве плазмообразующего газа смеси аргона с азотом получают поверхностную твердость 9500–9800 МПа [14].

Технология плазменного упрочнения

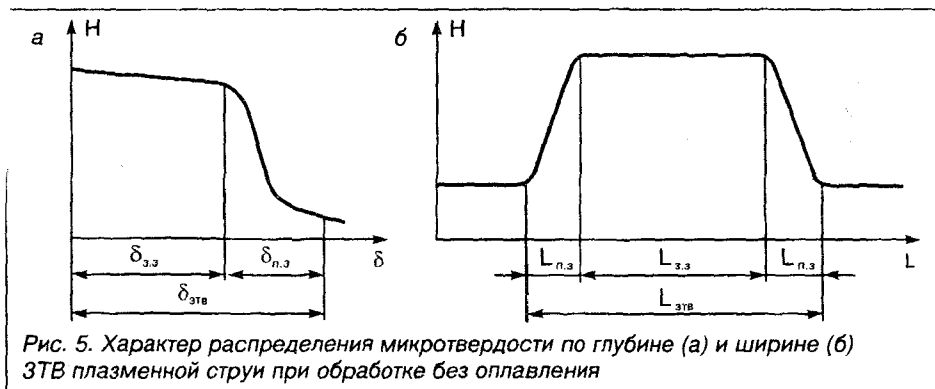
Задачей разработки технологии плазменного упрочнения является получение на детали упрочненного слоя с заданными эксплуатационными характеристиками (износостойкость, прочность, трещиностойкость, выносливость и др.).

Глубина закаленной зоны зависит от плотности мощности источника нагрева и скорости его перемещения. Глубину закалки или оплавления сталей и чугунов определяют по формуле [17]

$$Z = P / (dv)^{0,4},$$

где Z — толщина закаленного или оплавленного слоя; P — мощность плазматрона; d — диаметр сопла плазматрона; v — скорость перемещения плазматрона.

Наиболее широкое распространение получило плазменное упрочнение без оплавления слоев. Характер распределения микротвердости



по глубине δ и ширине L ЗТВ плазменной струи при обработке без оплавления показан на рис. 5. В табл. 1 приведены значения микротвердости и размеров ЗТВ для различных сталей [1].

Эти данные получены при обработке сталей плазмотроном косвенного действия с диаметром сопла 6 мм. Основными параметрами процесса плазменного упрочнения являются сила тока, напряжение на дуге, скорость перемещения плазмотрона. На силу тока и напряжение оказывают влияние расход плазмообразующего газа, диаметр и длина канала сопла, расстояние от среза сопла до обрабатываемой поверхности.

Таблица 1. Оптимальные режимы плазменного упрочнения сталей без оплавления

Сталь	Оптимальный режим обработки		Микротвердость Н, МПа		Степень упрочнения K_H	Размеры упрочненной зоны, мм					
	Сила тока, А	Скорость перемещения, м/ч	исходной структуры	в закаленной зоне		$\delta_{3ТВ}$	$\delta_{3.3}$	$\delta_{п.3}^*$	$L_{3ТВ}$	$L_{3.3}$	$L_{п.3}^*$
30ХГСА	400	20	1950–2100	7400–7700	3,5	3,9	3,3	14,5	13,5	12,5	7,5
45	400	20	1700–1800	8200–8400	4,7	4,0	3,6	10,0	14,0	13,2	6,0
50ХН	400	25	1900–2000	8400–8600	4,5	3,9	3,6	9,5	14,0	13,3	5,0
65ХЗМФ	400	30	1850–2000	8750–8850	4,7	3,7	3,4	8,0	13,7	13,1	4,5
М76	400	32	2300–2450	9950–10050	4,0	3,3	3,1	4,5	12,9	12,4	3,5
9ХФ	400	35	2600–2750	10500–10750	3,8	3,1	2,9	6,0	12,5	11,9	4,5
150ХНМ	400	40	3200–3600	9600–9750	3,1	3,5	2,8	16,0	11,5	10,6	7,5

Примечание. В таблице приняты следующие обозначения: степень упрочнения K_H — соотношение микротвердости закаленной зоны и исходной структуры; $\delta_{3ТВ}$, $\delta_{3.3}$ — глубина зоны термического влияния и закаленной зоны; $\delta_{п.3}^*$ — относительная глубина переходной зоны ($\delta_{п.3}^* = (\delta_{п.3} / \delta_{3ТВ}) \cdot 100\%$); $L_{3ТВ}$, $L_{3.3}$ — ширина зоны термического воздействия и закаленной зоны; $L_{п.3}^*$ — относительная ширина переходной зоны ($L_{п.3}^* = (L_{п.3} / L_{3ТВ}) \cdot 100\%$).

При варьировании плотности мощности плазменного нагрева обычно регулируют силу тока и скорость перемещения, оставляя другие параметры без изменения. При плазменной закалке больших поверхностей возникает проблема перекрытия соседних закаленных областей. Наиболее широко встречаются два случая последовательного упрочнения полос: обработка плоских поверхностей и обработка цилиндрических поверхностей. При этом важной характеристикой является коэффициент перекрытия

$$K_n = S / L_{3,3},$$

где S — шаг между закаленными зонами; $L_{3,3}$ — ширина закаленной зоны.

Полосы могут быть выполнены с перекрытием (при $K_n < 1$) и без перекрытия (при $K_n \geq 1$). Под действием теплового поля, возникающего при формировании очередной полосы, происходит частичный отпуск соседних закаленных зон. При этом распределение твердости по ширине ЗТВ будет представлять собой чередование участков с ее высокими и низкими значениями. Во многих случаях расположение упрочненных полос на некотором расстоянии друг от друга так, чтобы обработанная плазменной дугой площадь составляла 20–50% общей площади, приводит к наибольшей износостойкости.

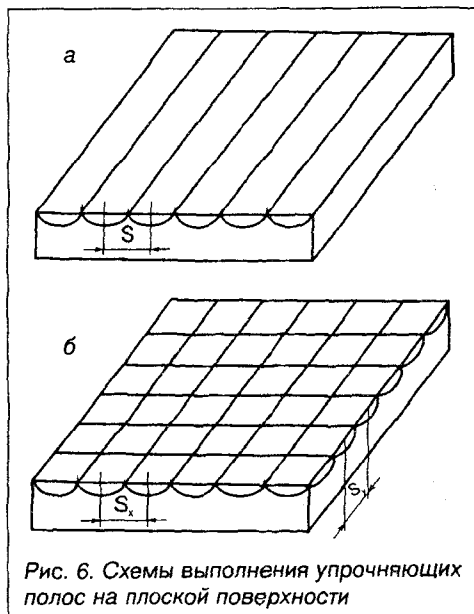


Рис. 6. Схемы выполнения упрочняющих полос на плоской поверхности

Обработку плоских поверхностей ведут по двум схемам выполнения полос (рис. 6): линейной (а) и клеточной (б). После выполнения каждой полосы деталь или плазмотрон периодически смещают в поперечном направлении на расстояние, равное шагу S . Наиболее просто при клеточной схеме полосы выполнять под прямым углом друг к другу и с одинаковым шагом по обоим координатам, хотя больших сложностей для наложения полос не под прямым углом и для упрочнения с $S_x \neq S_y$ нет.

Цилиндрические поверхности обрабатывают преимущественно по четырем схемам (рис. 7): а — полосы выполняют по одной винтовой линии; б — полосы выполняют по

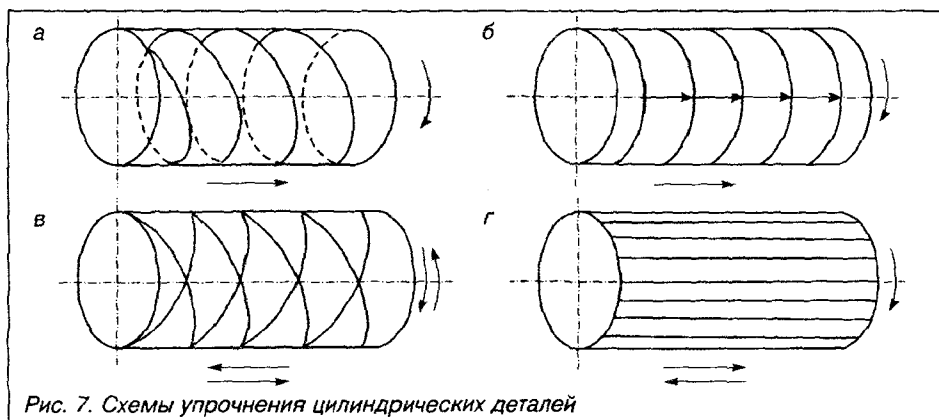


Рис. 7. Схемы упрочнения цилиндрических деталей

двум винтовым линиям навстречу друг другу с постоянной осевой подачей S ; $в$ — кольцевые полосы выполняют с дискретной осевой подачей S ; $г$ — полосы выполняют вдоль оси по образующей с периодическим вращением детали для смещения на шаг S .

По этим же схемам ведут упрочнение внутренних цилиндрических поверхностей. При этом минимальный внутренний диаметр упрочняемых деталей ограничивают размеры плазматрона для внутреннего упрочнения. Плазменное упрочнение в жидких средах расширяет возможности поверхностного упрочнения металлов: повышает производительность и качество обработки; позволяет осуществить комбинированное воздействие на рабочие поверхности деталей; улучшает эксплуатационные свойства изделий [12].

В табл. 2 приведены сравнительные данные о влиянии охлаждающей воды на критическую плотность мощности (см. рис. 2) и максимальную поверхностную твердость сталей 9ХФ и У8.

При использовании воды увеличивается максимальная поверхностная твердость и сдвигаются вправо пороги W_2 и W_3 , т. е. начало оплавления поверхности происходит при больших значениях плотности мощности (см. рис. 2). Диапазон гарантированного упрочнения

Таблица 2. Влияние охлаждающей воды на критическую плотность мощности и максимальную поверхностную твердость сталей 9ХФ и У8

Параметр	Обработка	
	на воздухе	в воде
W_1	1,2/1,7	1,2/1,45
W_2	2,9/3,3	3,2/3,6
W_3	3,3/3,9	39/4,2
H_0	280/220	280/220
HV	900/950	950/1000

Примечания. 1. В числителе приведены значения для стали 9ХФ, в знаменателе — для стали У8.

2. H_0 — исходная микротвердость сталей; HV — максимальная поверхностная твердость по Виккерсу при нагрузке 10 Н.

W_2-W_3 при обработке в жидкой среде примерно на 20–30% шире, что облегчает выбор режимов упрочнения. Глубина упрочненного слоя при обработке в воде на 30–40% меньше, чем на воздухе. Максимальная твердость на поверхности возрастает примерно на 15%.

В качестве жидкой среды (кроме воды) используют концентрированные растворы солей аммония [12]. При одних и тех же параметрах плазмы применение активной жидкой среды повышает поверхностную твердость на 20% по сравнению с закалкой в воде. При этом дополнительный упрочняющий эффект за счет азотирования наблюдается

только при плотности мощности, соответствующей третьему энергетическому порогу W_3 , т. е. при оплавлении поверхностного слоя.

Установлено, что толщина слоя образца из стали 20, обработанного на режимах, обеспечивающих скачок поверхностной твердости до 250 HV (в 2–2,5 раза больше исходной), составляла 25–40 мкм. Азотированный слой представлял собой белую, плохо травящуюся полосу карбонатного состава, содержащую примерно 4% азота и 1,5% углерода. Износостойкость образцов, упрочненных с дополнительным азотированием в жидкой среде, на 30% выше, чем при аналогичной обработке в воде и на воздухе.

Используя активные жидкие среды и плазмообразующие газы, можно проводить комбинированное насыщение поверхности азотом, углеродом и бором, что в сочетании с термическим упрочнением увеличивает эффективность процесса.

Одним из направлений повышения качества упрочненных слоев является использование плазменного циклического упрочнения. Выделяют три основных способа плазменного циклического упрочнения (рис. 8)

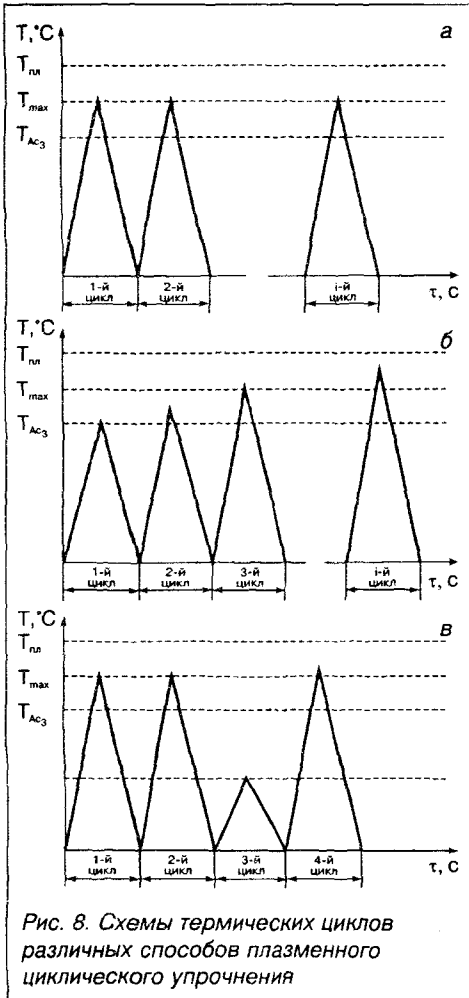


Рис. 8. Схемы термических циклов различных способов плазменного циклического упрочнения

[13]. Плазменное циклическое упрочнение способом А (рис. 8, а) проводят при постоянных режимах обработки в интервале плотностей мощности W_2-W_3 . После определенного числа циклов изменения в структуре упрочненного слоя исследованных марок сталей прекращаются (табл. 3).

Таблица 3. Характеристика упрочненного слоя при циклическом плазменном упрочнении

Сталь	Число циклов	Микротвердость			Ширина, мм	Глубина, мм
		исходная	в центре зоны закалки	в переходной зоне		
45	1	180	790	250	6,0	0,75
	2		840	270	8,0	0,90
	3		850	270	10,0	1,00
	4		845	260	10,2	1,20
	5		840	260	10,3	1,30
	6		840	260	10,0	1,30
9ХФ	1	280	895	390	7,0	0,60
	2		920	310	8,0	0,75
	3		940	320	10,0	0,90
	4		945	320	10,2	1,00
	5		935	310	10,2	1,00
	6		940	310	10,2	1,00
30ХГСА	1	190	650	165	7,0	0,75
	2		710	180	9,0	0,95
	3		740	182	10,0	1,00
	4		745	180	10,0	1,00
	5		740	180	10,2	1,10
	6		740	180	10,2	1,10
20	1	120	410	150	6	0,66
	2		470	160	8	0,75
	3		480	160	9	0,85
	4		470	160	10	0,90
	5		475	161	10	0,90
65Г	1	290	840	290	7,0	0,70
	2		890	310	9,0	0,90
	3		900	310	10,0	0,95
	4		905	310	10,2	1,00
	5		900	300	10,2	1,00
	6		910	305	10,3	1,10
	7		905	305	10,3	1,10
	8		905	305	10,3	1,10
У8	1	290	870	290	7,0	0,75
	2		950	310	8,0	0,95
	3		1020	390	10,0	1,20
	4		1030	410	10,2	1,30
	5		1030	410	10,2	1,30
	6		1035	410	10,2	1,30
	7		1030	410	10,2	1,30

По мере увеличения числа циклов мартенситная структура упрочненного слоя становится более дисперсной по сравнению со структурой при обычной плазменной закалке. Повышаются микротвердость, ширина и глубина упрочненного слоя от цикла к циклу. После трех циклов нагрева упрочненный слой на всех сталях состоит из зон закалки, отпуска и переходной к основному металлу. Структура металла зоны отпуска высокодисперсная трооститно-сорбитная.

Плазменное циклическое упрочнение по способу В (рис. 8, б), отличающееся повышением температуры нагрева от цикла к циклу, характеризуется теми же закономерностями, что и по способу А — увеличением микротвердости, ширины и глубины упрочненного слоя от цикла к циклу, получением высокодисперсной структуры мартенсита в упрочненном слое, образованием пластичного слоя — зоны отпуска после третьего цикла упрочнения. На рис. 9 показано влияние числа циклов на поверхностную твердость различных сталей при переменных режимах упрочнения (способ В). При упрочнении по способу С (рис. 8, в) после двух циклов закалки проводят отпуск, что обеспечивает получение равновесной структуры благодаря выделению углерода из мартенсита закалки и остаточного аустенита, а также снижение внутренних структурных микронапряжений.

Важным преимуществом плазменного циклического упрочнения является наличие более широких возможностей регулирования трещиностойкости упрочненных слоев. Следует отметить, что наиболее распространенными дефектами в деталях, подвергнутых плазменному упрочнению, являются продольные и поперечные трещины, которые располагаются в упрочненном слое и переходной зоне, в ряде случаев выходя на поверхность. По времени появления и состоянию поверхности эти трещины могут быть отнесены к холодным. На образование трещин влияет ряд факторов: структурный, деформационный (фактор напряжений) и водородный [1, 13, 16, 18].

