

Д. т. н. **И. Н. Кравченко**^{1,2} (✉), к. т. н. **С. В. Карцев**², д. т. н. **Ю. А. Кузнецов**³

¹ ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К. А. Тимирязева», Москва, Россия

² ФГБУН «Институт машиноведения имени А. А. Благонравова Российской академии наук» (ИМАШ РАН), Москва, Россия

³ ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет имени Н. В. Парахина», г. Орел, Россия

УДК 621.793.74:624.436]:533.9.07

СПОСОБ ЗАЩИТЫ ПЛАЗМЕННОЙ НАПЛАВКИ ГАЗОПОРШКОВЫМ ПОТОКОМ

Представлены результаты исследований скорости истечения газа и полета частиц порошка при плазменной наплавке сжатой дугой в газопорошковой защитной среде. Предложен новый способ защиты сварочной ванны газопорошковым потоком, позволяющий сократить расход аргона на 50–60 %, а также уменьшить массогабаритные размеры плазмотрона, отказавшись при этом от защитного сопла и защитного газа как самостоятельного потока.

Ключевые слова: газовая защита, газопорошковая смесь, газопорошковый поток, наплавочные материалы, плазменная наплавка, плазмотрон, сварочная ванна.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие плазменной наплавки неразрывно связано с дальнейшим совершенствованием способов защиты расплавленного металла [1–6]. При наплавке плазменной дугой основным требованием является получение наплавочных покрытий определенного химического состава без пор, трещин, раковин и других дефектов. Это требование может быть выполнено при условии надежной защиты переплавляемого дугой металла от проникновения в него атмосферных газов. Такие газы, как кислород, водород, азот, попадая в сварочную ванну, способствуют образованию различных дефектов и значительно ухудшают тем самым физико-механические свойства наплавленных покрытий.

До настоящего времени для наплавки порошковыми твердыми сплавами применяли плазмтроны [7–16], в конструкции которых предусмотрены три отдельных сопла для подачи в зону наплавки трех газовых потоков: плазмообразующего с расходом 1,5–2,0 л/мин, транспортирующего (5–10 л/мин) и защитного (10–15 л/мин). Однако каждый отдельный газовый поток не обеспечивает стабильной качественной

защиты наносимого покрытия от окружающего воздуха. Этот недостаток характерен не только для плазменной наплавки [17–21], но и для других газотермических методов нанесения покрытий в среде защитных газов [22–27], что связано с затруднением получения их ламинарного движения.

Известно [28, 29], что удовлетворительную защиту наносимого покрытия можно получить при ламинарном истечении газа, для чего следует снижать его скорость истечения (расход газа) через сопло. В то же время сокращение расхода газа уменьшает жесткость струи, что нарушает устойчивость потока и облегчает попадание наружного воздуха в зону наплавки. Чрезмерное увеличение расхода газа приводит к нарушению ламинарного истечения и, как следствие, к ухудшению защитных свойств. В современных конструкциях плазмтронов для «успокоения» газа на выходе из сопла устанавливают сетчатые фильтры [30]. Однако сетки из-за быстрого забивания и разрушения брызгами расплавленного металла не позволяют получить стабильной высококачественной защиты сварочной ванны.

Режим движения газа оценивается числом Рейнольдса [31], значение которого при плазменной наплавке с подачей порошка через защитное сопло плазмтрона в расплавленное покрытие можно определить по формуле

$$Re = \frac{(D_{\text{п}} - d_3)V_{\text{г}}}{2\nu}, \quad (1)$$

✉
И. Н. Кравченко
E-mail: kravchenko-in71@yandex.ru

где D_n — наружный диаметр плазмообразующего сопла, м; d_s — внутренний диаметр защитного сопла, м; V_r — средняя скорость газа в газопорошковой смеси, м/с; ν — коэффициент кинематической вязкости газа, м²/с.

