

УДК 621.793

ОПТИМИЗАЦИЯ ПЛАЗМЕННОЙ ПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКИ ДВУХДУГОВЫМ ПЛАЗМОТРОНОМ

**ЕРМАКОВ С.А.(к.т.н., доцент СПбГПУ), ТОПОЛЯНСКИЙ
П.А.*ⁱ(к.т.н., зам. ген. директора НПФ «Плазмацентр»), СОСНИН
Н.А.(д.т.н., профессор СПбГПУ)**

*Санкт-Петербургский государственный политехнический
университет(195251, Санкт-Петербург, Политехническая, 29.), НПФ
«Плазмацентр» (195112, Санкт-Петербург, пр. Малоохтинский, д.68,
оф.103)*

Рассмотрены энергетические характеристики двухдугового плазматрона и основные параметры плазменной порошковой наплавки с поперечными колебаниями плазматрона. Приведён алгоритм выбора оптимального режима наплавки для реализации в технологиях ремонта, восстановления и упрочнения поверхностей ответственных деталей.

Ключевые слова: плазменная порошковая наплавка, двухдуговой плазматрон, поперечные колебания, оптимальные параметры процесса.

THE OPTIMIZATION OF PLASMA POWDER SURFACING WITH TWO-ARC PLASMATRON

**ERMAKOV S.A. (dr.), TOPOLJANSKIY P.A. (dr., deputy director),
SOSNIN N.A. (prof.)**

*St.-Petersburg state polytechnic university(Polytechnicheskaya, 29,
St.Petersburg, 195251, Russia), Plasmacentre Ltd (Maloohhtinskiy 68, office 103,
St. Petersburg, 195112, Russia)*

The power properties of two-arc plasmatron and main parameters of plasma powder surfacing with transversal oscillations of plasmatron are considered. The algorithm of choice of an optimum mode is indicated.

Key words: plasma powder surfacing, two-arc plasmatron, transversal oscillations, optimum parameters of process.

Плазменная порошковая наплавка достаточно широко применяется в технологиях ремонта, восстановления и упрочнения поверхности ответственных деталей. Эффективным развитием этого процесса стала технология наплавки двухдуговым плазмотроном [1].

Дуга косвенного действия (часто называемая пилотной дугой), постоянно горящая между вольфрамовым электродом и соплом плазмотрона, ток которой соизмерим с током основной сжатой дуги или даже превышает его, оказывает мощное тепловое воздействие не только на порошок, подаваемый в плазменную струю, но и на металл ванны. Наличие при плазменной обработке пилотной дуги, формирующей достаточно мощную регулируемую плазменную струю, совпадающую по направлению с осью основной сжатой дуги, в результате разогрева межэлектродного пространства и создания условий для интенсивного потока плазмы к изделию повышает стабильность и устойчивость основной сжатой дуги, значительно уменьшает ее блуждание по обрабатываемой поверхности, особенно – при малых токах и слабом сжатии основной дуги. Все это способствует стабильности более мягкого (но достаточного) тепловвода в изделие и повышению качества плазменной наплавки. Таким образом, пилотная дуга, действуя совместно с основной сжатой дугой (обычно – прямой полярности), может заменить сжатую дугу обратной полярности, прежде всего при наплавке тонких слоев и на изделиях сложных по конфигурации поверхностей. Введение наплавляемого порошкового материала в двухдуговом плазмотроне непосредственно в плазменную струю, в значительной степени формируемую пилотной дугой, обеспечивает дополнительный разогрев

частиц порошка, его лучшее растекание на основном металле при снижении разогрева изделия и уменьшении глубины проплавления.

При пролете в плазменной струе порошковый материал получает дополнительное ускорение, что дает возможность вести плазменную наплавку в пространственных положениях, отличных от нижнего, а также в ряде случаев при снижении тока основной сжатой дуги использовать порошки меньшей грануляции (менее 60 мкм).

На практике вызывает определенные трудности выбор оптимальных режимов плазменной порошковой наплавки двухдуговым плазмотроном. Ниже рассматривается методика решения этой задачи.

В данной работе использовался плазмотрон с диаметром плазмообразующего сопла 4,2 мм и с диаметром порошкового сопла – 6 мм. Электрод плазмотрона из иттрированного вольфрама диаметром 3 мм имел заточку рабочей части под углом 15° с притуплением на конце диаметром 0,5 мм. Плазмообразующим, транспортирующим и защитным газом служил аргон. Расходы транспортирующего и защитного газа составляли соответственно $3,7 \cdot 10^{-5}$ и $15 \cdot 10^{-5}$ м³/с.