Увеличение степени дисперсности мартенсита — одно из главных направлений повышения трещиностойкости упрочненных слоев.

Наряду с измельчением зерна в упрочненном слое важным факто-

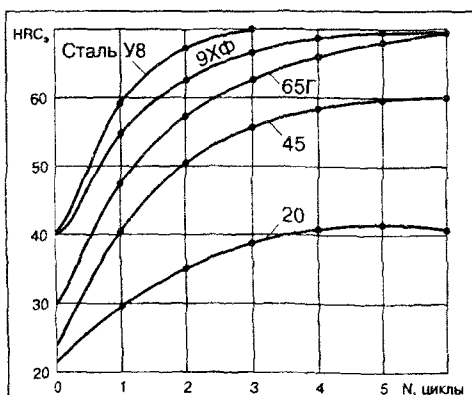


Рис. 9. Зависимость поверхностной твердости сталей от числа циклов при многоцикловом упрочнении с переменными режимами

ром повышения трещиностойкости при плазменном циклическом упрочнении является наличие зоны отпуска. Разрушение образцов после двойной закалки происходит по «множественному» механизму с торможением трещины на границе закаленного и переходного слоя к основному металлу [13]. Первой причиной торможения является переход остаточных напряжений в этом месте от сжимающих к растягивающим, второй — большая пластичность металла на границе закаленной и переходной зоны.

Формирование напряжений при охлаждении поверхности, подвергнутой плазменной закалке, можно представить следующим образом. После прекращения воздействия плазменной дуги наиболее быстро охлаждается внутренний слой металла, расположенный возле непрогретого исходного слоя, а приповерхностный слой — в последнюю очередь. В процессе сжатия он воздействует на внутренний слой, формируя в нем сжимающие напряжения, в то время как на поверхности формируются растягивающие. При этом в поверхностном слое сталей мартенситное превращение происходит в последнюю очередь. Поскольку мартенсит имеет больший объем, то в приповерхностном слое в это время за счет фазовых напряжений происходит расширение и возникают сжимающие напряжения. В результате величина и знак остаточных напряжений $\sigma_{ост}$ зависят от соотношения термических $\sigma_{терм}$ и фазовых $\sigma_{фаз}$ напряжений с учетом возможных пластических эффектов. При $\sigma_{терм} > \sigma_{фаз}$ на поверхности формируются растягивающие напряжения, а при $\sigma_{терм} < \sigma_{фаз}$ — сжимающие.

Решающее влияние на значение и характер суммарных напряжений оказывает время перемены знака термических напряжений по отношению ко времени появления структурных превращений [3]. Если структурные превращения произошли до перемены знака термических напряжений, то суммарные напряжения уменьшаются, в противном случае — увеличиваются.

Процесс плазменного упрочнения осуществляют таким образом, чтобы избежать появления растягивающих напряжений. С этой целью оптимизируют скорость нагрева, используют термоциклирование, регулируют величину перекрытия упрочняющих слоев и др.

Роль водородного фактора в образовании трещин при плазменном упрочнении изучена недостаточно [18]. Установлено, что содержание водорода в упрочненном слое зависит от марки стали и способа упрочнения [18]. Максимальное количество водорода зафиксировано при плазменном упрочнении в жидких средах, несколько меньшее — при плазменном легировании и минимальное — при плазменной закалке. Основными источниками водорода при плазменном упрочнении явля-

ются плазмообразующий газ, легирующие пасты и обмазки, охлаждающая жидкость и загрязненная поверхность.

С увеличением мощности плазменной струи и расхода плазмообразующего газа количество диффузионного и остаточного водорода повышается. С увеличением диаметра сопла плазмотрона возрастает содержание диффузионного водорода, а с повышением скорости обработки — снижается. С ростом толщины водной прослойки наблюдали увеличение количества диффузионного водорода в упрочненном слое.

При всех способах циклического плазменного упрочнения наблюдали снижение диффузионного водорода [13]. Таким образом, при плазменном упрочнении существует ряд факторов, которые могут привести к образованию трещин. Но в то же время технология плазменного упрочнения позволяет использовать ряд приемов и способов, которые существенно повышают трещиностойкость упрочненных слоев.

Плазменное упрочнение с оплавлением поверхности менее распространено, чем упрочнение без оплавления. Оплавление поверхности сталей и чугунов определяют по формуле [17]

$$P / d(dv)^{0,4} = (\lambda T_{пл} - T_0) / 0,77a^{0,4} ,$$

где P — мощность плазменной дуги; d — диаметр сопла плазмотрона; v — скорость перемещения плазмотрона; λ , a — соответственно теплопроводность и температуропроводность материала; $T_{пл}$ — температура плавления; T_0 — исходная температура нагреваемого тела.

В ряде случаев к упрочнению с оплавлением прибегают с целью обеспечения более высокой трещиностойкости, но этот технологический прием эффективен только для сталей, содержащих менее 0,35% углерода [1]. Что касается плазменного упрочнения с оплавлением сталей, содержащих более 0,35% углерода, то оно может быть применено только для деталей, работающих в условиях интенсивного изнашивания и не испытывающих значительных ударных и знакопеременных нагрузок.

Получило распространение плазменное упрочнение с поверхностным оплавлением чугунных деталей [1]. При этом дополнительным фактором повышения срока службы деталей является создание поверхностного отбеленного слоя с высокой износостойкостью. Образование трещин удастся избежать при использовании предварительного подогрева до температуры более 350 °С.

Доказана возможность получения теплостойких структур типа белого чугуна на низкоуглеродистой стали 20 при плазменном легировании углеродом из твердой обмазки в условиях оплавления [19]. Кроме упрочнения без оплавления и с оплавлением, химико-термической плазменной обработки, применяют комбинированное упрочнение с

использованием плазменного нагрева в сочетании с другими способами объемной или поверхностной термической обработки [1].

К перспективным способам комбинированного упрочнения относят плазменную закалку в сочетании с предварительной закалкой токами высокой частоты. При таком способе упрочнения детали имеют композиционный рабочий слой с высокой износостойкостью и трещиностойкостью, а также относительно мягкую и пластичную сердцевину. Глубину упрочненного слоя можно регулировать за счет закалки ТВЧ в достаточно широких пределах.

ОАО «УкрИСП» проводило эксперименты по возможности использования комбинированного упрочнения (ТВЧ + плазма) применительно к ходовым винтам передачи винт—гайка качения. Длинномерные винты этих передач изготавливают из стали 9ХФ и упрочняют закалкой ТВЧ, после чего деталь подвергают окончательной механической обработке (шлифовке). Испытания проводили на специальных образцах с резьбовыми канавками. Металлографические исследования исходной структуры показали, что микротвердость составляет 2690–2780 МПа при наличии карбидов, характерных для отожженной стали. После закалки ТВЧ наблюдали растворение карбидов. Сохранялась наследственность исходной отожженной структуры, что характерно для скоростных способов закалки. Микротвердость после закалки ТВЧ составила 6370–7890 МПа, а микротвердость зоны плазменной закалки после ТВЧ изменялась в пределах 8500–10 000 МПа.

После закаленной зоны следует зона отпуска значительной протяженности. Закаленные по различной технологии образцы испытывали на изнашивание при контактных напряжениях 1000–9000 МПа. Испытания проводили до наработки 1 и 28,7 млн. циклов. Степень деформации оценивали по глубине дорожки качения. Результаты испытаний образцов на контактную усталость приведены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты испытаний образцов из стали 9ХФ на контактную усталость

Наработка, млн. циклов	Глубина дорожки качения, мкм, при различных вариантах обработки		
	Закалка ТВЧ	Сырые образцы+плазма	Упрочнение ТВЧ+плазма
1	1	2,8	0
28,7	4,4	28	0

При упрочнении ТВЧ + плазма наличие протяженной зоны высокотемпературного отпуска с пониженной микротвердостью не сказывается отрицательно на износостойкости образцов. По-видимому, в условиях высоких контактных нагрузок, наблюдающихся при работе пары

винт—гайка качения, слой с пониженной микротвердостью, имеющий структуру троостита отпуска, оказывает положительное воздействие за счет своих высоких упругих свойств. Этот слой может влиять на способность поверхности, подвергнутой плазменной закалке после закалки ТВЧ, сопротивляться пластической деформации.

Для деталей, эксплуатируемых при значительных динамических нагрузках, рекомендуют комплексное упрочнение, включающее закалку ТВЧ + плазменную обработку с промежуточным объемным отпуском [1]. В зависимости от требуемого уровня служебных свойств температуру промежуточного отпуска назначают в интервале 200–400 °С.

Области применения плазменного упрочнения

Технология плазменного упрочнения отличается от других способов поверхностной термической обработки относительной простотой и невысокой стоимостью технологического оборудования, не требует дополнительных охлаждающих сред, легко поддается механизации и автоматизации. Правильно выбранные режимы обработки обеспечивают высокие эксплуатационные характеристики и трещиностойкость изделий.

Плазменное упрочнение наиболее перспективно применять для сменного технологического инструмента, эксплуатирующегося в условиях интенсивного трения металла по металлу в масляной и масляно-абразивной средах (валки, штампы, матрицы из углеродистых и легированных сталей), металлорежущего инструмента из быстрорежущих сталей и твердых сплавов, а также инструмента для обработки неметаллических материалов — продуктов пищевой, кормоперерабатывающей, деревообрабатывающей промышленности [1].

Для плазменного упрочнения сверл из стали Р6М5 используют азотную плазменную струю. Режим обработки: $I_d = 150...180$ А, $U_d = 200$ В, дополнительное спрейерное охлаждение водой [1]. В результате получают упрочненный слой глубиной 1,0–1,5 мм, в структуре поверхностной части которого наблюдается не подвергающаяся травлению белая зона глубиной до 0,4 мм с микротвердостью до 12 000 МПа. За этой полосой расположена зона с мартенситно-аустенитной структурой и нерастворенными карбидами микротвердостью 8500–9700 МПа. Эксплуатационная стойкость таких сверл возрастает в 1,5–2 раза.

Плазменная закалка режущих кромок концевых фрез диаметром 35–40 мм из стали Р18 позволила увеличить их стойкость в 1,3–1,5 раза [17]. После упрочнения режущего и слесарного инструмента из различных конструкционных материалов путем облучения плазмой тлеющего разряда в вакуумной камере при давлении остаточного воздуха 1,33–13,3 Па происходит увеличение плотности дислокаций до глубины

4 мм, износостойкости — в 1,5–5 раз, микротвердости — в 1,5–1,20 раз, уменьшение коэффициента трения в 1,5 раза [21].

В табл. 5 и 6 приведены результаты испытаний на долговечность различных типов инструмента из металлов, алмаза и абразива.

Таблица 5. Долговечность режущего инструмента

Инструмент	Режим испытаний	Долговечность необлученного инструмента	Долговечность облученного инструмента	Относительное увеличение долговечности
Сверла из быстрорежущей стали Р6М5 диаметром 4 мм	Сверление высокопрочного титанового сплава	<i>Общая длина сверления, мм:</i>		
	BT22 (d=25 мм)	525	1425, после перезаточки 1650	2,71
Концевые фрезы из быстрорежущей стали Р6М5 диаметром 8 мм	Фрезерование высокопрочного титанового сплава	<i>Длина фрезерования, мм, при глубине срезания 1 и 2,5 мм:</i>		
	BT22	1720	4800, 4600	2,79, 2,56
Резцы из твердого сплава:		<i>Общая длина точения, мм:</i>		
T15K6	Точение	$1,5 \cdot 10^6$	$2,3 \cdot 10^6$	1,53
VK8	высокопрочного	$2,5 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^6$	1,6
VK8 (другой тип)	сплава BT22	$1,87 \cdot 10^6$	$2,9 \cdot 10^6$	1,55

Таблица 6. Относительная долговечность слесарного инструмента

Инструмент	Относительная долговечность (облученный/необлученный)
Метчик М10–М14 (инструментальная сталь У8А)	3,1
Развертка диаметром 10–16 мм	2,9
Напильник (инструментальная сталь У8А)	2,3
Дисковая алмазная пила диаметром 400 мм (для резки гранита)	1,6
Отрезной абразивный круг диаметром 300 мм (для резки стали)	1,26

Эти результаты показывают, что во всех случаях после плазменной обработки долговечность повысилась на 26–314%. При обработке шлифовальными кругами из электрокорунда наблюдали увеличение коэффициента шлифования в 1,4–1,8 раза и снижение режущей способности в 1,14–1,17 раз (табл. 7).

Предложена комплексная технология упрочнения матриц и пуансонов штампов горячего деформирования, а также обрезных и прорубных пуансонов из стали 3Х3МЗФ, включающая цементацию рабочей поверхности инструмента, закалку, отпуск, а затем легирование поверхности вольфрамом и упрочнение импульсной плазмой [20].

Таблица 7. Сравнение параметров шлифования для облуженных (числитель) и необлуженных (знаменатель) кругов

Коэффициент шлифования, мм ³ /мм ³	Режущая способность, г/мин	Щероховатость, мкм	Увеличение коэффициента шлифования
0,55/0,35	13,1/15,4	4,32—4,76/4,16—4,47	1,57
0,55/0,38	13,1/15,2	4,18—4,68/4,02—4,63	1,45
0,54/0,30	13,2/15,6	—	1,80
0,56/0,32	13,1/15,7	—	1,75

Под воздействием импульсной струи плазмы на предварительно цементированной и закаленной поверхности изделия был получен слой толщиной 40—80 мкм, легированный вольфрамом, кобальтом и углеродом с микротвердостью 20 ГПа. Результаты контрольных испытаний промышленных партий инструмента приведены в табл. 8.

Таблица 8. Результат контрольных испытаний промышленных партий инструмента

Деталь	Цеховая норма стойкости, т/шт.	Стойкость, т/шт.	
		без упрочнения	после упрочнения
Отрезной нож	4,5	11,0	52,9
Отрезная матрица	6,47	24,4	79,35
I опорная матрица	20,4	26,7	177,75
II опорная матрица	2,5	4,5	29,23
Прорезной пуансон	0,85	1,8	7,08

К комплексной технологии упрочнения относят и плазменную обработку изделий после наплавки [1]. При этом обосновывают два подхода к выбору состава наплавленного металла. Первый из них предусматривает получение низко- или среднеуглеродистого низколегированного наплавленного металла (типа 18ХТС, 30ХГСА и др.), износостойкость поверхности которого после плазменной закалки возрастает в несколько раз. Таким образом, дорогую средне- и высоколегированную сталь заменяют более дешевой — низколегированной. При втором подходе используют низко-, среднеуглеродистый или среднелегированный наплавленный металл (типа 10Х5МТ, 12Х5МФ, 25Х5ФМС, 40Х7М2ФАТ и др.), который после плазменной обработки обладает значительно лучшими эксплуатационными характеристиками.

В качестве примера реализации комплексной технологии упрочнения применяют технологию упрочнения рабочих валков штрипсового стана металлургического комбината «Криворожсталь» [1]. Технология предус-

матрирует наплавку порошковой проволокой ПП-Нп-25Х5ФМС под флюсом АН-20 (диаметр проволоки 5 мм, сила сварочного тока 450–530 А), механическую обработку и упрочнение аргоновой плазмой (сила сварочного тока 400 А, скорость 25 м/ч, расстояние от обрабатываемой поверхности до среза сопла 5 мм). Обработанные валки эксплуатируют без повторного упрочнения в течение двух-трех кампаний. После первой и второй кампании осуществляют перешлифовку. Комплексная технология упрочнения позволяет прокатать до 100 тыс. т металла, что более чем в три раза превышает количество прокатанного металла при эксплуатации валков, наплавленных по той же технологии, но не упрочненных плазмой.

Особый интерес представляет плазменное поверхностное упрочнение колесных пар. Колеса являются одними из наиболее ответственных и тяжело нагруженных элементов ходовой части железнодорожного подвижного состава. Колесные пары испытывают высокие динамические нагрузки, а колесо при взаимодействии с рельсом подвержено значительному изнашиванию. Доказано, что закалка гребней колес до твердости более 600 НV может стать эффективным способом борьбы с боковым изнашиванием гребней колес и головки рельса [16]. В качестве эффективного способа повышения износостойкости колесных пар НПП «ТОПАС» предложена технология плазменного упрочнения [16]. Структура исходного металла колеса, содержащего 0,56% С, 0,34% Cr, 0,77% Mn, 0,6% Si, остальное Fe, — ферритно-перлитная смесь, микротвердость которой составляет 285 Н/мм².

При оптимальных режимах локальной плазменной термообработки в поверхностном упрочненном слое колесных пар формируется структура отпущенный мартенсит+сорбит микротвердостью 4,5 кН/мм² с переходом к полностью сорбитной структуре микротвердостью 3,5 кН/мм² с размером зерна примерно 1 мкм. Эта микроструктура обладает оптимальным комплексом прочностных и пластичных свойств с шириной упрочненной зоны от 25 до 30 мм и глубиной 3,5 мм. Установлено, что изнашивание упрочненных плазмой колесных пар как тягового, так и подвижного состава по сравнению с серийными снижается в 2,5–3,0 раза [16].