Турбулентное истечение газа из длинной цилиндрической трубы можно ожидать при Re выше 2300, ламинарное — при меньших значениях Re . Однако эти числа являются весьма условными, поскольку режим движения газа при сварочных процессах зависит от многих факторов: режима сварки, вида газа, размера и формы защитного сопла, расстояния от сопла до свариваемого металла, формы наплавляемого изделия. Поэтому оптимальные параметры процесса газовой защиты сварочной ванны для конкретного способа наплавки определяют экспериментальным путем.

При сварочных процессах следует стремиться к такому режиму движения газа, при котором скорость его истечения была бы минимальной, но при условии сохранения жесткости газовой защитной струи и обеспечения надежной защиты расплавленного металла [32, 33]. С учетом этих условий уменьшение Re за счет погашения скорости истечения газа является одним из перспективных путей улучшения качества защиты расплавленного металла.

В настоящее время в России и за рубежом специалисты различных отраслей науки и техники проявляют все возрастающий интерес к газопорошковым проточным системам и предсказывают им большое будущее в повышении эффективности при разработке различных технологических процессов [19, 34–36]. Путем соответствующего подбора дисперсных частиц и их введения в газовый поток можно в широких пределах управлять газопорошковой смесью, а также регулировать ее свойства и влиять на эффективность процесса в целом.

Для определения свойств газопорошковой смеси проведены исследования, цель которых заключается в улучшении качества защиты расплавленного металла, уменьшении расхода газа, повышении производительности плазменной наплавки и разработке более совершенной конструкции плазмотрона.

ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для достижения поставленной цели исследовали способ плазменной наплавки порошковыми сплавами с использованием в качестве защиты расплавленного металла газопорошкового потока. Кроме того, сконструирован плазмотрон [37], позволивший производить наплавку по схеме, при которой газ, транспортирующий наплавочный порошок, выполняет одновременно защитные функции (рис. 1). При этом частицы порошка, как более тяжелые, чем газ, не изме-

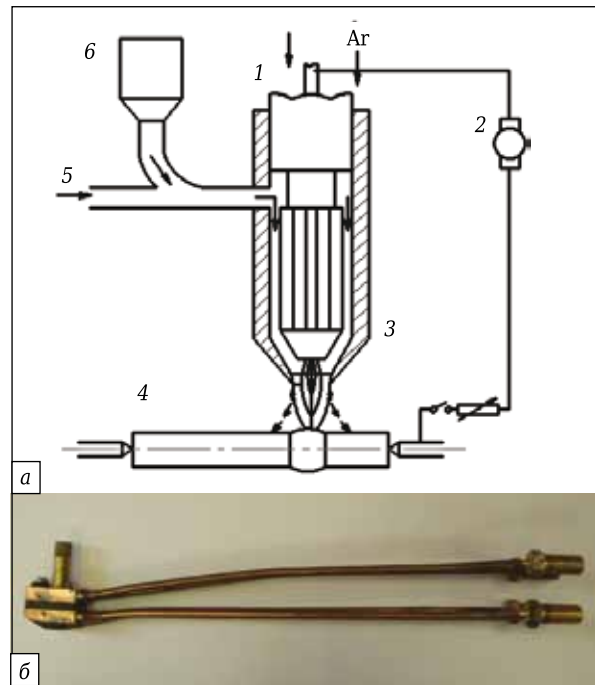


Рис. 1. Схема плазменной наплавки (а) и малогабаритный плазмотрон (б) в защитной среде газопорошкового потока: 1 — корпус плазмотрона; 2 — источник тока; 3 — газопорошковая смесь; 4 — наплавляемая деталь; 5 — газ, транспортирующий порошок; 6 — порошковый питатель

няя своего направления, транспортируются под заданным углом к расплавленному металлу. В то же время транспортирующий газ при выходе из сопла устремляется в противоположную сторону, оттесняя наружный воздух от переплавляемого металла, образуя вокруг расплавленного металла газовую защиту. Это позволяет отказаться от защитного газа как самостоятельного потока и защитного сопла, сократив тем самым расход аргона на 50–60 %, а также уменьшить габариты плазмотрона.