В результате анализа энергетических характеристик процесса плазменной поверхностной обработки с пилотной дугой, полученных в исследованной области реальных режимов, установлено следующее:

- со значительным приоритетом значимости оказывают влияние на эффективную мощность пилотной дуги $Q_{\text{п}}$ и суммарную эффективную мощность Q_{Σ} соответственно: ток пилотной дуги $I_{\text{п}}$ и ток основной дуги I_0 (особенно, в области больших токов); этот факт упрощает процедуру выбора режимов обработки;
- вольтамперная характеристика пилотной дуги при наличии основной дуги (в аргоне при $I_{\text{п}} = I_0 \pm 50\%$) – жесткая со слабым влиянием всех факторов; для инженерных расчетов напряжение $U_{\text{п}}$ можно принять равным 12 В (с погрешностью не более 10 %);

- напряжение основной дуги прямой полярности в аргоне U_o при наличии пилотной дуги (при $I_{\text{п}} = I_o \pm 50 \%$) увеличивается с ростом тока I_o и дистанции обработки $l_{\text{си}}$ и может быть аппроксимировано линейной зависимостью вида

$$U_{\hat{1}} \approx 15,2 + 0,044 I_{\hat{1}}$$

при $d_c = 4,2$ мм и средней дистанции между соплом и изделием $l_{\text{си}} = 8$ мм.

- суммарная эффективная мощность двух дуг Q_3 в рабочем диапазоне параметров режима наплавки линейно возрастает с увеличением тока основной дуги (при $I_{\text{п}} \approx I_o$); изменение других параметров режима на Q_3 влияет незначительно. Зависимость $Q_3(I_o)$ можно достаточно точно аппроксимировать линейным уравнением при расходах плазмообразующего газа $(4 \dots 8) \cdot 10^{-5}$ м³/с и $d_c = 4,2$ мм:

$$Q_3 = 16,5 I_o \quad (1)$$

- эффективный радиус R_q пятна нагрева двухдугового плазмотрона при наплавке можно оценивать по следующей зависимости (при $I_{\text{п}} = I_o \pm 50 \%$; $I_o > 50$ А и $d_c = 4,2$ мм):

$$R_q = 5,1 \left[1 + 0,46 \frac{(I_o - 100)}{100} \right], \quad (2)$$

где R_q – в миллиметрах; I – в амперах.

При расчете режимов плазменной наплавки можно в качестве расчетной зоны, ограниченной координатами температуры плавления основного металла $T_{\text{пл-о}}$, принять зеркально отраженную относительно наплавляемой поверхности зону наплавки (рис. 1-а) при условии:

- глубина h равна высоте g ; ширина $e = \text{const}$.

Это условие выполняется только при равенстве теплосодержания единичного объема наплавляемого и основного металла: $\rho \Delta H_{\text{н}} = \rho \Delta H_o$.

Если теплофизические свойства наплавляемого и основного металла различаются (например, $\rho\Delta H_{\text{н}} > \rho\Delta H_{\text{о}}$), то сечение расчетной зоны $f_{\text{о}}$ может быть определено из соотношения:

$$f_{\text{о}} = f_{\text{н}} \frac{\rho\Delta H_{\text{н}}}{\rho\Delta H_{\text{о}}},$$

где: $f_{\text{н}}$ – сечение зоны наплавки высотой g' и шириной e' ; $f_{\text{н}} \approx 0,72 e' g'$ (см. рис. 1-б).

При этом расчетная зона будет ограничена координатами максимальной температуры – температуры плавления основного металла $T_{\text{пл-о}}$: по глубине $h = z_{\text{max}}$, по ширине $e = 2 \cdot y_{\text{max}}$. В пределах этой зоны сумма площадей расплавленного основного металла и наплавленного металла при неизменных параметрах режима должна оставаться постоянной.

В случае необходимости обеспечить заданную глубину проплавления основного металла следует пропорционально изменять расход наплавляемого материала $G_{\text{нм}}$.