Одним из важнейших преимуществ поверхностной закалки от других способов поверхностного упрочнения является различие между трещиностойкостью поверхностного слоя и сердцевины. Проведенные исследования позволили установить, что трещины небольших глубин при умеренных рабочих напряжениях не могут катастрофически расти даже в поверхностном слое, так как минимальная глубина опасной трещины равна нескольким миллиметрам. Рост трещины прекращается при переходе ее из слоя в сердцевину. Детали с трещинами могут длительно и надежно работать.

Глава 2. Плазменное напыление поверхностей деталей

Способы плазменного напыления и применяемые материалы

Плазменное напыление является одним из способов газотермического нанесения покрытий [24]. В основе этого процесса лежит нагрев напыляемого материала до жидкого или пластического состояния, перенос его высокотемпературной плазменной струей к подложке с последующим образованием слоя покрытия [24, 25, 26].

При плазменном напылении в качестве напыляющих материалов применяют порошки, проволоки, прутки. Наиболее широко распространено напыление порошками. Схема плазменного напыления с использованием порошковых материалов показана на рис. 10. В плазмотроне, состоящем из водоохлаждаемого катодного узла (катод 2 и корпус 3) и анодного узла, с помощью источника 9 постоянного сварочного тока возбуждается плазменная дуга 8, которая стабилизируется стенками канала сопла и плазмообразующим газом, поступающим через подвод 1.

Порошок подают из порошкового питателя 6 с помощью газа, который поступает по подводу 7.

Температура плазменной струи достигает 5000–55 000 °С, а скорость истечения — 1000–3000 м/с. В плазменной струе частицы порошка расплавляются и приобретают скорость 50–500 м/с. Скорость полета частиц порошка зависит от их размера, плотности материала, силы сварочного тока дуги, природы и расхода плазмообразующего газа, конструкции плазмотрона. Порошок вводят в плазменную струю ниже среза сопла, на срез сопла или непосредственно в сопло. Нагрев напыляемых деталей не превышает 100–200 °С.

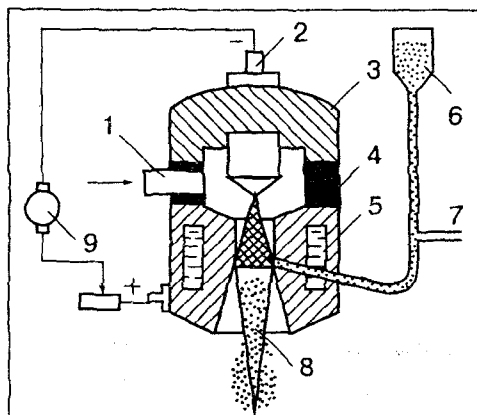


Рис. 10. Схема плазменного напыления порошком: 1 — подвод плазмообразующего газа; 2 — катод плазмотрона; 3 — корпус катода; 4 — изолятор; 5 — корпус анода; 6 — порошковый питатель; 7 — подвод газа, транспортирующего порошок; 8 — плазменная дуга; 9 — источник питания

К преимуществам способа плазменного напыления относят возможность получения покрытий из большинства материалов, плавящихся без разложения и ограничения по температуре плавления. Производительность плазменного напыления достаточно высока: 3–20 кг/ч для плазмотронов с электрической мощностью 30–40 кВт и 50–80 кг/ч для плазмотронов мощностью 150–200 кВт.

Плазменным напылением наносят покрытия как на плоские поверхности, так и на тела вращения и криволинейные поверхности. Для

покрытия характерна слоистая структура с высокой неоднородностью физических и механических свойств (рис. 11). Тип связей между покрытием и деталью (подложкой), а также между частицами покрытия обычно смешанный — механическое сцепление, сила физического и химического взаимодействий. Прочность сцепления покрытия с подложкой обычно составляет 10–50 МПа при испытаниях на нормальный отрыв.

Физические особенности формирования покрытий обуславливают появление открытой и закрытой пористостей. По мере увеличения толщины наносимого слоя открытые поры перекрываются, и пористость покрытия снижается. Поэтому плотность плазменных покрытий отличается от плотности материала и колеблется в пределах 80–97%. Обычно пористость плазменных покрытий составляет 10–15%.

Толщина покрытия практически не ограничена возможностями самого способа. Однако в силу физических особенностей процесса образования покрытий с увеличением толщины наносимого слоя в нем возрастают внутренние напряжения, которые стремятся оторвать покрытие от подложки. Поэтому обычно толщина покрытия не превышает 1 мм. Конструктивную нагрузку несет материал детали, а материал покрытия придает поверхности детали такие свойства, как твердость, износостойкость и т. п.

В качестве плазмообразующих газов применяют аргон, азот высокой чистоты, водород, гелий, а также смеси этих и других газов. В последние десятилетия успешно развиваются процессы плазменного напыления с использованием в качестве плазмообразующего газа смеси воздуха с горючим углеводородным газом (метаном, пропан-бутаном) [16]. Плазма продуктов сгорания воздуха с горючим углеводородным



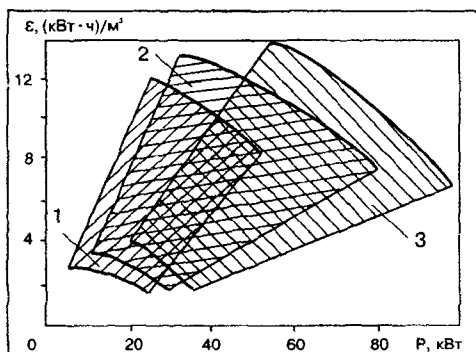


Рис. 12. Области достижимых значений удельной энергии ϵ плазменной струи в плазмотронах разной конструкции: 1 — плазмотроны с автогазодинамической стабилизацией длины дуги; 2 — плазмотроны с МЭВ и автовентиляцией зазора МЭВ-анод; 3 — плазмотроны с МЭВ и автовентиляцией зазора МЭВ-анод с независимой вентиляцией

газом отличается высокими значениями теплоемкости и теплопроводности, легкостью регулирования окислительно-восстановительного потенциала и относительно малой стоимостью. Это особенно важно при увеличении мощности плазмотрона и переходе к сверхзвуковым скоростям истечения плазмы, когда оптимальные режимы смещают в область больших расходов плазмообразующего газа и снижается время контакта частиц с окружающей атмосферой.

Для генерирования плазмы используют различные плазмотроны. Реализуемые в конкретной конструкции диапазон и уровень удельных мощностей характеризуют эффективность преобразования

электрической энергии дуги в тепловую плазменной струи, а также технологические возможности плазмотрона. На рис. 12 [38] показано, что в диапазоне мощностей P до 50 кВт для напыления могут быть использованы плазмотроны с автогазодинамической стабилизацией дуги, обеспечивающие достаточно высокий КПД (75–80%) и хорошие эксплуатационные характеристики. Диапазон более высоких мощностей (50–150 кВт) охватывают плазмотроны с одиночной межэлектродной вставкой (МЭВ).

Задача разработки технологического плазмотрона всегда сводится к созданию относительно простой, ремонтпригодной конструкции, обеспечивающей стабильную длительную работу в широком диапазоне изменения сварочного тока дуги, расхода и состава плазмообразующего газа, а также генерирование плазменной струи с воспроизводимыми параметрами, что позволяет эффективно обрабатывать материалы с различными свойствами [16].

В практике напыления применяют как однородные порошки различных материалов (металлов, сплавов, оксидов, бескислородных тугоплавких соединений), так и композиционные, а также механические смеси указанных материалов [24].

Наиболее распространены следующие порошковые материалы:

- металлы — Ni, Al, Mo, Ti, Cr, Cu;

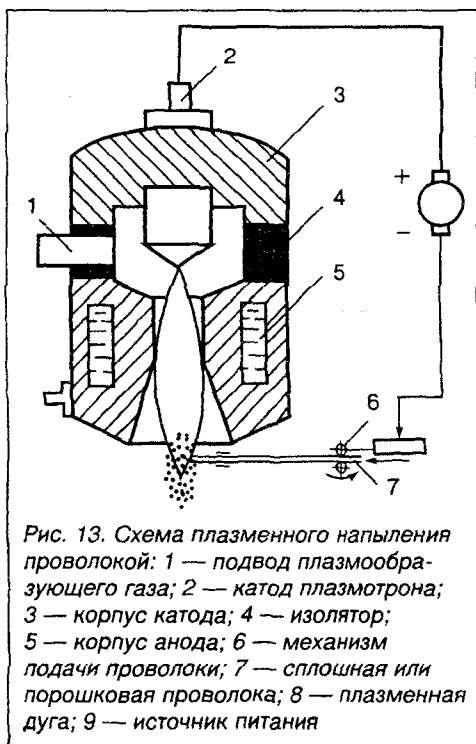
- *сплавы* — легированные стали, чугуны, никелевые, медные, кобальтовые, титановые, в том числе самофлюсующиеся сплавы (Ni-Cr-B-Si, Ni-B-Si, Co-Ni-Cr-B-Si, Ni-Cu-B-Si);
- *оксиды* Al, Ti, Cr, Zr и других металлов и их композиции;
- *бескислородные тугоплавкие соединения и твердые сплавы* — карбиды Cr, Ti, W и др. и их композиции с Co и Ni;
- *композиционные плакированные порошки* — Ni-графит, Ni-Al и др.);
- *композиционные конгломерированные порошки* — Ni-Al, NiCrBSi-Al и др.;
- *механические смеси* — Cr_3C_2+NiCr , $NiCrBSi+Cr_3C_2$ и др.

В случае применения композиционных порошков в технологии газотермического напыления преследуют следующие цели:

- использование экзотермического эффекта взаимодействия компонентов (Ni-Al, Ni-Ti и т. п.);
- равномерное распределение компонентов в объеме покрытия, например, типа керметов ($Ni-Al_2O_3$ и т. п.);
- защита материала ядра частицы от окисления или разложения при напылении (Co-WC, Ni-TiC и т. п.);
- формирование покрытия с участием материала, самостоятельно не образующего покрытия при газотермическом напылении (Ni-графит и т. п.);
- улучшение условий формирования покрытий за счет увеличения средней плотности частиц, введение компонентов с высокой энтальпией.

Применяемые для напыления порошки не должны разлагаться или возгоняться в процессе напыления, а должны иметь достаточную разницу между температурами плавления и кипения (не менее 200 °C).

В качестве напыляемого материала при плазменном напылении используют также проволоки [29]. Плазменное напыление с расплывлением проволоки (рис. 13) осуществляют двумя способами: нейтральной проволокой и проволокой-



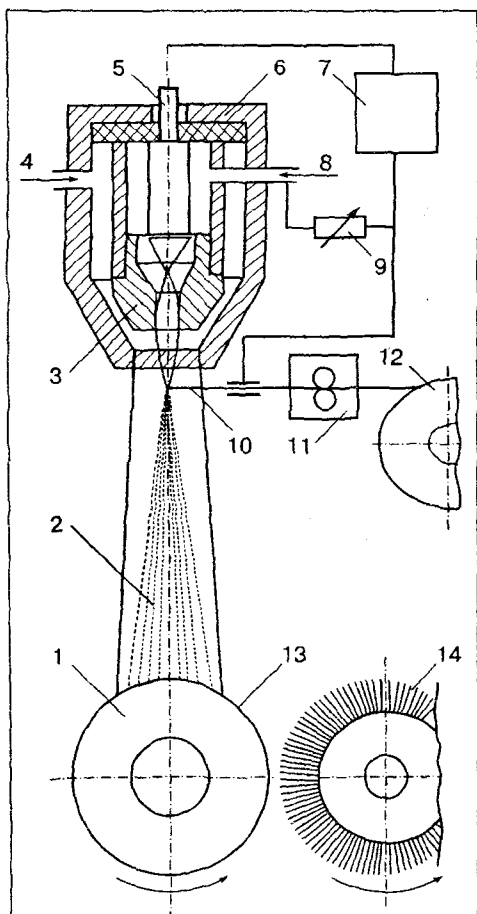


Рис. 14. Схема плазменно-дугового напыления покрытий проволокой:
 1 — изделие; 2 — поток частиц напыляемого материала;
 3 — плазмообразующее сопло; 4 — сжатый воздух; 5 — катод;
 6 — плазмотрон; 7 — плазмообразующий газ; 8 — источник питания;
 9 — балластное сопротивление; 10 — распыляемая проволока; 11 — подающий механизм; 12 — кассета с проволокой; 13 — покрытие; 14 — вращающаяся металлическая щетка

анодом. В первом случае нагрев, плавление и распыление нейтральной проволоки осуществляют плазменной струей, а во втором — на проволоку-анод подают положительный потенциал источника питания дуги, а нагрев и плавление проволоки происходят преимущественно за счет выделения теплоты в анодном пятне. Плазменная струя, в основном, выполняет функции распыления.

На рис. 14 показана схема плазменно-дугового напыления покрытий токоведущей проволокой с одновременной зачисткой слоев металлической щеткой [27]. Напыление осуществляют слоями толщиной 0,05–0,10 мм с одновременной обработкой каждого последующего слоя специальной вращающейся металлической щеткой. Непрерывная механическая обработка поверхностного слоя основы, совмещенная во времени с процессом напыления, обеспечивает благоприятные условия для напыления покрытий большой толщины (15–20 мм).

Прочность покрытия на отрыв 40–55 МПа. Плотность покрытия, полученного путем распыления проволок из стали 65Г, — 93–96% плотности исходного материала, а покрытия из проволоки 04Х20Н11МЗДТ — 98%. Пористость покрытий 1–4%. Производительность процесса 2–10 кг/ч.

Технология плазменно-дугового напыления токоведущей проволокой позволяет наносить покрытия на металлические изделия любой проволокой, в том числе порошковой и

проволокой из цветных металлов и сплавов; на многослойные покрытия из различных материалов, в том числе антикоррозионные покрытия; на металлические покрытия и неметаллические изделия (пластмассы, бетон, кирпич, графит и т. д.); на композитные покрытия одновременным распылением нескольких проволок различного состава; на покрытия внутренних поверхностей тел вращения диаметром более 200 мм [27].

Применение плазменных установок мощностью 30–60 кВт для напыления мелких деталей, узких кромок или дорожек ведет к большим потерям напыляемого материала и необходимости введения дополнительных операций. Для устранения этих недостатков предложен способ микроплазменного напыления [28]. Его осуществляют квазиламинарной плазменной струей, образованной плазмотроном мощностью до 2 кВт при силе сварочного тока 20–50 А. Способ позволяет напылять узкие дорожки шириной 1–3 мм при толщине 0,2–0,5 мм из различных материалов. При микроплазменном напылении на коротких дистанциях никелевого самофлюсующегося сплава с температурой плавления около 1000 °С одновременно происходит процесс оплавления с образованием плотной, литой структуры покрытия. Низкая тепловая мощность микроплазменной струи позволяет уменьшить нагрев основы, что обеспечивает нанесение покрытий на изделия малых размеров и с тонкими стенками без существенного локального перегрева и коробления. Уровень шума при напылении ламинарной плазменной струей составляет 30–50 дБ.

Микроплазменное напыление рекомендуют использовать для упрочнения и ремонта различных мелких деталей текстильных машин, в полиграфии, табачной промышленности, а также при изготовлении нагревательных элементов, имплантантов и др. [28]. При микроплазменном напылении используют также проволочные материалы [30]. Таким способом напыляют покрытия из стальной, медной, вольфрамовой и нихромовой проволок.

Одним из способов, позволяющих повысить качество газотермических покрытий, особенно из металлов и материалов, подверженных разложению, окислению, азотированию, является плазменное нанесение покрытий в камере с контролируемой по составу и давлению средой [25]. Для этих целей применяют также защитные сопловые насадки, создающие закрытое пространство между распылителем и изделием, заполненное плазмообразующим или защитным газом.

Лучшие результаты получают при плазменном напылении покрытий в динамическом вакууме. При этом истечение струи происходит в вакуумную камеру, из которой непрерывно откачивают рабочие газы, причем скорость струи превышает скорость звука в 2–3 раза, скорость напыляемых частиц материала увеличивают до 800 м/с. Получают

более плотные, чем обычно покрытия, характеризующиеся прочным сцеплением с основным материалом детали.

Необходимо подчеркнуть, что использование сверхзвуковых струй при газотермическом напылении является одним из главных направлений современного развития этой технологии [16, 31, 32]. Повышение скорости и кинетической энергии частиц напыляемого материала позволяет, с одной стороны, улучшить условия формирования покрытий, а с другой — ограничить вредное воздействие окружающей среды и снизить интенсивность процессов термического разложения материалов.