Транспортирующий (защитный) газ выходит наружу на определенном расстоянии от плазмообразующего канала, и его истечение не нарушается воздействием сжатой дуги. При такой защите частицы порошка в газовом потоке выполняют, подобно металлическим сеткам, роль гасителей скорости потока газа и одновременно служат наплавочным материалом. Однако необходимо доказать, что предложенная схема подачи порошка транспортирующим газом обеспечивает качественную защиту расплавленного металла при плазменной наплавке.

Из гидродинамики известно [38, 39], что при движении газового потока, содержащего твердые частицы, в области непосредственного соприкосновения газа с частицами образуется ламинарный слой. В отличие от однородной среды процессы, протекающие между газовым потоком и движущимися в нем твердыми части-

цами, представляют собой сложное физическое явление, математическое описание которого представляет значительные трудности. Между тем для повышения эффективности рассматриваемого процесса необходимо установить закономерности движения как частиц, так и газа в зависимости от воздействия разных факторов.

Расчет скорости истечения газа в газопорошковом потоке и степени ее гашения частицами порошка выполняли путем математического описания характера движения газопорошковой смеси с использованием уравнений механики. Для упрощения решения задачи были приняты следующие допущения [28, 29]:

- столкновение частиц между собой и со стенкой канала не оказывает существенного влияния на скорость движения;
- частицы, одинаковые по размеру и массе, имеют форму шара.

Если в газовый поток ввести порошок, то согласно закону сохранения количества движения:

$$m_r V_0 = (m_r + m_n) V_1, \quad (2)$$

где m_r , m_n — масса газа и порошка соответственно, кг; V_0 — средняя начальная скорость газа, м/с; V_1 — средняя скорость газа в газопорошковом потоке, м/с.

Из уравнения (2) определим V_1 :

$$V_1 = \frac{m_r V_0}{m_r + m_n}. \quad (3)$$

Представим отношение масс порошка и газа и их расходов G_n и G_r :

$$\frac{m_n}{m_r} = \frac{G_n}{G_r} = k, \quad (4)$$

где k — массовая расходная концентрация (характеристика газопорошковых потоков).

Решая уравнение (4) относительно $m_n = km_r$ и подставляя это выражение в формулу (2), получаем:

$$V_1 = \frac{V_0}{1 + k}. \quad (5)$$

При плазменной наплавке газопорошковый поток, перемещаясь по трубе, направляется в полость защитного сопла, имеющего большую площадь поперечного сечения $S_c \mu^2$, чем площадь поперечного сечения трубки $S_r \mu^2$, и претерпевает существенное сопротивление. По данным [17, 28, 40, 41], коэффициент местного сопротивления ξ при внезапном расширении потока определяется по формуле

$$\xi = \frac{S_r}{S_c}. \quad (6)$$

Тогда формулу (5) правомерно записать в следующем виде:

$$V_1 = \left(\frac{V_0}{1 + k} \right) \xi. \quad (7)$$

Для малогабаритного плазмотрона $\xi = 0,44$ [37]. Из выражения (7) видно, что $V_1 < V_0$ и зависит от концентрации частиц в газопорошковом потоке. Начальную скорость газа V_0 рассчитаем по формуле

$$V_0 = \frac{G_r}{S \cdot t}, \quad (8)$$

где G_r — объемный расход газа, m^3 ; S — площадь внутреннего поперечного сечения трубопровода, через который проходит газ, m^2 ; t — время прохождения газа, с (G_r и t определяют, исходя из заданного расхода газа).