Результаты расчета для двухдугового плазмотрона погонной энергии $q_{\text{пог}}$ и скорости движения v в зависимости от тока основной и пилотной дуги (рис. 2) показывают следующее:

- при заданной температуре нагрева (например, $\Delta T = T_{\text{пл-о}} - T_{\text{под}} = 1000 \text{ К}$, где $T_{\text{под}}$ – температура подогрева изделия) на фиксированной глубине z в пределах 0,1...2 мм и изменении тока от 50 до 300 А минимум погонной энергии находится в области токов 80–170 А;
- минимум погонной энергии соответствует замедлению роста скорости движения $v(I)$ – слабее, чем прямо пропорционально току.

Следует отметить, что при шестикратном увеличении тока эффективный радиус пятна нагрева R_q возрос только в 2,5 раза (2), а максимальная полуширина y_{max} изотермы $\Delta T = 1000 \text{ К}$ – в 1,8 раза. При этом режимы наплавки, соответствующие минимуму погонной энергии,

обеспечивают и минимальное удельное тепловложение q (рис. 3), определяемое как

$$q = \frac{q_{\text{пог}}}{2 y_{\text{max}}} = \frac{Q_{\text{э}}}{2 v y_{\text{max}}}.$$

где v – скорость наплавки.

Максимальные скорости охлаждения снижаются по мере увеличения расчетной толщины наплавляемого слоя и соответствующего изменения параметров режима наплавки (рис. 4).

В литературе обращается внимание на то, что наплавку необходимо выполнять с минимально возможной погонной энергией для уменьшения протяженности разупрочненных или закаленных участков в зоне термического влияния [2]. Кроме того, увеличение времени контакта жидкого наплавляемого металла с основным отрицательно сказывается на составе, структуре и свойствах наплавленного слоя. Например, при наплавке кобальтового сплава [3] весьма резко увеличивается концентрация железа в наплавленном слое.

Во избежание образования трещин в ряде случаев может быть применён значительный предварительный подогрев [4], но тепловложение непосредственно в процессе наплавки должно быть минимальным. Опыт применения плазменной наплавки подтверждает этот тезис.

Как видно на рис. 2, зависимость погонной энергии от тока имеет явный экстремум. Положение минимума погонной энергии может смещаться при изменении толщины наплавляемого слоя и других параметров наплавки. По мере роста тока увеличение скорости наплавки, обеспечивающей заданную толщину наплавляемого слоя, замедляется, особенно после прохождения минимума погонной энергии, скорость движения стремится к «насыщению». При этом ширина $2 y_{\text{max}}$ расчетной изотермы $\Delta T = T_{\text{пл-0}} - T_{\text{под}}$ растет относительно медленно (см. рис. 3).

При плазменной наплавке эффективный диаметр пятна нагрева D_q обычно превышает ширину e наплавляемого валика, однако, как показывают расчеты и опыты, ширина e ванны и валика при варьировании эффективным радиусом R_q (и, соответственно D_q) проходит максимум в отличие от глубины ванны h , которая по мере роста R_q практически линейно уменьшается. Это указывает на то, что при необходимости широкослойной наплавки следует выбирать параметры режима, обеспечивающие оптимальный эффективный радиус R_q пятна нагрева или применять поперечное колебание плазмотрона.

Проведенные расчеты и опыты показывают, что увеличение температуры подогрева изделия $T_{\text{под}}$ не дает возможности увеличить ширину наплавляемого валика e , сохраняя $h = \text{const}$. С ростом $T_{\text{под}}$ глубина h растет примерно с такой же интенсивностью, как и ширина валика e , а это может привести к недопустимому переходу металла основы в наплавляемый слой.

Таким образом, при выборе температуры подогрева изделия необходимо корректировать режим наплавки, проверяя изменение глубины проплавления. Для этого можно использовать, например, универсальную компьютерную программу Plasmnet [1].

Влияние скорости наплавки может быть существенным, что необходимо учитывать при определении требований к точности поддержания скорости движения. При наплавке, например, на изделие толщиной 20 мм изменение скорости на 10 % (при средней скорости 6 м/ч) дает изменение ширины на 3 %, а глубины – на 6 %. Для более тонких изделий отклонения e и h могут быть значительно выше и для глубины h превышать 30%.

Это свидетельствует о том, что для прецизионной плазменной наплавки требования к оборудованию по точности стабилизации скорости движения должны быть повышенными. В то время как стандарты на

сварочные автоматы обычно регламентируют точность скорости движения не хуже $\pm 10\%$, аппаратура для прецизионной наплавки, с учетом допустимого перемешивания основного и наплавляемого металла, например, 5 или 10%, должна обеспечивать стабилизацию скорости движения с точностью не хуже $\pm 1,3\%$ или $\pm 2,7\%$ соответственно.