В мировой практике сверхзвуковое плазменное напыление реализуют с помощью установок «Plazjet-II-200». В качестве рабочего газа используют азот или смесь азота с водородом и аргоном [31]. При мощности установки 200 кВт температура струи достигает 6600 °С, скорость частиц в 6–8 раз выше, чем при обычном напылении. Расход порошка составляет до 12 кг/ч оксида алюминия и 40 кг/ч карбида вольфрама.

Специалистами Института электросварки им. Е. О. Патона и Института газа разработаны технология и оборудование для сверхзвукового напыления с использованием плазмы продуктов сгорания углеводородных газов с воздухом [16, 31]. Плазмотрон генерирует слаборасширенную струю плазмы продуктов сгорания со степенью недорасширения 1,1–3,0 м и скоростью истечения до 3000 м/с. Измерения показали, что скорость частиц на дистанции напыления 250–300 мм в случае использования порошка WC-12 Co составила 480 м/с, оксида алюминия — 420 м/с, оксида хрома — 430 м/с, железоникелевого сплава — 500 м/с.

Существует возможность регулировать температуру в пределах 3500–6500 К, что позволяет эффективно напылять как легкоплавкие материалы (алюминий и его сплавы), так и тугоплавкие (например, диоксид циркония). Пористость покрытия на оптимальных режимах составляет 0,5–3,0%, а прочность сцепления — 60–120 МПа. Производительность напыления оксида алюминия достигает 20 кг/ч, а вольфрам-кобальтовых твердых сплавов — 40 кг/ч.

В настоящее время сверхзвуковое плазменное напыление находит все более широкое применение [16]. Технологический процесс нанесения плазменных покрытий в зависимости от условий и типа производства, конструктивных особенностей обрабатываемых изделий и покрытий содержит различные операции и технологические приемы, которые могут быть объединены в следующие группы:

- подготовка поверхности деталей к нанесению плазменных покрытий;
- технология нанесения плазменных покрытий и дополнительная обработка нанесенных покрытий для улучшения их свойств;
- размерная обработка покрытий.

Подготовка поверхности деталей к нанесению плазменных покрытий

Размеры деталей должны быть уменьшены на толщину напыляемых покрытий, которую выбирают, руководствуясь рекомендациями, приведенными в работе [24]. Участок поверхности изделия, подлежащий напылению, должен иметь плавные переходы к примыкающим поверхностям либо соответствующую конфигурацию [24]. Покрытия на пазы и глухие отверстия следует наносить при отношении ширины или диаметра отверстия к его глубине не менее 2 мм.

Степень очистки поверхности деталей от загрязнения во многом определяет качество нанесенных покрытий. Наличие на поверхности грязи, оксидных пленок, масла, уменьшается прочность сцепления покрытия с металлом детали, и это может послужить причиной неисправимого брака. Особое внимание уделяют восстанавливаемым деталям, имеющим почвенные загрязнения, остатки топливно-смазочных материалов, продукты коррозии и др. Очистку производят различными способами: механическим, струйным, погружением, циркуляционным, комбинированным и др.

При подготовке поверхность обезжиривают органическими растворителями, моющими составами, щелочными растворами и эмульсиями по ГОСТ 9–402–80, затем промывают водой. После этого детали сушат в сушильном шкафу при температуре 60–150 °С или обдувают сжатым воздухом.

В отдельных случаях применяют обезжиривание с помощью протирочного материала, смоченного уайт-спиритом или бензином, с соблюдением соответствующих правил промсанитарии и противопожарной безопасности. Детали, содержащие глубокие пазы, масляные каналы и другие места, затрудняющие удаление загрязнений, кроме поверхностного обезжиривания подвергают нагреву в печи при температуре 220–340 °С в течение 2–3 ч для выгорания масла.

Предварительная обработка деталей перед напылением включает также активацию поверхности, которая состоит в создании определенной шероховатости, влияющей на прочность сцепления посредством изменения интенсивности физико-химического взаимодействия контактирующих материалов [24, 33]. Механическое сцепление напыляемых частиц с основой происходит за счет их растекания и заклинивания. Поэтому прочность сцепления во многом определяется параметрами шероховатости поверхности (R_a — среднеарифметическое отклонение профиля микрорельефа; R_z — высота неровностей микрорельефа).

Установлено, что прочность сцепления покрытия при различных способах предварительной обработки основы изменяется. Деформиро-

вание и растекание напыляемых частиц на шероховатой поверхности зависит от топографии поверхности и, прежде всего, от шага неровностей. Если впадина слишком узкая, то напыляемая частица будет затекать в смежную впадину. При слишком широкой впадине малые напыляемые частицы могут не заклиниваться в ней и разбрызгиваться. Покрытие формируется преимущественно в канавках. На выступах образуется слой относительно меньшей толщины.

Активацию поверхности осуществляют различными способами. Однако наиболее распространены пневмоструйная обработка и нарезание рваной резьбы. При пневмоструйной обработке происходит преобразование энергии сжатого воздуха в кинетическую энергию металлической дроби или абразива. Струя дроби или абразива характеризуется скоростью и углом рассеивания. Пространственный угол рассеивания струи дроби при выходе из сопла дробеструйного аппарата является постоянной величиной, составляющей 28–30° [34]. Скорость дроби зависит от скорости энергоносителя (сжатого воздуха), длины разгонного участка сопла, размеров, формы и массы дроби.

Значения предельных скоростей полета дроби при рабочем давлении в сети 0,6 МПа и температуре воздуха +20 °С приведены в табл. 9 [34].

Таблица 9. Скорость полета дроби, м/с, в зависимости от ее диаметра и длины разгонного участка сопла пистолета

Длина разгонного участка сопла, мм	Условный диаметр дроби, мм					
	круглой			колотой		
	1	2	3	1	2	3
10	29,0	20,6	16,8	36,8	26,4	21,3
20	41,0	29,0	23,6	52,0	36,7	29,9
40	58,2	41,0	33,5	74,0	52,0	42,0
60	71,5	50,7	41,7	90,5	64,2	52,2

При прочих равных условиях дробь с меньшей массой имеет большую начальную скорость, равно как и дробь с большим поперечным сечением. При одинаковых значениях давления сжатого воздуха и твердости поверхности ее микропрофиль является функцией вида и размера применяемой дроби. Степень воздействия дробинки или любой другой частицы абразива на поверхность зависит от скорости ее полета и массы.

Параметры технологического процесса пневмоструйной обработки зависят от физико-механических свойств абразива, давления сжатого воздуха, скорости его истечения из сопла, расстояния до обрабатываемой поверхности, а также от физико-механических свойств обрабатываемого материала.

При контакте абразивных зерен с обрабатываемой поверхностью часть их врезается в металл, снимая стружку, вторая — скользит по поверхности, а третья часть зерен, попадая на металлическую поверхность, выдавливает металл в стороны.

На параметры процесса струйно-абразивной обработки влияет концентрация абразивно-воздушной смеси, т. е. отношение массы воздуха, проходящего через сопло в единицу времени, к массе абразива, выбрасываемого соплом за этот период. Концентрация абразивной смеси зависит от зернистости и марки абразива, ее значение может колебаться в пределах 0,8–4,0 кг/кг. Наибольший удельный съем металла получают при высоких концентрациях абразива в струе. Однако большая насыщенность абразивного потока ведет к увеличению изнашивания абразива.

Обычно в качестве абразивных материалов при плазменном напылении используют электрокорунд зернистостью 80–150 по ГОСТ 3647–80 или металлическую дробь ДЧК, ДСК №01, 02, 03, 05 по ГОСТ 11964–81Е.

Интенсивность изнашивания зерен зависит от свойств абразива и обрабатываемой поверхности. Стойкость абразива определяют количеством циклов использования абразивного материала до полной его непригодности. Абразив из стальной рубленой проволоки выдерживает до 5000 циклов. Дробь ДЧК после 150 циклов становится непригодной для дальнейшего использования. Абразив из электрокорунда может быть использован до 30 раз.

Металлическую дробь применяют для обработки материалов с твердостью до 50 HRC₂. Она не пригодна для подготовки поверхности под напыление жаростойких и коррозионно-стойких покрытий, а также для деталей, изготовленных из цветных металлов и сплавов.

Детали, подвергаемые струйно-абразивной обработке, должны иметь комнатную температуру. Шероховатость поверхности после обработки должна быть Rz=10...60 мкм в зависимости от материала детали. Участки поверхности детали, не подлежащие напылению, должны быть защищены экранами или другими приспособлениями. Зона обработки должна быть на 5±2 мм больше зоны напыления. При толщине стенки детали менее 0,5 мм необходимо применять специальные приспособления и соблюдать меры предосторожности, исключающие чрезмерное снятие материала детали и ее коробление. После абразивно-струйной обработки деталь обдувают сжатым воздухом для удаления частиц абразива. Угол атаки струи абразива (угол между осью струи абразива и плоскостью очистки) изменяют от 30 до 90°. Для очистки поверхности мягких материалов рекомендуют меньшие значения угла, а для очистки поверхности более твердых — большие.

При давлении воздуха 0,3–0,6 МПа расстояние от среза сопла струйно-абразивного пистолета до обрабатываемой поверхности составляет 80–200 мм. Большие значения рекомендуют для мягких поверхностей, меньшие — для более твердых. Обрабатываемая поверхность должна быть матовой, серого цвета без блестящих участков.

Перерыв между струйно-абразивной обработкой и нанесением покрытий не должен превышать 2–4 ч, а при напылении быстроокисляющихся поверхностей, например алюминия, — не более 1 ч. Детали после струйно-абразивной обработки перемещают в хлопчатобумажных перчатках или чистым инструментом.

При подготовке поверхности деталей типа тел вращения под нанесение покрытий значительной толщины (более 0,5 мм) часто используют нарезание рваной резьбы. Такой способ подготовки поверхности обеспечивает высокую прочность сцепления при сдвиге покрытия с поверхности детали. Резьбу нарезают обычным резьбовым резцом с верхним углом 55–60°. Высота угла имеет радиус закругления 0,3–0,5 мм. Угол резания 80°, а передний угол резца отрицателен или равен нулю. Резец устанавливают в резцедержателе с вылетом 100–150 мм. Необходимую шероховатость получают за счет смещения режущей кромки резца ниже оси детали.

Вибрация резца вызывает дробление металла на обрабатываемой поверхности, что приводит к шероховатости. Шаг рваной резьбы выбирают в зависимости от диаметра обрабатываемой детали: при диаметре до 20 мм — 0,5 мм; 25–50 мм — 0,8–1,0 мм; 60–100 мм — 1,5 мм. При нарезке нельзя применять охлаждающие жидкости. Рваную резьбу нарезают за один проход. Параметры рваной резьбы подбирают экспериментальным путем для каждого материала и толщины напыляемого покрытия.

Существуют и другие способы механической обработки поверхности перед напылением деталей [24].

Технология нанесения и обработки плазменных покрытий

При выборе порошковых материалов для получения различных плазменных покрытий необходимо учитывать следующие положения.

Гранулометрический состав применяемых порошковых материалов имеет первостепенное значение, так как от него зависят производительность и коэффициент использования, а также свойства покрытий. Размер частиц порошка выбирают в зависимости от характеристик источника тепловой энергии, теплофизических свойств напыляемого материала и его плотности.

Обычно при напылении мелкодисперсного порошка получают более плотное покрытие, хотя в нем содержится большое количество оксидов, возникающих в результате нагрева частиц и их взаимодействия с высокотемпературным потоком плазмы. Чрезмерно крупные частицы не успевают прогреться, поэтому не образуют достаточно прочной связи с поверхностью и между собой или просто отскакивают при ударе. При напылении порошка, состоящего из смеси частиц разных диаметров, более мелкие частицы расплавляются в непосредственной близости от места их подачи в сопло, заплывают отверстие и образуют наплывы, которые время от времени отрываются и в виде больших капель попадают на напыляемое покрытие, ухудшая его качество. Поэтому напыление предпочтительно следует производить порошками одной фракции, а все порошки перед напылением подвергать рассеиванию (классификации).

Для проведения классификации порошков применяют металлические тканые сетки с квадратными ячейками нормальной точности по ГОСТ 6613–73. Классификация порошков по группам и гранулометрическому составу приведена в табл. 10.

Таблица 10. Классификация порошков по группам и гранулометрическому составу

Класс	Размер частиц, мкм	Остаток на сетке №005, %	Прохождение через сито, %, не менее, при номерах сеток					
			04	0135	02	016	0125	005
К (крупный)	50–135	Не менее 95	100	95	—	—	—	—
С (средний)	50–160	Не менее 95	—	—	100	95	—	—
М (мелкий)	50–125	Не менее 95	—	—	—	100	95	—
П (пыль)	Менее 50	Не более 4	—	—	—	—	—	96

Для керамических материалов оптимальный размер частиц порошка 50–70 мкм, а для металлов — около 100 мкм. Порошки, предназначенные для напыления, должны иметь сферическую форму. Они обладают хорошей сыпучестью, что облегчает их транспортировку к плазматрону.

Почти все порошки гигроскопичны и могут окисляться, поэтому их хранят в закрытой таре. Порошки, находившиеся некоторое время в открытой таре, перед напылением прокаливают в сушильном шкафу из нержавеющей стали слоем 5–10 мм при температуре 120–130 °С в течение 1,5–2 ч.

Порошок для напыления выбирают с учетом условий эксплуатации напыляемых деталей [24]. Области практического применения порошков для плазменного напыления, выпускаемых НПО «Тулачермет» и Торезским заводом наплавочных твердых сплавов (ТЗНТС), приведены в табл. 11.

Таблица 11. Примеры практического применения порошковых газотермических покрытий

Марка, тип	Пример использования
НПО «Тулачермет»	
Никель-алюминий ПН70Ю30	Защита экранных труб котельных агрегатов ГРЭС и ТЭЦ, деталей термического и металлургического оборудования, работающего в воздушной среде (до 1400 °С). Износостойкие покрытия в некоторых парах трения. В композициях с оксидами обеспечивает получение теплозащитных покрытий
Никель-алюминий ПН35Ю15	Упрочнение подъемных шиберов холодильников прокатных станков, восстановление и упрочнение деталей и узлов автомобилей. Жаростойкие покрытия, работающие на воздухе до 1100 °С. Хорошо шлифуются, можно обрабатывать точением. Стойкие в щелочах. Хорошая износостойкость в некоторых парах трения, отлично работает в парах трения с чугуном
Никель-титан ПН55Т45	Восстановление и упрочнение защитных втулок и валов гидронасосов, поверхностей типа плунжеров, штоков, упрочнение уплотнительных поверхностей валов щелочных насосов. Подслой для последующего напыления сталей и керамических материалов. Износостойкие покрытия, работающие в условиях изнашивания без ударных нагрузок, в условиях трения при наличии смазки. Коррозионно-стойкие в щелочных средах (как правило в сочетании с полимерными материалами)
Никель-титан ПТ88Н12	Износостойкие покрытия. Коррозионно-стойкие покрытия в сочетании с лакокрасочными, полимерными материалами. Упрочнение втулок насосных штанг, поршневых штоков грязевых насосов, вкладышей, полированных стержней
Титан-алюминий ПТ65Ю30	Жаростойкие покрытия на воздухе. Упрочнение выхлопных глушителей, поддоны для отжига, наружные поверхности вращающихся обжиговых печей
Самофлюсующиеся сплавы ПР-Н80Х13С2Р, ПР-Н77Х15С3Р2, ПР-Н73Х16С3Р3, ПР-Н70Х17С4Р4,	Восстановление и упрочнение клапанов и распределительных валов двигателей внутреннего сгорания, лопаток, роторов, вентиляторов, валов и втулок гидронасосов, деталей металлургического, горного оборудования, сельскохозяйственных

<p> ПР-Н67Х18С5Р5, ПР-Н65Х25С3Р3, ПР-Н68Х21С5Р </p>	<p> машин и т. д. Беспористые уплотнительные слои на поверхностях арматуры высокого давления энергетических установок. Высокую стойкость к изнашиванию сочетают с коррозионной стойкостью, позволяют эксплуатировать детали в условиях ударных нагрузок и в агрессивных средах с абразивным изнашиванием при температурах до 600 °С. Повышение износостойкости в композиции с высокотвердыми наполнителями: карбидами, боридами, оксидами и т. п. </p>
<p>Чугун ПР-НД42СР</p>	<p>Исправление дефектов чугунного литья, восстановление изношенных пресс-форм, исправление дефектов, возникших при обработке</p>
<p>Кобальтовый сплав ПР-К60Х30ВС (ВЗК)</p>	<p>Упрочнение ножей в целлюлозно-бумажной промышленности, гнезд выхлопных клапанов ДВС, клапанов высокотемпературных систем высокого давления, матриц для экструзионных прессов и других деталей машин, работающих в условиях высокотемпературного нагрева. Высокая стойкость против стирания, повышенная коррозионная стойкость и износостойкость при высоких температурах, высокая твердость</p>
<p>Высоколегированные стали: ПР-Х18Н9, ПР-06ХН28МДТ ПР-10Р6М5, ПР-М6Ф3</p>	<p>Пористые изделия для фильтрации агрессивных жидкостей и газов. Коррозионно-стойкие покрытия</p>
<p>ПР-Х18ФНМ</p>	<p>Плазменная наплавка штампового инструмента, работающего в условиях интенсивного изнашивания при ударных нагрузках, упрочнение рабочих поверхностей режущего инструмента, валков холодной прокатки и др.</p>
<p>ПР-Х18ФНМ</p>	<p>Упрочнение рабочих поверхностей пресс-инструмента при изготовлении деталей из пластмасс и др.</p>
<p>Высоколегированные чугуны: ПГ-С27, ПГ-С1, ПГ-УС25, ПР-ЧН15Д7</p>	<p>Детали металлургического, сельскохозяйственного, энергетического, горного и другого оборудования, работающего в условиях абразивного изнашивания при температурах до 500 °С. Высокая износостойкость при повышенных температурах и в коррозионных средах</p>
<p>Композиционные терморреагирующие сплавы: Ni-Al — ПТ-Ю5Н, ПТ-Ю10Н</p>	<p>Подслои при напылении металлических, керамических и других покрытий, восстановление посадочных мест при ремонте. Высокая коррозионно- и жаростойкость, умеренное сопротивление изнашиванию и хорошее сопротивление ударным нагрузкам. Упрочнение валов сервомоторов, качающихся балансирных рычагов,</p>