Для точности расчетов скорости истечения газа из сопла плазмотрона проведены сравнительные экспериментальные исследования. В процессе опытов замеряли конечную скорость защитного газа без порошка и в смеси с порошком. На рис. 2 показана схема измеряющего устройства, которая состоит из двух частей: приемной и регистрирующей. В качестве приемной части применяли дифференциальную трубку Пито – Прандтля [42], являющуюся более точным средством измерения скорости газового потока. Регистрирующим устройством перепада давлений $\left(\Delta P = \frac{\rho V^2}{2} \right)$ служил тягонапормер, поскольку для обеспечения защиты расплавленного металла при плазменной наплавке требуется незначительный расход газа.

Скорость газа V , соответствующая этому перепаду, определяли по формуле

$$V = k_T \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}, \quad (9)$$

где k_T — коэффициент трубки Пито – Прандтля ($k_T = 1$); ΔP — динамическое давление, Па; ρ — плотность газа, kg/m^3 .

Поскольку измерение скорости газа трубкой является точечным, т. е. относится лишь к одной точке исследуемого газового или газопорошкового потока, протекающего через защит-

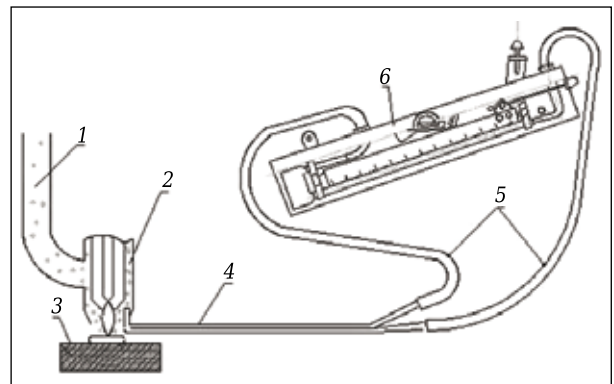


Рис. 2. Схема измерения скорости газа: 1 — газопорошковая смесь; 2 — защитное сопло; 3 — наплавляемая деталь; 4 — трубка Пито – Прандтля; 5 — соединительные трубопроводы; 6 — тягонапормер

ное сопло плазмотрона, для повышения точности измерения проводили в шести точках сопла при трехкратном повторении в каждой точке. Результирующую скорость принимали как среднеарифметическую величину всех замеров. При измерении скорости газа, подаваемого в смеси с транспортирующим порошком в защитное сопло плазмотрона для устранения забивания входного отверстия трубки Пито – Прандтля частицами порошка, их размер (0,6–0,8 мм) выбирали больше размера входного отверстия (~0,5 мм).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СКОРОСТИ ИСТЕЧЕНИЯ ГАЗА И ПОЛЕТА ЧАСТИЦ ПОРОШКА ПРИ ПЛАЗМЕННОЙ НАПЛАВКЕ СЖАТОЙ ДУГОЙ В ГАЗОПОРШКОВОЙ ЗАЩИТНОЙ СРЕДЕ

Результаты расчетных и экспериментальных данных по скорости истечения газа, транспортирующего порошок, показаны на рис. 3.

Изменяя концентрацию частиц порошка, можно в широких пределах регулировать скорость истечения газа. Отношение скорости истечения газа без порошка к скорости истечения газа, транспортирующего порошок, составляет $V_r/V_n = 1,3 \div 2,4$ при $G_r = 8 \div 16$ л/мин, $G_n = 0,20 \div 0,65$ г/с и диаметре защитного сопла 12 и 14 мм.