При наплавке поперечные колебания источника теплоты используются с целью получения достаточно равномерного наплавленного слоя необходимой ширины. Дополнительные параметры режима (амплитуда колебаний, частота колебаний, время выдержки в крайних точках при наплавке по трапецеидальной траектории колебаний источника теплоты) усложняют выбор режима наплавки и оценку качества наплавляемого слоя.

При колебаниях источника теплоты, дающих трапецеидальную траекторию движения (рис. 5), значение скорости поперечного перемещения источника (скорости колебаний) v_y остается неизменным.

Найдем температурное поле с учетом поперечных колебаний поверхностного нормально кругового источника теплоты. Пусть источник движется с постоянной скоростью v вдоль оси x и при этом периодически отклоняется от оси x по известному временному закону $y_q(t)$ (рис. 5). Мощность Q_3 также может зависеть от времени t , $Q_3 = Q_3(t)$. Тогда весь путь можно разбить на элементарные участки, на которых последовательно действуют мгновенные источники энергии $Q_3(t)dt$. Приращение температуры в подвижной системе координат в любой точке $P(x, y, z)$ в любой момент t определяется суммированием приращений температуры от всех элементарных источников [5]:

$$T(x,y,z,t) - T_0 = \frac{1}{4\pi\lambda s} \int_0^t \frac{Q_3(t-\tau)}{\tau+t_0} \exp\left(-\frac{(x+v\tau)^2 + (y-y_q(t-\tau))^2}{4a(\tau+t_0)}\right) \times \left[1 + 2 \sum_{i=1}^{\infty} \cos \frac{\pi i z}{s} \exp\left(-\pi^2 i^2 \frac{a\tau}{s^2}\right)\right] d\tau \quad (3)$$

В момент $(t - \tau)$ элементарный источник находится в точке В, действует в течение $d\tau$ и его теплота распространяется в течение τ (рис. 5). Отметим, что подвижная система координат x, y, z движется со скоростью сварки v и от оси x не отклоняется (положение реального источника в момент t – точка С, а положение центра подвижной системы координат – точка 0).

Если поперечные колебания трапецеидальные и симметричные относительно оси x (рис.5), то поперечное перемещение источника y_q в момент времени $(t - \tau)$:

$$y_q(t-\tau) = y_q(t') = \begin{cases} v_y t' & \text{при } 0 \leq t' < 0,25T_K - 0,5t_w \\ A & \text{при } 0,25T_K - 0,5t_w \leq t' < 0,25T_K + 0,5t_w \\ A - v_y(t' - 0,25T_K - 0,5t_w) & \text{при } 0,25T_K + 0,5t_w \leq t' < 0,75T_K - 0,5t_w \\ -A & \text{при } 0,75T_K - 0,5t_w \leq t' < 0,75T_K + 0,5t_w \\ -A + v_y(t' - 0,75T_K - 0,5t_w) & \text{при } 0,75T_K + 0,5t_w \leq t' \leq T_K \end{cases},$$

$$T_K = 2t_w + 4A/v_y; \quad t' = (t - \tau) - nT_K; \quad n = E((t - \tau) / T_K)$$

где t' – фаза колебания ($0 \leq t' \leq T_K$), v_y – скорость поперечного перемещения между крайними точками, T_K – период поперечных колебаний, t_w – время выдержки источника в крайних точках колебания, n – количество предыдущих колебаний, $E(u)$ – целая часть числа u (наибольшее целое число, не превосходящее u).

Скорость движения v рассчитывается методом итераций при задаваемых Q_3 и R_q . Максимальная температура T_{\max} задается при

некоторых заданных значениях Y_{\max} , Z_{\max} . Например, можно установить $Y_{\max} = 0$, а Z_{\max} – равную толщине наплавляемого слоя.

Поле температур колеблющегося источника теплоты в подвижной системе координат – нестационарное, поэтому в зависимости от решаемой задачи необходимо выбрать какую температуру рассчитывать в каждой точке – мгновенную или наибольшую (за период). Для построения термического цикла необходимо задавать расчет в каждой точке мгновенной температуры, а для поиска режима, в том числе с учетом теплоты плавления наплавляемого материала, или, например, для построения температурных полей в неподвижной системе координат, в частности, для оценки зоны проплавления основного металла, необходимо задавать расчет в каждой точке наибольшей температуры.