<p>NiCrBSi-Al — ПТ-ЮНХ15СР2, ПТ-ЮНХ15СР3</p>	<p>гильз цилиндров, статоров компрессоров в РД, седел выхлопных клапанов Восстановительный ремонт, поверхностное упрочнение деталей машин. Упрочнение подшипников для рулей, валов роторов, роторов топливных насосов, коленвалов амортизаторов для штамповых прессов, поршневых колец ДВС. Наносят через подслои (ПТЮ5Н). Коррозионно-стойкие, хорошо сопротивляются изнашиванию и ударам</p>
<p>Бронзы Пр-Бр.АЖНМц, Пр-Бр.АЖНМц 8,5-1,5 — 5-1,5</p>	<p>Упрочнение вилок коробок передач автомобиля, баббитовых подшипников, патрубков гидравлических прессов, колодок упорных подшипников, направляющих поршней, напыление на детали из конструкционных сталей, работающие в морской воде. Антифрикционные, износостойкие в условиях смазки маслом</p>

ТЗНТС

<p>Самофлюсующиеся сплавы NiCrBSi: ПГ-12Н-01</p>	<p>Упрочнение и восстановление поршней, валов, муфт насосов, направляющих лопаток, прессформ и пуансонов в стекольном производстве деталей ДВС. Напыление на детали из простых и нержавеющей сталей и чугунов. Достаточно низкий коэффициент трения. Хорошо обрабатывается резанием.</p>
<p>ПГ-12Н-02</p>	<p>Упрочнение и восстановление валов и пуансонов в стекольном производстве, поршней насосов, прокатных валов, направляющих роликов, острий поддерживающих конусов, уплотнительных колец аппаратуры высокого давления, деталей запорной аппаратуры в гидро- и газопроводах. Напыление на детали из простых и нержавеющей сталей и чугунов. Хорошо противостоит трению металла о металл, отличное сопротивление коррозии и термическим ударам.</p>
<p>Механическая смесь самофлюсующегося сплава (65%) с карбидом вольфрама (35%) ПС-12НВК-01</p>	<p>Пары трения металл с металлом, лопасти смесителей для перемешивания абразивных сред, пуансоны прессов для керамики, транспортировочные и прессовые шнеки для кирпичного производства, отрезные ножи в стекольном производстве. Простые и легированные стали и чугуны. Износостойкие при стирании и эрозии в коррозионных средах. Допустимая рабочая температура не выше 700 °С. Обрабатывается шлифованием.</p>

Композиционные терморегулирующие сплавы: Ni-Al —

ПТ-НА-01

NiCrBSi-Al —

ПТ-19Н-01

Бронза ПГ-19М-01

Композиционные WC-Ni, Cr₃C₂-Ni сплавы
ВН-10, ВН-20, ВН-30,
КХН-15, КХН-30

Подслои. Упрочнение воздушной заслонки компрессора РД, пластин и ребер жесткости клапана вентилятора в РД, крепления середины пролета (лопасти вентилятора), центра и задней бабки токарных и шлифовальных станков.

Восстановление поршней гидравлических домкратов, шпинделей станков, опорных поверхностей, коленвалов и распредвалов. Коррозионно-стойкие, хорошо сопротивляются стиранию, устойчивы к фрикционному изнашиванию при трении металла о металл. После шлифования отличное состояние поверхности.

Восстановление поршней компрессоров, цапф различных машин и агрегатов, посадочных мест валов и осей, шпинделей станков. Низкий коэффициент трения

Детали машин и механизмов, работающие в условиях фреттинг-коррозии и абразивного изнашивания при обычных и повышенных (до 600 °С) температурах. Направляющая закрылка самолета, статор компрессора

В мировой практике для газотермического напыления производят и применяют множество других марок и типов порошков [24].

В последние годы для получения аморфизированных газотермических покрытий разработаны специализированные порошки на никелевой и железной основах [35]. Аморфные газотермические покрытия получают способами плазменного, детонационного и газопламенного напыления. Эти покрытия отличаются повышенными значениями прочности сцепления с подложкой, износо- и коррозионной стойкостью. Установлено, что прочность сцепления у покрытий из сплавов Fe₆₇Ti₇B₂₄C₂, Ni₄₅Mo₂₀Cr₂₅B₁₀ и Fe₄₀Ni₄₀B₂₀, нанесенных плазменным способом на подложку из низколегированной стали, достигает 40–60 МПа. При этом долговечность деталей гидросистемы экскаваторов (валы масляных насосов, золотники) с аморфными плазменными покрытиями из сплавов на основе железа, а также деталей станков и металлообрабатывающего оборудования (направляющие, кулачки цанг, шпиндели, стержни хонинговальной головки) с аморфными детонационными и плазменными покрытиями повышается в 1,5–2,5 раза.

Высокая стойкость аморфных покрытий против изнашивания и коррозии обеспечивает повышение долговечности плунжеров бурового оборудования в 1,6–2,1 раза, насосных штанг нефтеперерабатывающего оборудования — в 2,5 раза [35].

В 1,9 раза возрос срок службы деталей центробежного насоса для перекачки технологических растворов, содержащих хлор-ионы (валы, рабочие колеса, корпуса), после их восстановления плазменным напылением порошка ПГ–Ж1 [35].

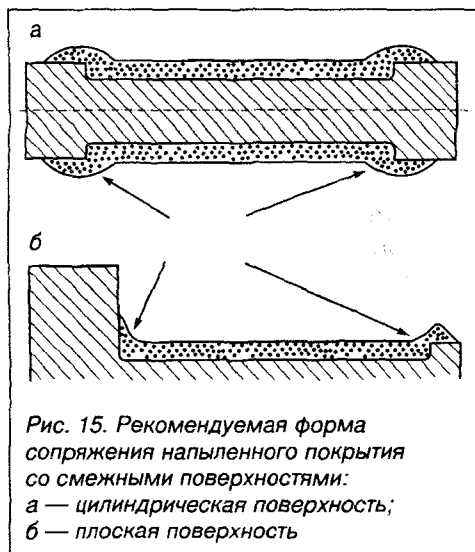
С целью снижения себестоимости покрытий и экономии никелевых и кобальтовых сплавов в последние годы для газотермического напыления используют порошки, полученные из стружки серого чугуна [36, 37]. Установлено, что в процессе воздушно-газового плазменного напыления покрытий из порошка серого чугуна СЧ20, полученного измельчением стружки, происходит образование в структуре покрытия метастабильного ϵ -карбида, мартенсита, остаточного аустенита, способствующих повышению микротвердости в 2,2–2,4 раза по сравнению с чугуном в литом состоянии.

Добавки сплава ПГ–Ж5 и бронзы к порошку серого чугуна уменьшают на 20–40% уровень растягивающих остаточных напряжений. При этом покрытия характеризуются высокой прочностью сцепления (40–60 МПа), по газоабразивной износостойкости в 1,2–2,2 раза превышают плазменные покрытия из никелевого сплава ПГ–10Н–01, а по абразивной — в 1,4–3,4 раза термообработанную сталь 45.

Плазменное напыление порошков на основе серого чугуна позволило повысить износостойкость коленчатых валов двигателей ВА3–2101 и М–412 в 1,1–1,4 раза, валов масляных насосов двигателей СМД–14 — в 1,5–1,75, распределительных валов двигателей ЗИЛ–508.10 — в

1,2–1,6, клапанов распределительного механизма двигателя ЗМЗ–53 и барабанов тормозов трактора Т–150К — в 1,5–1,7 раз.

Технологический процесс плазменного напыления требует выполнения ряда подготовительных операций. Механическую обработку деталей под напыление осуществляют с учетом обеспечения требуемой формы сопряжения напыленного покрытия со смежными поверхностями (рис. 15). Поверхности деталей, не подлежащие напылению, защищают от попадания на них напыляемого материала с помощью асбестовых или металлических экранов, масок, а также специальных обмазок.



Перед нанесением покрытия деталь обдувают сжатым воздухом в течение 5–10 с. Для удаления адсорбированной влаги и уменьшения внутренних напряжений деталь перед напылением подогревают плазмотроном до 150–180 °С.

Дистанцию напыления определяют опытным путем. Она зависит от порошка, режима напыления, конструктивных особенностей обрабатываемого изделия и обычно составляет 100–150 мм. Скорость перемещения струи относительно изделия составляет 3–15 м/мин, а окружная скорость вращения изделия — 10–15 м/мин. Ось сопла плазмотрона должна быть направлена по отношению к напыляемой поверхности под углом 60–90°, в стесненных условиях — не менее 45°.

В процессе напыления плазменная струя должна быть устойчивой, без пульсаций. С помощью регулятора расхода газа, порошка и других устройств обеспечивают равномерную подачу порошка без наращивания порошка на наружной поверхности анода и закупорки отверстия для ввода порошка. После этого включают систему перемещения детали, а затем плазмотрона, и наносят покрытие. Необходимую толщину покрытия получают многократным повторением циклов напыления перемещением плазмотрона относительно напыляемой поверхности детали или их взаимного перемещения с перекрытием полос напыления на одну треть диаметра пятна напыления.

После окончания процесса нанесения покрытия изделие снимают с приспособления, не допуская повреждения покрытия. Экраны-маски и другие защитные приспособления снимают после охлаждения изделия до комнатной температуры так, чтобы не повредить покрытие.

В табл. 12 приведены ориентировочные режимы напыления различных порошковых материалов при использовании в качестве плазмообразующих газов аргона и азота. Кроме традиционных двухкомпонентных смесей, содержащих рабочий и защитный компоненты водород-аргон, водород-азот, применяют многокомпонентную смесь воздуха с углеводородными газами, т. е. смесь системы C–N–O–H (воздух-пропан-бутан, воздух-метан) [16, 38].

В этих смесях кислород воздуха, который нежелателен при напылении многих материалов, при нагреве смеси теплом плазменной дуги связывается с углеродом углеводородного газа в термически стойкий оксид углерода. В то же время водород, добавляемый к инертным газам в количестве 10–20% по объему для повышения энтальпии и теплопроводности плазмы, обычно освобождается в процессе химической реакции в плазмотроне. Количество водорода, как и восстановительного потенциала среды в целом, регулируют изменением исходного соотношения газ-воздух. Такие смеси являются относительно дешевыми и

Таблица 12. Режимы напыления различных порошковых материалов при использовании в качестве плазмообразующих газов аргона и азота

Тип напыляемого материала	Режимы источника питания для:				Расход плазмообразующих газов, м ³ /ч		Расход транс-портирующего газа, м ³ /ч	Давление плазмообразующих газов, МПа		Дистанция напыления, мм	Расход порошка, кг/ч	Коэффициент использования порошка, %
	аргона		азота		аргона	азота		аргона	азота			
	Напря-жение, В	Сила сварочн. тока, А	Напря-жение, В	Сила сварочн. тока, А								
Самофлюсующиеся никелевые сплавы	65-75	450-460	75-85	450-460	3,6-4,0	3,1-3,6	0,5-0,8	0,70-0,78	0,35-0,40	140-160	8,0-10,0	50-55
Сплавы: Ni-Al, Ni-Ti	65-75	430-435	80-85	430-435	3,0-3,6	2,9-3,1	0,6-0,8	0,60-0,70	0,30-0,35	140-155	7,0-9,0	45-50
Бронза	60-70	490-500	74-80	490-500	3,2-3,6	3,0-3,1	0,4-0,7	0,65-0,70	0,30-0,35	140-150	7,5-9,0	55-60
Алюминий	60-60	490-500	74-80	490-500	3,6-4,0	3,1-3,5	0,45-0,75	0,65-0,70	0,30-0,35	140-150	8,0-9,0	60-65

в большинстве случаев вполне конкурентоспособны с двухкомпонентными.

Многокомпонентные смеси позволяют увеличить мощность плазменной струи как за счет горения углеводородного компонента, так и за счет увеличения напряжения на дуге. Установлено, что с повышением содержания углеводородного газа в смеси происходит рост напряжения на дуге. Существенный рост (до 10%) наблюдают при переходе от воздуха к смеси с содержанием углеводородного газа 4,5% и монотонный (0,7-1,5% на каждый процент содержания углеводородного газа) — при возрастании углеводородного газа свыше 9% [38].

В табл. 13 приведены ориентировочные режимы напыления различных порошковых материалов при использовании в качестве плазмообразующего газа смеси воздух-пропан-бутан.

В настоящее время все шире применяют плазменное напыление с использованием сверхзвуковых струй [16, 31, 32]. При этом добавление метана или пропан-бутана к воздуху делает высокотемпературный участок плазменной струи, в котором происходит нагрев и ускорение частиц порошка, более протяженным, а профиль температур и скоростей более заполненным. Скорость частиц порошка Al₂O₃ размером 80 мкм при сверхзвуковом газозвудушном напылении на дистанции 250 и 300 мм составляет 330-500 м/с [16]. При этом гарантированный срок службы анода равен 40-50 ч. Ресурс работы катода с гафниевой вставкой составляет 6-10 ч, с циркониевой — 4-6 ч.

В случае сверхзвукового воздушно-газового плазменного напыления аморфизирующегося сплава Fe-Mo-Cr-Ni-B

Таблица 13. Режимы напыления различных порошковых материалов при использовании в качестве плазмообразующего газа смеси воздуха с пропан-бутаном

Тип напыляемого материала	Режимы источника питания		Расход плазмообразующих газов, м ³ /ч	Расход трансформирующего газа, м ³ /ч	Давление плазмообразующих газов, МПа	Дистанция напыления, мм	Расход порошка, кг/ч	Коэффициент использования порошка, %
	Напря-жение, В	Сила свар. тока, А						
Самофлюсующиеся никелевые сплавы	260-265	235-240	4,0-6,5	0,4-0,9	0,50-0,55	160-230	10,0-20,0	45-50
Сплавы: Ni-Al, Ni-Ti	250-255	240-245	5,0-7,0	0,6-0,9	0,40-0,50	150-200	8,0-10,0	45-47
Бронза	265-270	225-230	5,5-7,0	0,4-0,7	0,45-0,50	160-200	15,0-20,0	53-55
Алюминий	245-250	245-250	5,0-5,5	0,5-0,7	0,40-0,45	140-190	8,5-10,0	57-60

благодаря высокой кинетической энергии частиц происходит их интенсивное расплющивание, что обеспечивает плотный контакт с основой [32]. Это приводит к повышенной степени аморфизации напыленного материала.

При сверхзвуковом плазменном напылении покрытия из различных порошковых материалов характеризуются низкой пористостью (0-3%), высокой прочностью сцепления с основой (до 150 МПа) и повышенной микротвердостью [16].

Возможными дефектами плазменного дугового способа нанесения покрытий является отслоение напыленного слоя, растрескивание покрытия, появление на поверхности крупных капель материала покрытия, капель меди, а также разнотолщинность покрытия (выше допустимой) [24]. Причины образования этих дефектов и способы их устранения приведены в табл. 14.

С целью повышения адгезионной и когезионной прочностей и других качественных характеристик плазменные покрытия подвергают дополнительной обработке различными способами: обкатка роликами под током, очистка напыляемых поверхностей от окалина и удаление слабо сцепленных с основой или с предыдущим слоем частиц металлическими щетками в процессе самого напыления, струйно-абразивная и ультразвуковая обработка и др. [39, 40].