Качество защиты определяли путем наплавки порошка, транспортируемого газом (горячими углеводородами) от двигателя внутреннего сгорания, на пластину толщиной 8 мм, что позволяет оценить эффективность газовой защиты в динамике, характерной для реального процесса плазменной наплавки порошком. О качестве защиты судили по цвету и ширине неокисленной зоны. Блестящая серебристая поверхность наплавленного покрытия и окружающей его зоны свидетельствует о хорошей защите

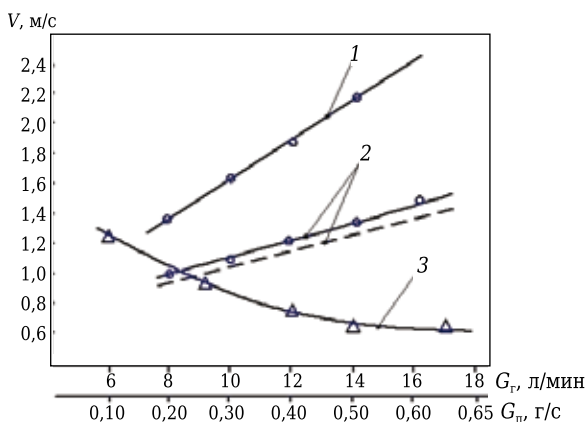


Рис. 3. Влияние расхода газа G_r и газопорошковой смеси G_n на скорость истечения V защитного газа: 1 — защита газом без порошка; 2 — защита газопорошковой смесью с постоянным расходом порошка ($G_n = 0,25$ г/с); 3 — защита газопорошковой смесью с постоянным расходом газа ($G_r = 9$ л/мин); — — — экспериментальная зависимость; - - - - расчетная

(рис. 4, а). Исследования показали, что при защите газопорошковой смесью размер неокисленной зоны на 3–5 мм больше, чем при защите только одним газом. Увеличение размера неокисленной зоны с введением порошка в защитный газ показано на рис. 4, б; при этом пластину наплавляли с подачей порошка, а затем в процессе наплавки порошков перекрывали и последующий нагрев пластины осуществляли в газовой защите без порошка (рис. 4, в). Результаты исследований зависимости ширины защитной зоны от расхода газа, расстояния от плазмотрона до детали и скорости плазменной наплавки показаны на рис. 5.

Оптимальный расход газа, соответствующий наибольшей ширине защитной зоны, составляет 12–16 л/мин. При расходе газа более 16 л/мин ширина защитной зоны уменьшается (см. рис. 5, а), что объясняется возрастанием скорости истечения защитного газа и его переходом от ламинарного истечения к турбулентному. Под-

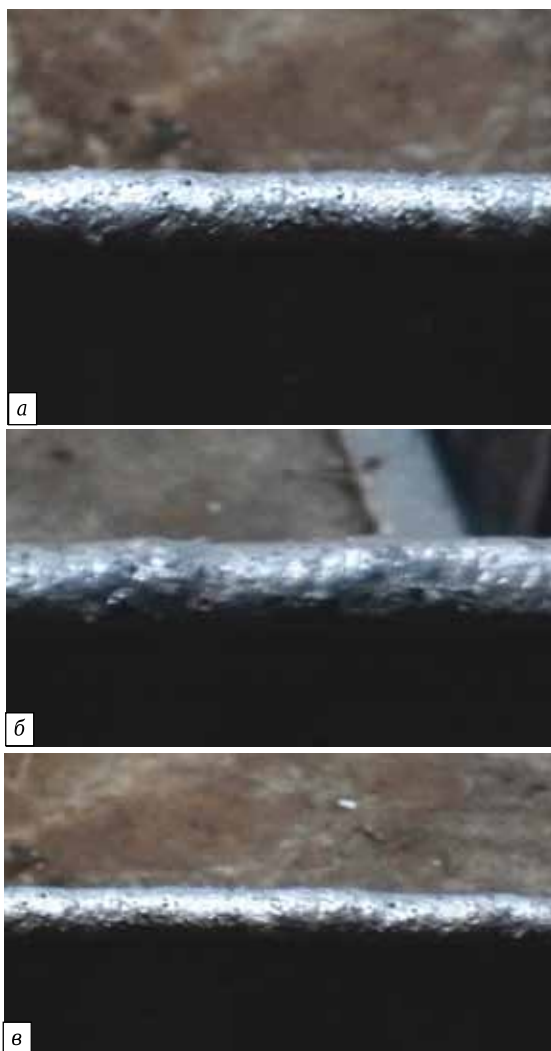


Рис. 4. Общий вид неокисленной зоны: а — при наплавке и защите газопорошковой смесью; б — при наплавке и защите газопорошковой смесью и защите только одним газом; в — общий вид защитной зоны при плазменной наплавке газопорошковой смесью