При поперечных колебаниях расчет наибольшей температуры ведется по формуле (3), прослеживая максимальную возможную температуру в каждой точке в разные моменты периода колебаний источника, для чего автоматически варьируется задаваемая в расчете величина t , что изменяет фазу колебаний.

Расчет наибольших возможных температур в неподвижной системе координат x_0, y_0, z_0 ведется по формуле (3) с использованием уравнения связи:

$$x_0 = x + v t.$$

Чтобы учесть возможное влияние тепловложения от последующих периодов колебаний на температуру в данной точке, в расчет закладывается k периодов колебаний. Из рассчитанных по k периодам температур выбирается наибольшая в данной точке.

Построенное по такой методике поле температур в координатах $y-z$ для процесса с поперечными колебаниями можно сравнивать с поперечным шлифом выполненной наплавки.

Для выбора оптимального режима наплавки целесообразно использовать принцип минимизации погонного производства энтропии сварочной технологической системы, рассматривая ее как открытую неравновесную термодинамическую систему [6]. Этот принцип уже показал свою эффективность при оптимизации режимов плазменной сварки проникающей дугой. Мерой погонного производства энтропии тепловой энергией может служить погонная энергия $q_{\text{пог}}$. С увеличением тока I в соответствии с формулами (1) и (2) растет Q_s и R_q , что приводит к нелинейному возрастанию скорости наплавки v и к прохождению погонной энергии через минимальное значение. Рассмотрим пример: наплавка на стальной лист, толщина наплавляемого слоя 3 мм. В расчете задаем температуру $T = 1500$ °С на глубине $z_0 = 3$ мм при температуре подогрева изделия 500 °С.

Как видно на рис. 6, при увеличении тока более 230 А, соответствующего минимуму $q_{\text{пог}}$, увеличение скорости наплавки идет медленнее, чем по линейной зависимости. Таким образом, режим на токе 230 А можно считать оптимальным, как обеспечивающий минимальную погонную энергию и достаточную скорость наплавки при шаге колебаний $v \cdot T_k = 7,1$ мм (см. рис. 5). В области минимума $q_{\text{пог}}$ возможен анализ и выбор других режимов наплавки, используя дополнительные условия отбора. Так, режим на токе 150 А обеспечивает при большей погонной энергии и меньшей скорости наплавки пониженную скорость охлаждения, но меньший шаг колебаний (при неизменной частоте колебаний) приводит к многократному переплаву наплавляемого слоя, что может ухудшить качество наплавки.

Как видно на рис. 7, по краям зоны наплавки возможны периодические участки с температурой поверхности меньшей температуры плавления основы, но большей, чем температура плавления наплавляемого материала, что не должно ухудшать качество наплавки.

Проведенные эксперименты и производственная проверка автоматизированной плазменной наплавки на задвижки трубопроводной арматуры из стали 30ХМФА порошка ПР-Н65Х25С3Р3 показали высокое качество наплавки (рис. 8) и совпадение расчетных и опытных параметров с погрешностью менее 10%.

Производилась также плазменно-порошковая наплавка выпускных клапанов дизельного двигателя с диаметром тарелки 100 мм из стали 40Х10Н2. В качестве материала для наплавки использовался порошок марки Stellite 12. Химический состав порошка: С -2 %, Cr - 29,6 %, Si - 1,5 %, W - 8,5 %, Ni - 2,0 %, Fe - 1,8...2,2 %, Mn - 0,4 %, Со - остальное. Твердость наплавленного слоя – НRC 48...52.

По условиям эксплуатации клапана содержание железа в наплавленном металле после термической и механической обработки не должно превышать 5%. Автоматизированная установка плазменно-порошковой наплавки двухдуговым плазмотроном обеспечила количество железа в наплавленном металле в пределах 2,8-3,2%.

Компьютерные расчеты семейства оптимальных режимов плазменной наплавки дают возможность обоснованно определить технические требования к оборудованию и автоматизировать выбор оптимальных режимов плазменной порошковой наплавки.