Одним из наиболее распространенных способов улучшения качества покрытий из самофлюсующихся сплавов является их оплавление [41]. Для оплавления используют индукционный или печной нагрев, нагрев в расплавах солей

Таблица 14. Возможные дефекты плазменно-дугового нанесения покрытий и способы их устранения

Дефект	Причины	Способы устранения
Отслоение напыленного слоя	Неправильно подготовлена конфигурация напыляемого участка (острые углы, малые радиусы закругления и т. п.)	Удалить дефектное покрытие, подготовить конфигурацию напыляемого участка в соответствии с требованиями
	Неудовлетворительное качество подготовки поверхности (наличие жировых пятен, малая шероховатость, наличие влаги или масла в сжатом воздухе и т. п.)	Удалить дефектное покрытие, проверить наличие масла и влаги в сжатом воздухе, заменить обезжиривающие средства на свежие, заменить абразив на свежий, повысить давление воздуха при струйно-абразивной обработке, не допускать касания подготовленной поверхности грязным инструментом и руками без перчаток
	Окисление подложки вследствие перегрева и высокие внутренние напряжения	Удалить дефектное покрытие, усилить охлаждение подложки при напылении, по возможности увеличить дистанцию напыления, снизить электрическую мощность, увеличить скорость перемещения горелки (или изделия), уменьшить толщину покрытия
	Большая разность коэффициентов термического расширения основы и покрытия	Удалить дефектное покрытие, ввести операцию напыления подслоя
Растрескивание покрытия	Высокие внутренние напряжения в покрытии	Брак неустраним. Усилить охлаждение подложки при напылении, по возможности увеличить дистанцию напыления, снизить электрическую мощность, увеличить скорость перемещения горелки (или изделия), уменьшить толщину покрытия, наносимого за один проход
Появление на поверхности крупных капель материала покрытия	Нарастивание материала покрытия на внутренней стенке сопла-анода	Брак неустраним. Отрегулировать расход транспортирующего газа и порошка таким образом, чтобы обеспечить устойчивость струи напыляемого материала
Появление капель меди на покрытии	Повышенная эрозия сопла-анода в результате его изнашивания или ухудшения водяного охлаждения	Брак неустраним. Проверить центровку электродов и расход охлаждающей воды, в случае его падения устранить причину
Разнотолщинность покрытия (выше допустимой)	Неравномерная подача напыляемого материала	Брак неустраним. Отрегулировать работу порошкового питателя и расход транспортирующего газа
	Неравномерное перемещение плазменной струи относительно поверхности напыления	Брак неустраним. Отрегулировать работу системы перемещения плазмотрона и изделия

или металлов, плазменный, газопламенный, лазерный и др. В большинстве случаев предпочтение отдают нагреву в индукторах токами высокой частоты (ТВЧ). Напыленные покрытия системы Ni–Cr–B–Si–C подвергают оплавлению при 920–1200 °С с целью уменьшения исходной пористости, повышения твердости и прочности сцепления с металлом — основой.

Размерная обработка покрытий

Размерную механическую обработку плазменных покрытий осуществляют точением и шлифованием. Обработка напыленных покрытий имеет следующие специфические особенности. Во-первых, при обработке деталей с покрытием вследствие разных коэффициентов термического расширения покрытия и основного материала и особенностей структуры возникает напряженное состояние. Во-вторых, различные теплофизические свойства материала и покрытия изменяют картину распространения тепловых потоков. В-третьих, слоистое строение материала покрытия, наличие оксидных включений и слабость межчастичных связей определяют специфическую природу физико-химических явлений в зоне контакта инструмента и обрабатываемого покрытия. Поэтому при точении предпочтительно использовать твердосплавные резцы с закругленной вершиной резца.

Шлифование применяют для многих плазменных покрытий. Наибольшие трудности при шлифовании газотермических покрытий связаны с быстрым «засаливанием» шлифовальных кругов. Для повышения качества обработанной поверхности выбирают шлифовальные круги из нормального электрокорунда Э зернистостью 36–46, на керамической связке К, среднемягкой твердости СМ. Режимы резания: скорость круга $v_k=25...30$ м/с; скорость детали $v_d=10...20$ м/мин; подача детали $S_d=0,015...0,03$ мм/дв.х; подача круга $S_k=5...10$ мм/об.

В целях продления срока службы шлифовальных кругов и во избежание возникновения перегрева контактируемых поверхностей и образования пыли необходимо в большинстве случаев применять различные охлаждающие смазки. Это особенно важно при использовании шлифовальных кругов на основе карбида кремния, корунда и алмаза. Рекомендуемые смазки: шлифовальные водно-масляные эмульсии и водные растворы.

Карбидокремниевыми шлифовальными кругами можно обрабатывать покрытия с твердостью до 63 HRC₃. Эффективность шлифования этими кругами внешних поверхностей вращающихся деталей повышается при использовании относительно узких кругов, ширина которых не должна превышать 8–10% диаметра круга.

При обработке покрытий, обладающих низким сопротивлением резанию, рекомендуют применять круги белого электрокорунда. Рекомендуемые режимы резания для круга ПП 600×63×305 ЭБ СМ1–6К: $v_k=20$ м/с, $v_d=3$ м/мин, $S_d=0,03$ мм/дв.х, $S_k=0,3$ м/мин.

Покрытия из никелевых самофлюсующихся сплавов, имеющих твердость 58–64 HRC₃, обрабатывают кругами из зеленого или черного карбида кремния, например ППТ 600×63×305 КЗ 80–50 СМ1–6К. При этом предварительное шлифование производят на режиме: $v_k=20$ м/с, $v_d=12$ м/мин, $S_d=0,03$ мм/дв.х, $S_k=0,6$ м/мин, а окончательное выполняют на режиме $v_k=30$ м/с, $v_d=17$ м/мин, $S_d=0,03$ мм/дв.х, $S_k=0,3$ м/мин.

Наиболее оптимальным при обработке покрытий из самофлюсующихся сплавов, отличающихся большим сопротивлением резанию, является использование алмазных кругов для предварительного шлифования — АПП Б–100 АСО 160/125 и окончательного — АПП Б–100 АСО 50/40 (80/63) при $v_k = 10$ м/с, $v_d = 3$ м/мин, $S_d = 0,05$ мм/дв.х, $S_k = 0,5$ м/мин.

Обычно после механической обработки напыленного слоя допускаются поры и шлаковые включения размером менее 1 мм, общее число пор и включений не должно быть более пяти и расстояние между ними не менее 5 мм на площади 250×250 мм. Не допускаются местные отслоения напыленного материала, поры и шлаковые включения размером более 2 мм. В случае появления дефектов на обработанной напыленной поверхности (трещин, сколов, «чернот», рисок, следов резца) деталь возвращают на повторное восстановление по всей технологической цепочке. При занижении размера детали ее также возвращают на повторное восстановление.

В случае исправления дефектов необходимо учитывать, что их исправление допускается ограниченное число раз (в основном, не более одного раза), при этом участок вновь покрываемой поверхности должен быть расширен на 10–15 мм по всему периметру. Кроме того, при местном исправлении дефектов вновь нанесенное покрытие должно перекрывать первоначальное на 4–6 мм по всему периметру исправляемого участка.

Области применения плазменного напыления

В авиационной промышленности плазменные покрытия наносят на сочленения, лопатки турбины и компрессора реактивного двигателя, на цапфы и шасси, несущие конструкции и гидроэлементы; в машиностроении — на пресс-формы для литья под давлением, разъемные и неразъемные матрицы для прессования и экструзии, рольганги станков, индукторы для пайки, направляющие станков, втулки уплотнений,

шнеки, коленчатые валы, шкворни, поршни и цилиндры двигателей; в энергетике — на различные узлы генераторов и топливных элементов, лопатки дымососов, на теплоизоляцию теплонапряженных узлов; в металлургии — на дроссельные заслонки и фурмы доменных печей, огнеупоры, тигли для плавки; в химической промышленности — на клапаны, седла клапанов, крыльчатки и оси насосов, втулки, кольца, детали конденсаторов-холодильников, емкости; в нефтяной и угольной промышленности — на рабочие колеса, втулки и другие детали буровых насосов, торцы колонковых труб, ковши экскаваторов и транспортеров.

Плазменное напыление многие годы применяют также в электронике, радио- и приборостроении, ракетостроении и строительстве. Технологический процесс плазменного напыления позволяет не только наносить различные покрытия, но и изготавливать изделия, состоящие из одного или нескольких напыленных материалов или слоев [42, 43, 44]. При этом напыление производят на специально изготовленные формы и модели, называемые оправками, которые придают напыляемым материалам заданную конфигурацию и размеры. После напыления изделия извлекают из формы или снимают с оправки. Учитывая специфические особенности и свойства напыленных материалов, изделия могут конструктивно усиливать цельнометаллическим каркасом, арматурой и др. Этот способ особенно перспективен при мелкосерийном производстве сложнопрофильных пресс-форм для обработки пластмасс с развитой геометрией поверхности (мебель, автомобильная фурнитура, детские игрушки, обувные подошвы, медицинские протезы, художественные изделия и др.) [44].

В настоящее время все более широко применяют плазменное напыление с использованием в качестве плазмообразующего газа смеси воздуха с горючим углеводородным газом (метаном, пропан-бутаном). Представлена технология восстановления коленчатых валов автомобилей с использованием пропан-воздушной плазмы [45]. Подслой напыляли порошком ПН-70Ю30, а рабочий слой — ПН-55Т45. Размер напыляемых частиц 60–100 мкм. Напыление осуществляли на следующих режимах: напряжение на дуге 190–220 В; сварочный ток 180–230 А; расход плазмообразующего воздуха 7,5–9,0 м³/ч, пропана — 0,8–1,5 м³/ч; дистанция напыления 110–120 мм. Ресурс работы восстановленных коленчатых валов автомобиля ГАЗ-53 был не ниже новых и составил не менее 100 тыс. км пробега.

Хорошие результаты дает плазменное газозоудушное напыление применительно к нанесению бронзовых покрытий [46]. Детали автогидроподъемников, выполненные из сталей марок 35 и 45, напыляли порошком ПГ-19М-01 (основа — медь, алюминий — 9,5%, железо —

до 4,0%). Толщина напыляемого покрытия составила 2,0–2,5 мм, рабочего слоя после проточки — 1,5–1,8 мм. При этой технологии удалось без снижения эксплуатационных характеристик узлов трения достигнуть существенной экономии цветных металлов и одновременно повысить производительность труда.

Плазменное газозвдушное напыление на околозвуковых скоростях истечения позволяет получать алюмокерамические покрытия с улучшенными служебными свойствами [16]. При этом фракционный состав алюминиевого и керамического порошков, параметры их ввода в плазменную струю выбирают таким образом, чтобы максимально снизить в полете дробление наплавленных частиц, а также повысить столкновение и коагуляцию алюминиевых частиц с керамическими.

При напылении формируется плотное с хорошим сцеплением покрытие. Благодаря наличию частиц керамики в мягкой матрице алюминия многократно повышается механическая прочность и износостойкость покрытия. Указанное покрытие обеспечивает более чем двухкратное улучшение коррозионной стойкости по сравнению с алюминиевыми, полученными электродуговой металлизацией и газопламенным напылением.

Промышленная технология нанесения алюмокерамических покрытий на трубы диаметром 100–1200 мм внедрена на ряде промышленных предприятий. Плазменное сверхзвуковое напыление используют при изготовлении катализаторов для комплексной очистки отработанных автомобильных газов [16, 47].

Глава 3. Оборудование для плазменного упрочнения и напыления деталей _____

Технологические процессы плазменного упрочнения и нанесения плазменных покрытий реализуют на рабочих местах и участках, укомплектованных основным и вспомогательным оборудованием. К основному относят оборудование для подготовки поверхностей деталей, установки и камеры для упрочнения и напыления, к вспомогательному — оборудование для подготовки порошков, контроля деталей после упрочнения и напыления, рампы для централизованной подачи газов, накопительное оборудование.

Следует выделить три группы основного оборудования для плазменного упрочнения и напыления: установки и полуавтоматы для струйно-абразивной обработки деталей; установки (аппараты) для плазменного упрочнения и напыления; полуавтоматы для плазменного напыления.

Установки и полуавтоматы для струйно-абразивной обработки деталей

Эта группа оборудования предназначена для образования шероховатой поверхности деталей под плазменное напыление в условиях мелкосерийного и ремонтного производств [48, 50].

При струйно-абразивной обработке энергия сжатого воздуха преобразуется в кинетическую энергию потока абразивных частиц. Для этого используют аппараты двух систем: нагнетательной и всасывающей.

В аппаратах нагнетательного типа абразив из питательного бункера через клапан периодически подается в камеру, находящуюся под давлением сжатого воздуха. Из камеры абразив поступает в смеситель, где подхватывается потоком воздуха, поступающего из магистрали по трубопроводу. Смесь воздуха с абразивом поступает к соплу и затем в виде струи направляется на обрабатываемую поверхность.

В аппаратах всасывающего типа (рис. 16) струя воздуха, выхо-

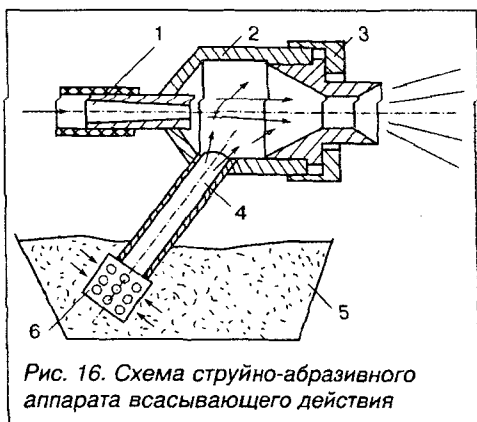
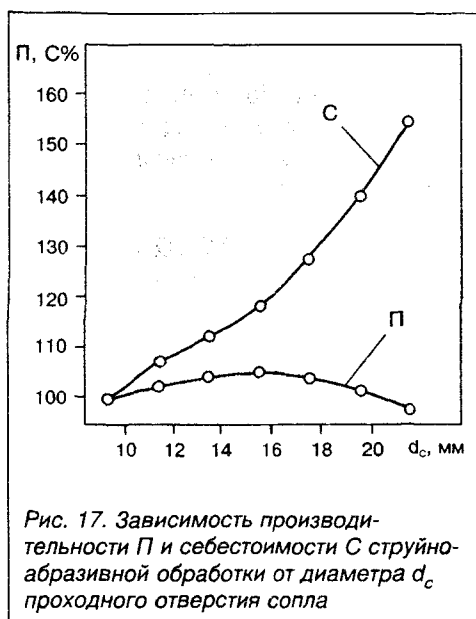


Рис. 16. Схема струйно-абразивного аппарата всасывающего действия

дящая из сопла 1, создает в камере-смесителе 2 и патрубке 4 разрежение, в результате чего в патрубок через отверстие в насадке 6 засасывается атмосферный воздух, перемещающий абразив из бункера 5 в смеситель. Абразив подхватывается потоком воздуха из сопла 1, направляется в сопло 3 и из него в виде воздушно-абразивной струи подается на обрабатываемую поверхность.

Аппараты всасывающего типа имеют более простую конструкцию, надежны в работе, но несколько менее производительны, чем аппараты нагнетательного типа. Производительность аппаратов всасывающего типа зависит от давления воздуха и величины диаметра проходного отверстия сопла [49].

На рис. 17 показана зависимость производительности Π и себестоимости C струйно-абразивной обработки от диаметра d_c проходного отверстия сопла. Максимальную производительность обеспечивают сопла диаметром 16 мм. Однако в связи с увеличением расхода воздуха себестоимость операции увеличивается примерно на 18%. Дальнейшее увеличение диаметра сопла до 22 мм приводит к снижению производительности при существенном росте затрат. Следовательно, если при выборе сопла в качестве критерия принять производительность, то в рассматриваемом случае оптимальным будет диаметр сопла 16 мм, а если принять экономичность — 10 мм.



Установки струйно-абразивной обработки выпускают в виде камер, обычно включающих следующие основные узлы: струйный аппарат, систему сбора, регенерации и подачи абразива на повторное использование, систему подготовки воздуха (регулирование давления, осушка и очистка от масла), вентиляцию и средства механизации для подачи и установки очищаемых деталей в требуемое положение.

ОАО «Украинский конструкторско-технологический институт сварочного производства» разработало и изготавливает несколько типов установок для струйно-абразивной обработки, имеющих различный уровень механизации и автоматизации.