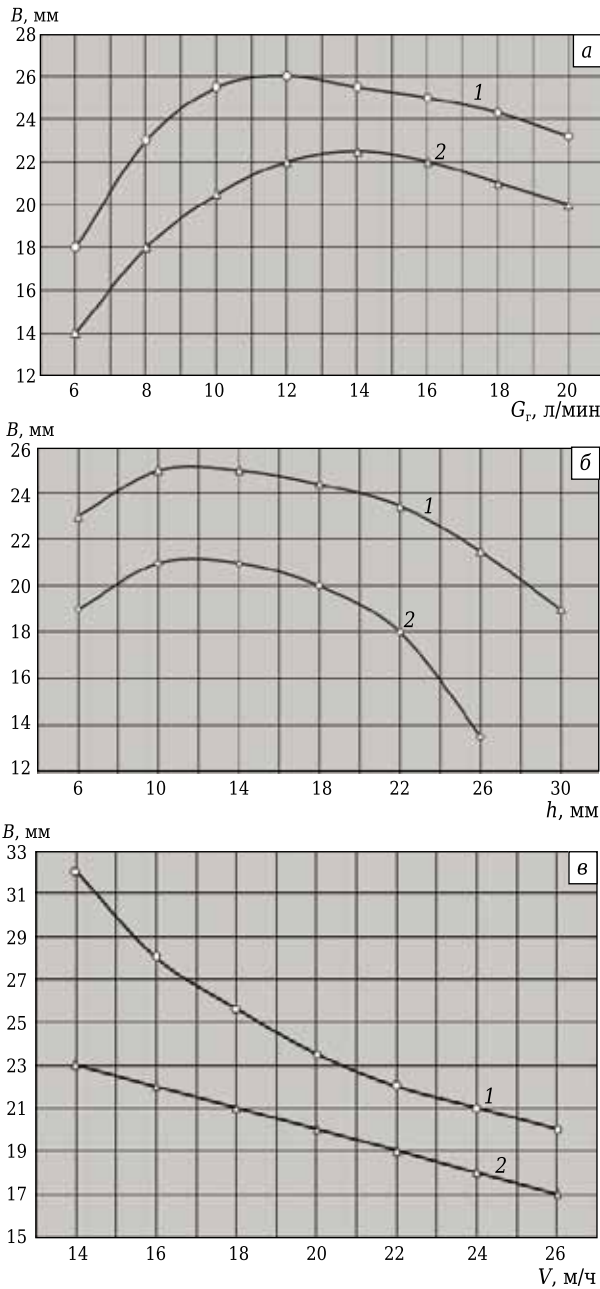


Рис. 5. Зависимости ширины защитной зоны B от расхода газа G_r (а), от расстояния между плазматроном и деталью h (б) и от скорости перемещения плазматрона V (в): 1 — защита газопорошковой смесью; 2 — защита только газом

нятие плазматрона от детали на расстояние более 14 мм уменьшает ширину защитной зоны (см. рис. 5, б) из-за потери жесткости струи защитного газа. При увеличении скорости плазменной наплавки ширина защитной зоны сужается (см. рис. 5, в), поскольку уменьшаются удельный расход газа и скорость его истечения.

Из гидродинамики известно [39, 43], что особенностью движения газопорошковых смесей является наличие определенной разности скоростей твердого и газового компонентов, что может

существенно влиять на выбор режима плазменной наплавки. Поэтому для подбора оптимальных значений расхода газа и порошка необходимо знать как скорость движения газа, так и скорость движения порошка.