Выводы

1. Экспериментально установленные зависимости энергетических характеристик двухдугового плазмотрона от тока дают возможность решать прямую и обратную тепловую задачу для технологии плазменной наплавки.
2. Расчет наибольших возможных температур в каждой рассматриваемой точке подвижной системы координат при наплавке с поперечными колебаниями позволяет при заданных значениях эффективной

мощности источника теплоты, его эффективного радиуса, параметров колебаний и толщины наплавляемого слоя оценить скорость наплавки.

3. Разработанные алгоритмы расчета и компьютерная программа Plasmnet позволяют рассчитать режим наплавки и построить поля наибольших температур в неподвижной системе координат, что дает возможность оценить температурную обстановку, влияющую на качество формирования наплавляемого слоя при наплавке с колебаниями.
4. Компьютерное сопровождение создает условия для проектирования плазменного технологического оборудования нового поколения и его эффективной эксплуатации при ремонте, восстановлении и упрочнении поверхностей ответственных деталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров. Изд-во Политехнического ун-та. СПб.: 2008. 406 с.
2. Лупачев А.Г., Цыкунова Т.В. Разработка технологии восстановления и упрочнения ножей. // Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин. Материалы международной научно-технической конференции, ПГУ, Новополюцк 1999.
3. Аманов С.Р., Горин А.Д. Разработка технологии и оборудования для упрочнения рабочей фаски выпускных клапанов двигателей внутреннего сгорания. // Международная научно-практическая конференция «Проблемы развития автомобилестроения в России». 2-4 конференции 1996-1998 гг., Тольятти. Избранные доклады. С. 190 – 195.
4. Зубков Н.С., Тютяев В.А., Зубкова Е.Н. Изготовление наплавленного металлорежущего инструмента. Изд-во Тверского государственного технического университета, Тверь. - 1998. 124с.

5. Кархин В.А. Тепловые основы сварки: Учебное пособие. ЛГТУ. Л., 1990. 100 с.
6. Соснин Н.А. Теорема Пригожина и устойчивость процесса сварки плавлением на весу стыковых соединений. // Сварочное производство. 2006. №3. С.7-12.

ПОДРИСУНОЧНЫЕ ПОДПИСИ

Рис. 1. Поперечное сечение зоны плазменной наплавки при $\rho\Delta H_n = \rho\Delta H_o$

(а) и при $\rho\Delta H_n > \rho\Delta H_o$ (б); ЗТВ – зона термического влияния

Рис. 2. Зависимость погонной энергии и скорости наплавки от тока дуги

(I_d) при заданных $z = h$; $\Delta T = 1000$ К; температура предварительного

подогрева $T_{\text{под}} = 773$ К

Рис. 3. Зависимость параметров ванны: длины – l , ширины – e , глубины – h

от эффективного радиуса R_q ($\Delta T = 1000$ К) при неизменных параметрах

режима наплавки: эффективная мощность $Q_3 = 1650$ Вт, толщина изделия s

$= 20$ мм, скорость наплавки $v = 6$ м/ч, температура предварительного

подогрева $T_{\text{под}} = 773$ К (500 °С)

Рис. 4. Схема движения поверхностного источника теплоты с колебаниями по трапецеидальной траектории (x_0, y_0, z_0 – неподвижная система; x, y, z – подвижная система координат)

Рис. 5. Зависимость погонной энергии $q_{\text{пог}}$ и расчетной скорости наплавки $V_{\text{расч}}$ от тока сжатой дуги I (и связанного с ним эффективного радиуса пятна нагрева R_q)

Рис. 6. Поле наибольших температур в неподвижной системе координат ($z_0 = 0$) при плазменной порошковой наплавке с колебаниями по трапецеидальной траектории на токе 230А (шаг колебаний 7,1 мм) при амплитуде колебаний 3,5 мм, скорости колебаний 7 мм/с, выдержке по краям 0,2 с и скорости наплавки 2,97 мм/с (10,7 м/ч); лист углеродистой стали толщиной 40 мм; температура подогрева листа 500 °С

Рис. 7. Внешний вид (а) и поперечный шлиф (б) наплавки с колебаниями в кольцевую канавку задвижки трубопроводной арматуры

Рис. 8. Процесс автоматизированной плазменно-порошковой наплавки клапанов судовых дизелей

*ⁱ Тополянский Павел Абрамович, к.т.н., зам. ген. директора «Плазмацентр», доцент СПбГПУ, почтовый адрес: 191167, Санкт-Петербург, а/я 77, ООО «Плазмацентр», e-mail: info@plasmacentre.ru, тел./ф.: (812) 4449337(36).