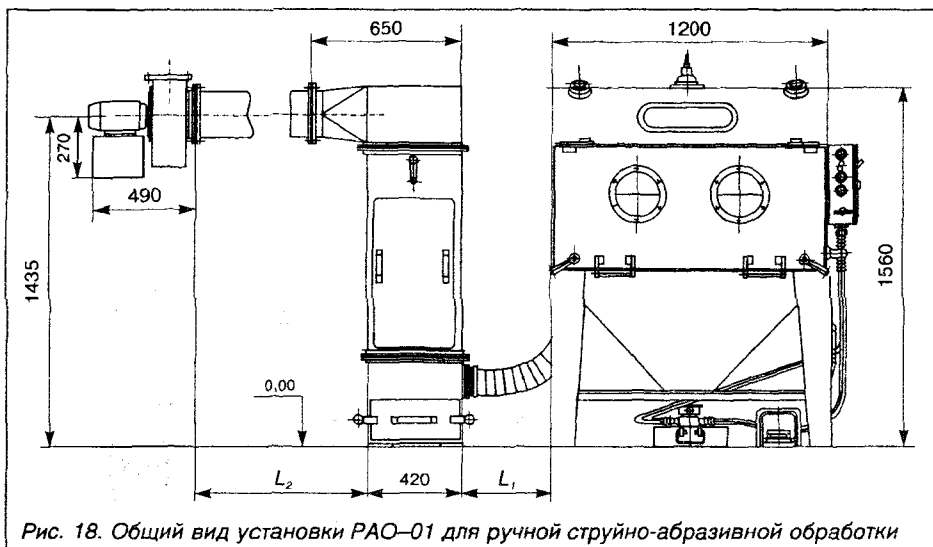


Рис. 18. Общий вид установки PAO-01 для ручной струйно-абразивной обработки

Установка PAO-01 для ручной абразивной обработки (рис. 18) представляет собой герметично закрытую камеру с бункером, рабочим столом, струйным аппаратом, вытяжной системой вентиляции и пультом управления. На передней части камеры имеются дверцы для загрузки и выгрузки деталей и пульт управления измерительными приборами. Наблюдение и контроль за процессом струйно-абразивной обработки осуществляют через застекленное смотровое окно. Внутри камеры расположены поворотный столик и подвеска с абразивным пистолетом.

Техническая характеристика установки PAO-01

Потребляемая мощность, кВт, не более	1,8
Давление сжатого воздуха на входе, МПа, не менее	0,5
Максимальные размеры обрабатываемых деталей, мм	1000×600×360
Максимальная масса обрабатываемых деталей, кг	60
Габаритные размеры, мм, не более	2200×1200×1700
Масса, кг, не более	300

В состав полуавтоматов для струйно-абразивной обработки 487Р (рис. 19) и 2201П (рис. 20) входят струйно-абразивная камера, станина с приемными бункерами, система подачи абразива и подготовки воздуха, а также струйный аппарат. Внутри камеры расположены патрон и задняя бабка с направляющими для крепления обрабатываемой детали, а также два пистолета. Манипулятор перемещения пистолетов и привод вращения детали вынесены за пределы камеры, что повышает надежность

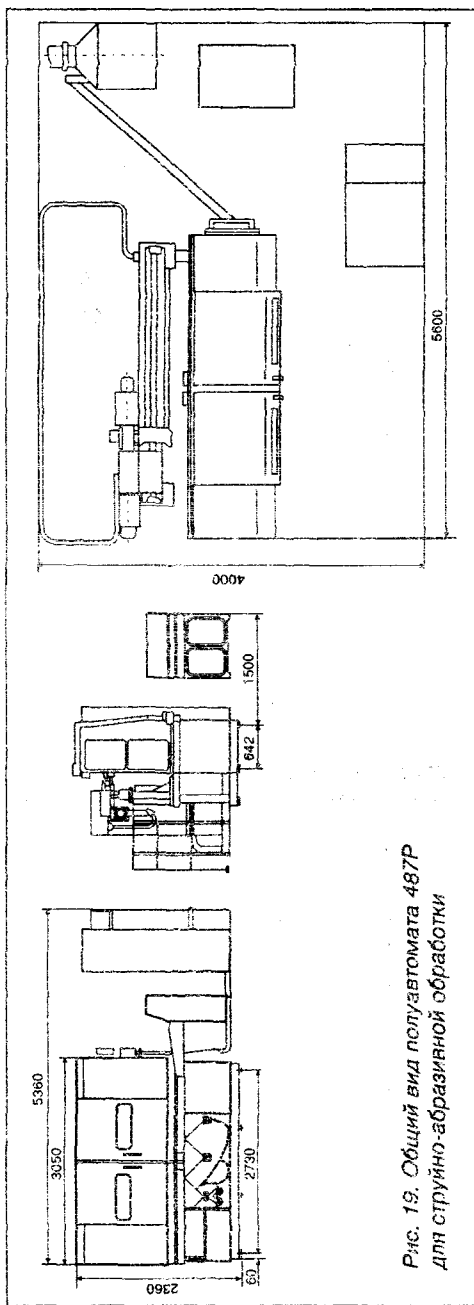


Рис. 19. Общий вид полуавтомата 487Р для струйно-абразивной обработки

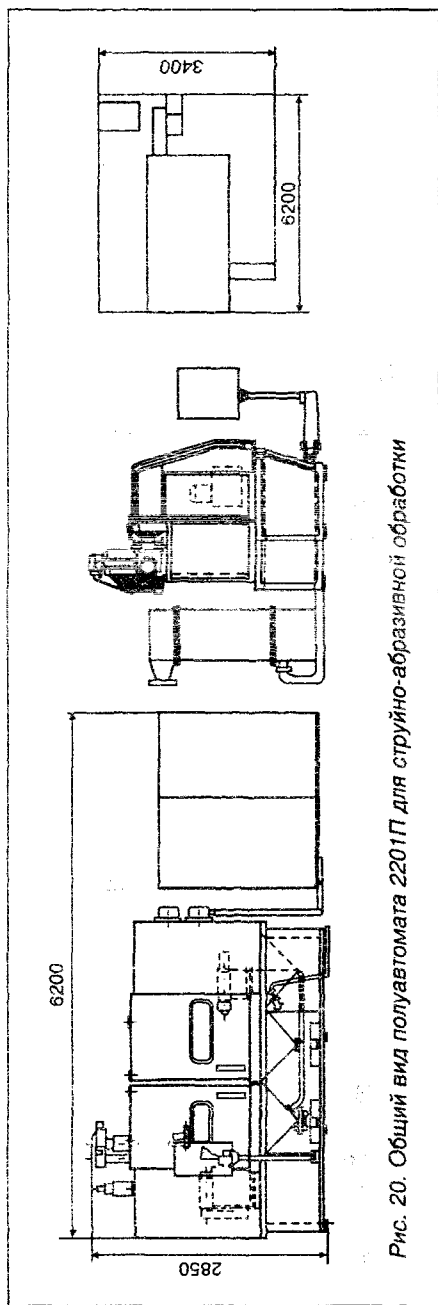


Рис. 20. Общий вид полуавтомата 2201П для струйно-абразивной обработки

оборудования, обеспечивает удобство обслуживания и эксплуатации. Полуавтомат 2201П укомплектован системой программного управления.

Техническая характеристика:	487P	2201П
Потребляемая мощность, кВт	6,75	6,75
Рабочее давление сжатого воздуха, МПа	0,5–0,63	0,5–0,63
Количество струйно-абразивных пистолетов, ед.		2
Скорость перемещения пистолетов, мм/с:		
вдоль оси шпинделя	1–50	0,16–140
перпендикулярно к оси шпинделя	4–80	0,1–50
Частота вращения шпинделя, об/мин	6,3–32	4–200
Размеры обрабатываемых деталей		
диаметром 320/500, мм, не более.	1500×180×250	1600×250×150
Масса обрабатываемых деталей, кг:		
цилиндрических	100	500
плоских	250	500
Масса полуавтомата, кг	2900	4250
Габаритные размеры, мм, не более	5600×3500×2360	6200×3800×2850

В комплект поставки входят рукавные фильтры и вентиляторы.

Установки (аппараты) для плазменного напыления и упрочнения

К данному оборудованию относятся установки (аппараты), непосредственно генерирующие плазму. Конструктивная схема установки «Киев–7» для плазменного напыления показана на *рис. 21*. Она включает блок электропитания 1, пульт управления 2, модуль 3 подачи горючего газа, блок 4 подачи порошка, унифицированный плазмотрон 5, комплект 6 кабелей и шлангов, кабель 7 подключения к полуавтомату.

Установка оснащена плазмотроном для нанесения керамических и металлических порошков с частицами размером 40–120 мкм. Плазмообразующим газом служит смесь сжатого воздуха с пропаном или природным газом. Наибольшая производительность установки составляет 10 кг/ч керамического и 25 кг/ч металлического порошков. Мощность плазмотрона не более 80 кВт. Рабочее напряжение и ток соответственно 200–250 В и 100–315 А.

В настоящее время установки «Киев–7» промышленность не выпускает, однако многие предприятия их используют. На рынке предлагают бывшие в употреблении установки этой модели. Установки «Киев–7» являются достаточно надежными.

НПП «ТОПАС» предлагает гамму установок, построенных на блочно-модульном принципе и использующих доступную и дешевую смесь природного газа с воздухом в качестве рабочих газов.

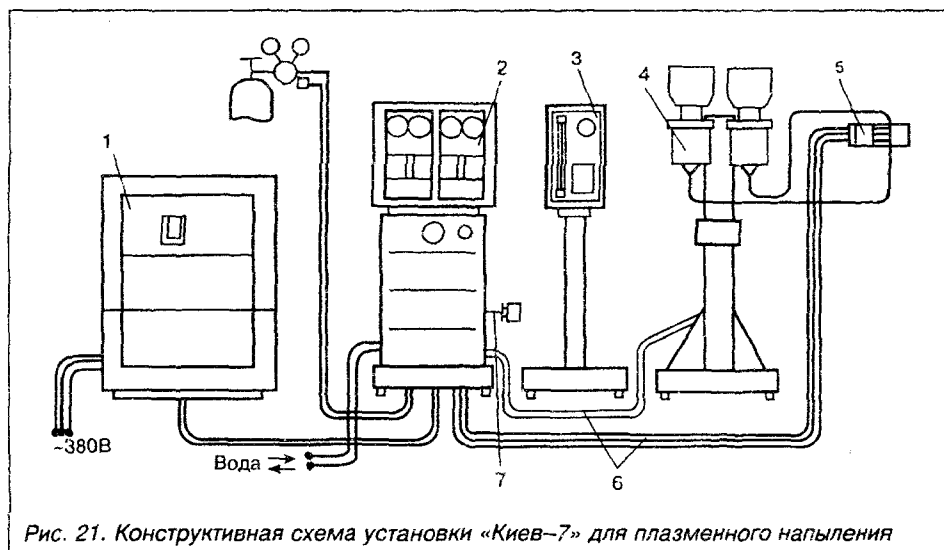


Рис. 21. Конструктивная схема установки «Киев-7» для плазменного напыления

Установку плазменного напыления «ТОПАС-40» мощностью 40 кВт комплектуют плазмотронами в ручном исполнении, а также в исполнении для использования в механизированных и автоматизированных комплексах. Плазмотроны выполнены с одиночной МЭВ и рекуперативным охлаждением, могут работать на сверх- и дозвуковом режимах. Установка предназначена для напыления покрытий на наружные и внутренние поверхности. Для напыления можно использовать порошковые и проволоочные материалы.

Техническая характеристика установки «ТОПАС-40»:

Плазмообразующий газ	Воздух+метан
Напряжение питающей сети (х.х), В	3×380 (180)
Рабочее напряжение, В	140–180
Сила рабочего сварочного тока, А	100–250
Расход смеси, м ³ /ч	3–10
КПД плазмотрона, %	90
Производительность напыления, кг/ч:	
металлы	10
керамика (Al ₂ O ₃)	5

Установка плазменного напыления «ТОПАС-80» с плазмотроном мощностью 80 кВт, раздельной (или общей по желанию заказчика) подачей газа предназначена для эксплуатации в составе автоматизированных и механизированных комплексов.

Техническая характеристика установки «ТОПАС–80»:

Плазмообразующий газ	Воздух+метан (пропан-бутан)
Напряжение питающей сети (х.х), В	3×380 (300)
Рабочее напряжение, В	200–270
Сила рабочего сварочного тока, А	100–300
КПД плазмотрона, %	70
Производительность напыления, кг/ч:	
металлы	25
керамика (Al ₂ O ₃)	10

Установка плазменного напыления «ТОПАС–180» с плазмотроном мощностью 180 кВт работает на сверх- и дозвуковом режимах. Предназначена для эксплуатации в составе автоматизированных и механизированных комплексов, можно использовать во всех случаях, где необходимо высококачественное покрытие при высокой производительности.

Техническая характеристика установки «ТОПАС–180»:

Плазмообразующий газ	Воздух+метан
Напряжение питающей сети (х.х), В	3×380 (500)
Рабочее напряжение, В	250–450
Сила рабочего сварочного тока, А	200–400
Расход смеси, м ³ /ч	10–30
КПД плазмотрона, %	70
Производительность напыления, кг/ч:	
металлы	50
керамика (Al ₂ O ₃)	15

Установки «Киев–7» и «ТОПАС» применяют как для плазменного напыления, так и для упрочнения. В последнем случае блок подачи порошка не используют.

Полуавтоматы для плазменного напыления и упрочнения

Полуавтоматы, разработанные ОАО «УкрИСП», представляют собой оборудование камерного типа, состоящее из защитной камеры, плазменной установки в сборе, аспирационной установки. В камере расположены плазмотрон, передняя и задняя бабки для крепления напыляемой детали. Механизмы перемещения плазмотрона и вращения детали вынесены за пределы камеры, что обеспечивает удобство обслуживания и эксплуатации оборудования.

Полуавтоматами с программным управлением обрабатывают наружные поверхности цилиндрических деталей и деталей сложной конфигурации (конус, цилиндрические ступенчатые валы и др.). Управление осуществляют с помощью систем ЧПУ или компьютера.

Конструкция полуавтоматов обеспечивает:

- возможность ручного регулирования дистанции напыления и упрочнения;
- ручной поворот и фиксацию плазмотрона относительно продольной оси детали;
- плавное регулирование скоростей вращения изделия, продольного и поперечного перемещений плазмотронов;
- возможность автоматического позиционирования плазмотрона по продольной оси;
- защиту приводов перемещения плазмотрона и вращения детали от попадания напыляемого порошка;
- защиту обслуживающего персонала и окружающей среды от шума, излучения, аэрозолей и других сопровождающих напыление вредных воздействий;
- позиционирование и изменение скорости перемещения плазмотрона по двум координатам с интерполяцией по заданной программе;
- изменение частоты вращения шпинделя по заданной программе;
- поворот плазмотрона в заранее заданную точку; автоматическое регулирование расстояния от плазмотрона до напыляемой детали.

Полуавтоматы комплектуют установками плазменного напыления «Киев-7», разработанной ИЭС им. Е. О. Патона, и «ТОПАС-40», «ТОПАС-80», «ТОПАС-180», разработанными НПП «ТОПАС».

Общий вид полуавтомата 15-ВБ показан на рис. 22.

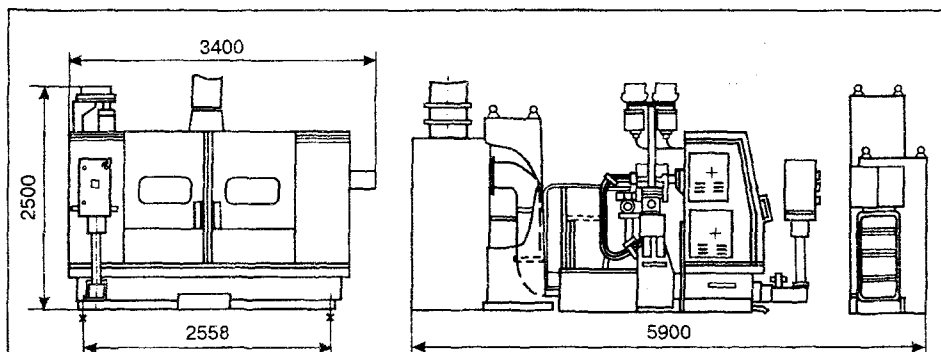


Рис. 22. Общий вид полуавтомата 15-ВБ для плазменного напыления

Техническая характеристика полуавтомата 15ВБ:

Потребляемая мощность, кВт, не более	56,52*
Скорость перемещения плазмотрона, м/с:	
вдоль оси шпинделя	0,002–0,1
перпендикулярно к оси шпинделя	0,004–0,18
Частота вращения шпинделя, об/мин	22,5–500
Размеры деталей, мм:	
цилиндрических:	
длина	63–1500
диаметр	20–320
плоских:	
длина	63–1500
диаметр	40–160
Масса деталей, кг, не более:	
цилиндрических	100
плоских	250
Габаритные размеры, мм	3850×5900×2500
Масса, кг, не более	4200

*Для модификации 15–ВБ–01; для 15–ВБ–02 — не более 106,52 кВт.

Разработана модификация этого полуавтомата 15–ВБУ, позволяющая осуществлять процесс плазменного упрочнения. Эта модель при сохранении массово-габаритных характеристик предусматривает вращение деталей на более низких скоростях.

Общий вид полуавтомата 3201П с программным управлением для плазменного напыления показан на *рис. 23*.

Техническая характеристика полуавтомата 3201П:

Потребляемая мощность, кВт, не более	108
Скорость перемещения плазмотрона, м/с:	
вдоль оси шпинделя	0,0016–1,4
перпендикулярно к оси шпинделя	0,001–0,5
Частота вращения шпинделя, об/мин	20–400
Размеры деталей, мм:	
длина	63–1600
диаметр	25–500
Скорость поворота плазмотрона по углу, ...°/с	2,5–100
Количество координат перемещения плазмотрона	3
Габаритные размеры, мм	4850×4850×2400
Масса деталей, кг, не более	500
Масса полуавтомата, кг, не более	5700

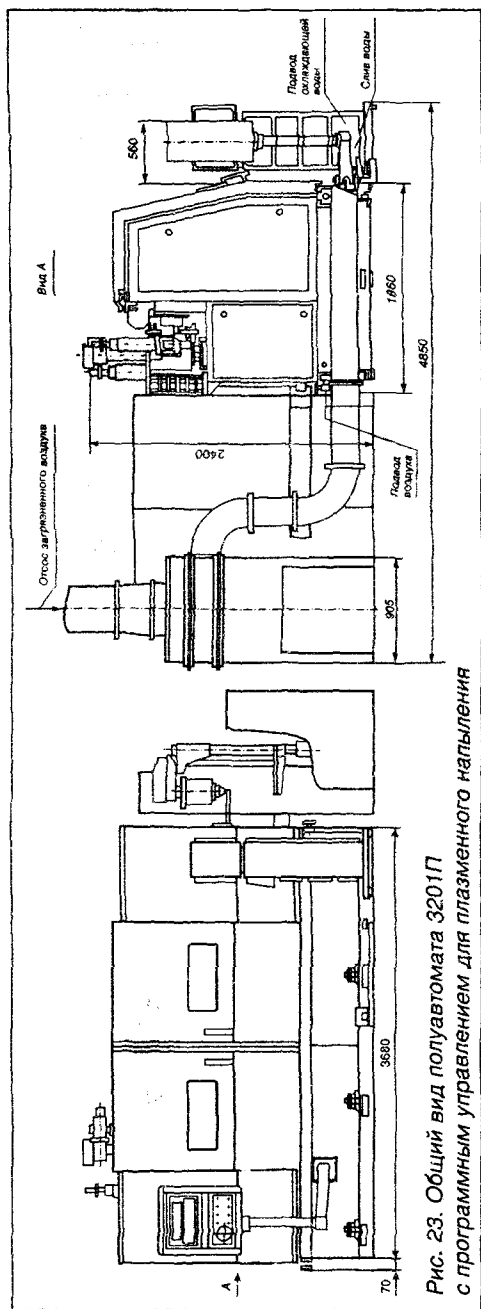


Рис. 23. Общий вид полуавтомата 3201П с программным управлением для плазменного напыления

Современной тенденцией в области разработки оборудования для плазменного напыления, обеспечивающей расширение технологических возможностей процесса, стабильность качества покрытий и улучшение культуры производства, является комплексная автоматизация за счет применения промышленных роботов и персональных компьютеров.

Автоматизацию процесса плазменного напыления разбивают на два направления:

- контроль и управление электрической частью установки, расходом газов, подачей напыляемого материала, другими параметрами напыления, которые задают и регулируют в современных установках с единого пульта управления. Кроме того, можно регулировать давление и состав среды в камере напыления, температуру подложки и др.;
- контроль и управление перемещением детали, горелки и обрабатывающих устройств.

Необходимость автоматизации обусловлена, с одной стороны, особенностями процесса плазменного напыления, связанными с высокой чувствительностью качества и толщины покрытия к колебаниям технологических параметров, с другой — требованиями техники безопасности в отношении изоляции операторов от рабочей зоны. Выбор степени автоматизации процесса плазменного упрочнения или напыления осуществляют на основе анализа технико-экономических показателей.

Список литературы

1. **Плазменное** поверхностное упрочнение / А. К. Лещинский, С. С. Самутгин, И. И. Пирч, В. И. Комар. — К.: Техніка, 1990. — 110 с.
2. **Григорьянц А. Г.** Основы лазерной обработки материалов. — М.: Машиностроение, 1989. — 304 с.
3. **Григорьянц А. Г., Сафонов А. Н.** Методы поверхностной лазерной обработки. — М.: Высшая школа, 1987. — 191 с.
4. **Коротеев А. С., Васильев М. Н.** Технологические процессы на основе концентрированных электронных пучков // Автомобильная промышленность. — 1983. — № 11. — С. 21–23.
5. **Кайдалов А. А.** Электронно-лучевая закалка поверхностей металлов // Сварщик. — 1999. — № 3. — С. 14–15.
6. **Брандт М.** Промышленные лазеры: принцип работы и возможные области применения // Сварщик. — 2001. — № 3. — С. 30–32.
7. **Арзамасов Б. Н.** Химико-термическая обработка металлов в активизированных газовых средах. — М.: Машиностроение, 1979. — 224 с.
8. **Кайдалов А. А.** Повышение износостойкости режущего и абразивного инструмента плазменной обработкой в вакууме // Сварщик. — 2000. — № 6. — С. 9.
9. **Тюрин Ю. Н.** Электролитно-плазменное упрочнение деталей буровых станков // Сварщик. — 1998. — № 4. — С. 10.
10. **Лашенко Г. И.** Плазменная резка конструкционных сталей. — К.: Эко-технология, 2001. — 48 с.
11. **Болховитинов Н. Ф.** Металловедение и термическая обработка. — М.: Машгиз, 1961. — 463 с.
12. **Гречнева М. В., Токмаков В. П.** Плазменное упрочнение металлов в жидких средах // Сварочное производство. — 1992. — № 7. — С. 8–9.
13. **Балановский А. Е., Нестеренко Н. А.** Плазменное циклическое упрочнение сталей // Сварочное производство. — 1992. — № 11. — С. 13–15.
14. **Кузнецов В. Д., Пащенко В. М.** Фізико-хімічні основи модифікації структури та легування поверхні: Навч. посібник. — К.: НМЦ ВО, 2000. — 160 с.
15. **Особенности** структуры и свойств сталей с повышенным содержанием углерода в сварных соединениях, формируемых с термоциклированием / Д. А. Дудко, А. М. Савицкий, В. Г. Васильев, Д. П. Новикова // Автоматическая сварка. — 1996. — № 2. — С. 6–10.
16. **Петров С. В., Сааков А. Г.** Плазма продуктов сгорания в инженерии поверхности. — К.: ТОПАС, 2000. — 220 с.
17. **Крапошин В. С., Бобров А. В., Галоненко О. С.** Поверхностная закалка стали 9ХФ при нагреве теплом плазменной горелки // Металловедение и термич. обработка металлов. — 1989. — № 11. — С. 13–17.
18. **Балановский А. Е., Нестеренко Н. А.** Роль водорода при плазменном поверхностном упрочнении // Сварочное производство. — 1992. — № 11. — С. 19–20.
19. **Получение** теплостойких слоев на стали 20 с использованием плазменного нагрева / А. А. Скрыпкин, В. А. Нецветаев, В. Е. Щербаков и др. // Сварочное производство. — 1992. — № 11. — С. 15–17.

20. **Дуплекс-технология** упрочнения деталей штампов горячего деформирования металла / Ю. Н. Тюрин, О. В. Колисниченко, С. И. Головенко и др. // Сварщик. — 2000. — № 5. — С. 3.
21. **Кайдалов А. А.** Повышение износостойкости режущего и абразивного инструмента плазменной обработкой в вакууме // Сварщик. — 2000. — № 6. — С. 9–11.
22. **Тюрин Ю. А., Колисниченко О. В., Цыганов Н. Г.** Импульсно-плазменное упрочнение инструмента // Автоматическая сварка. — 1999. — № 6. — С. 38–43.
23. **Самотугин С. С.** Плазменная обработка инструментальных сталей // Автоматическая сварка. — 1996. — № 8. — С. 48–51.
24. **Газотермические** покрытия из порошковых материалов / Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов, С. Л. Сидоренко, Е. Н. Ардатовская. — К.: Наукова думка, 1987. — 544 с.
25. **Кудинов В. В., Иванов В. М.** Нанесение плазмой тугоплавких покрытий. — М.: Машиностроение, 1981. — 192 с.
26. **Хасуи А., Моричаки О.** Наплавка и напыление / Пер. с яп. В. Н. Попова. Под ред. В. С. Степина, Н. Г. Шестеркина. — М.: Машиностроение, 1985. — 240 с.
27. **Технология** восстановления и упрочнения наружных и внутренних поверхностей вращения и плоских поверхностей плазменным напылением / Г. М. Русеев, В. В. Овсянников, С. М. Киселев, Н. Ф. Галюк // Автоматическая сварка. — 2000. — № 12. — С. 61–62.
28. **Микроплазменное** напыление биокерамических покрытий / Ю. С. Борисов, С. Г. Войнарович, В. Г. Бобрик и др. // Автоматическая сварка. — 2000. — № 12. — С. 63–67.
29. **Краснов А. Н., Шаривнер С. Ю., Зильбербер В. Г.** Низкотемпературная плазма в металлургии. — М.: Металлургия, 1970. — 216 с.
30. **Борисов Ю. С., Кислица А. Н.** Микроплазменное напыление с использованием проволочных материалов // Автоматическая сварка. — 2002. — № 3. — С. 54–55.
31. **Борисов Ю. С., Петров С. В.** Использование сверхзвуковых струй в технологии газотермического напыления // Автоматическая сварка. — 1995. — № 1. — С. 41–44.
32. **Влияние** условий плазменного напыления на структуру покрытий из сплава Fe–Mo–Cr–Ni–W / А. Л. Борисова, В. Г. Бобрик, Ю. С. Борисов и др. // Автоматическая сварка. — 1995. — № 7. — С. 28–34.
33. **Харламов Ю. А., Борисов Ю. С.** Влияние микрорельефа поверхности на прочность сцепления с газотермическими покрытиями // Автоматическая сварка. — 2001. — № 6. — С. 19–25.
34. **Рациональные** режимы дробеструйной очистки чугунных отливок / М. Я. Мерович, И. Г. Ясковский, Ю. А. Чукалин, И. Я. Балакин. — Л.: ЛДНТП, 1972. — 26 с.
35. **Борисов Ю. С., Коржик В. Н.** Аморфные газотермические покрытия. Теория и практика (Обзор) // Автоматическая сварка. — 1995. — № 4. — С. 3–11.

36. **Разработка** процесса получения порошков для газотермического напыления из стружки серого чугуна / Ю. С. Борисов, В. Н. Коржик, М. Т. Панько, М. Л. Князь // Автоматическая сварка. — № 6. — С. 7–12.
37. **Панько М. Т.** Розробка технології повітряно-газового плазмового напилення зносостійких покриттів із порошків на основі стружки із сірого чавуну // Автореф. дисерт. на здобуття наук. ступеню канд. техн. наук. — К., 1996.
38. **Пашченко В. Н.** Особенности применения многокомпонентных газовых смесей в плазмотронах для нанесения покрытий // Автоматическая сварка. — 1998. — № 6. — С. 23–26.
39. **Повышение** сопротивления усталости стальных деталей с газотермическим покрытием в результате ультразвуковой обработки / Ю. С. Борисов, А. Г. Ильенко, А. Л. Гайдаренко, В. Б. Марголин // Автоматическая сварка. — 1991. — № 1. — С. 35–37.
40. **Влияние** струйно-абразивной обработки в процессе плазменного напыления на эрозионную стойкость покрытий на основе никеля / С. Л. Рево, Н. Н. Дашевский, А. Л. Борисова // Автоматическая сварка. — 1996. — № 2. — С. 20–23.
41. **Особенности** оплавления напыленных покрытий из никелевых саморасплавляющихся сплавов / Ю. С. Борисов, Е. Н. Тарасенко, В. А. Неуймин и др. // Автоматическая сварка. — 1995. — № 5. — С. 22–25.
42. **Ковалевский А. А.** Изготовление технологической оснастки с применением метода плазменного напыления. Обзор. — Рига: ЛатИНТИ. — 1977. — 39 с.
43. **Соколов Ю. В., Коган Г. В.** Технологические аспекты процесса изготовления матриц пресс-форм напылением и пути его совершенствования. — М.: БелНИИ ИНТИ, 1990. — 28 с.
44. **Мякота И. С., Поляков С. П., Борисов Ю. С.** Изготовление корковых изделий из сплавов системы Cu–Al–Fe методом плазменного напыления // Автоматическая сварка. — 1999. — № 7. — С. 37–43.
45. **Киселев Л. А.** Восстановление деталей воздушно-плазменным напылением // Машиностроение. — 1991. — № 9. — С. 38–39.
46. **Галатин Р. Р., Корж В. Н.** Опыт повышения эффективности изготовления узлов трения путем плазменного напыления покрытий из бронзы // Автоматическая сварка. — 1996. — № 1. — С. 58–59.
47. **Сааков А. Г., Петров С. В.** Катализатор комплексной очистки отработавших автомобильных газов // Мир техники и технологий. — 2002. — № 8. — С. 52–53.
48. **Фартушный В. Г., Лашченко Г. И., Никитюк Ю. А.** Оборудование для сварки, наплавки, плазменного упрочнения и напыления. Каталог-справочник. — К.: Экотехнология, 2002. — 60 с.
49. **Девкин М. М., Севастьянов Н. Д.** Очистка поверхностей деталей металлическим песком / Под ред. Л. Ф. Лиюкумовича. — М.: Машиностроение, 1968. — 65 с.
50. **Лашченко Г. И.** Струйно-абразивная обработка поверхностей металлоконструкций и деталей // Мир техники и технологий. — 2002. — № 8. — С. 54–56.

Содержание

Предисловие	3
Глава 1. Плазменное поверхностное упрочнение деталей	4
Способы плазменного упрочнения	5
Технология плазменного упрочнения	12
Области применения плазменного упрочнения	22
Глава 2. Плазменное напыление поверхностей деталей	26
Способы плазменного напыления и применяемые материалы	26
Подготовка поверхности деталей к нанесению плазменных покрытий	33
Технология нанесения и обработки плазменных покрытий	36
Размерная обработка покрытий	47
Области применения плазменного напыления	48
Глава 3. Оборудование для плазменного упрочнения и напыления деталей	51
Установки и полуавтоматы для струйно-абразивной обработки деталей	51
Установки (аппараты) для плазменного напыления и упрочнения	55
Полуавтоматы для плазменного напыления и упрочнения	57
Список литературы	61

Виробничо-практичне видання

Лашенко Георгій Іванович

ПЛАЗМОВЕ ЗМІЦНЕННЯ ТА НАПИЛЕННЯ

(російською мовою)

Редактор

Г. Л. Берзіна

Верстка

Т. Д. Пашигорова

Художник

А. Є. Рубльова

Підписано до друку 18.04.2003. Формат 60×84/16. Папір офсетний № 1.

Гарнітура Nimbus. Електрографічний друк. Умов. друк. арк. 3,72.

Облік-вид. арк. 3,05. Тираж 600 прим.

ДВП «Екотехнологія»

Свідоцтво 14288312 від 04.07.97.

Свідоцтво про внесення до державного реєстру видавців, виготівників

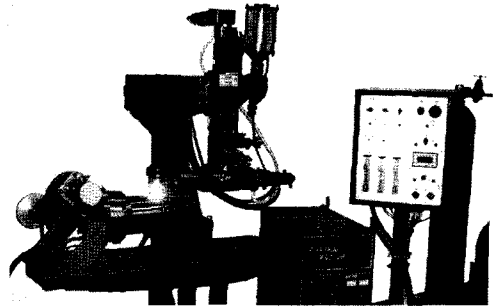
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 1052.

03150 Київ, вул. Антоновича (Горького), 62.

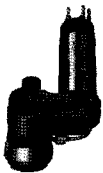
Плазма Мастер

Научно-производственная фирма
"Плазма-Мастер ЛТД"

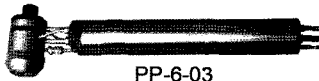
- Технологические разработки в области плазменной наплавки
- Оборудование для плазменно-порошковой наплавки
- Наплавочные плазмотроны для различных назначений
- Наплавка деталей машин



Установка на базе аппарата ПМ-300



PP-6-01



PP-6-03



PP-14



PP-21

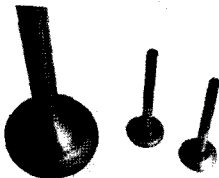


PP-25

Объекты применения



Шнек



Клапаны



Ролики

- шнеки экструдеров и термопластавтоматов
- клапаны и седла двигателей внутреннего сгорания
- режущий и штамповый инструмент
- запорная арматура
- подшипники скольжения

Украина, 03680, Киев ул. Якутская, 14
тел. (+38044) 476 75 99 477 93 51 факс 475 35 98
office@plasma-master.com.ua www.plasma-master.com.ua



Об авторе

Георгий Иванович Лашченко — кандидат технических наук, руководитель научно-исследовательского и информационно-аналитического центра сварки и родственных технологий, первый заместитель генерального директора по научной работе Украинского конструкторско-технологического института сварочного производства.

Круг научных и инженерных интересов: технология изготовления сварных конструкций, плазменная резка, дуговая сварка, вибрационная обработка, механизация и автоматизация сварочного производства, газотермическое нанесение покрытий.

ISBN 966-95918-8-0



9 789669 591883