Для расчета скорости частиц порошка траектория движения частиц была разбита на четыре участка, характерных для схемы плазменной наплавки (рис. 6) и определена скорость частиц на соответствующих участках. На участке 1–2 скорость частицы определяли по теореме изменения кинетической энергии материальной точки по формуле

$$\frac{mV_{1-2}^2}{2} - \frac{mV_{0-1}^2}{2} = \sum A_i = (mg + F_{1-2})h_{1-2}, \quad (10)$$

где F_{1-2} — сила, с которой газ давит на частицу на участке 1–2, Н; m — масса частицы, кг; g — ускорение свободного падения, м/с² ($g \approx 9,8$ м/с²); h_{1-2} — длина участка 1–2, м.

Пренебрегая силой сопротивления, получаем выражение

$$V_{1-2} = \sqrt{\frac{2(mg + F_{1-2})}{m} h_{1-2} + V_{0-1}^2}. \quad (11)$$

Массу одной частицы определяли по формуле

$$m = \rho \cdot V_{\text{ч}}, \quad (12)$$

где ρ — плотность частицы, кг/м³; $V_{\text{ч}}$ — объем шаровой частицы, м³.

Скорость на участке 0–1 определяли в соответствии с законами свободного падения тела по формуле

$$V_{0-1} = \sqrt{2gh_{0-1}}. \quad (13)$$

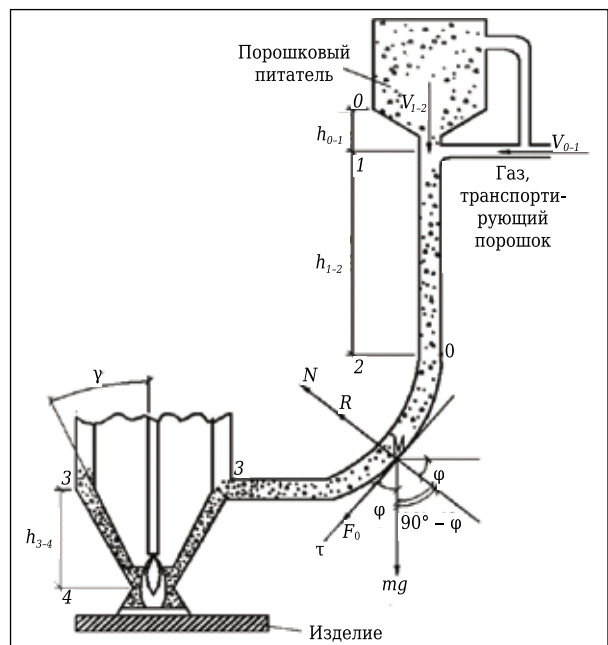


Рис. 6. Расчетная схема определения скорости частиц в газопорошковом потоке при плазменной наплавке: $h_{0-1} = 8$ см; $h_{1-2} = 30$ см; $h_{3-4} = 4$ см; $\gamma = 30^\circ$; $\varphi = 70^\circ$; $R_{2-3} = 10$ см; транспортирующий газ — горячие углеводороды

Более сложно определить скорость на участке 2–3.

Запишем математическое выражение второго закона Ньютона в виде следующей формулы:

$$m \frac{dV}{dt} = F. \quad (14)$$

Это соотношение представляет собой дифференциальное уравнение движения материальной точки, с помощью которого можно решить поставленную задачу, т. е. найти закон движения точки (частицы), если известны масса m частицы, действующая на нее сила F и начальные условия — скорость V_0 и положение точки (частицы) в начальный момент времени. В зависимости от характера и постановки конкретной задачи уравнение (14) решают в координатах или в проекциях на касательную и нормаль к траектории в данной точке. Если заранее известна траектория материальной точки, то более удобно пользоваться не декартовыми, а обычными координатными осями и поставленную задачу решать с использованием уравнения движения несвободной материальной точки в форме Эйлера:

$$m \frac{d^2V}{dt^2} = F. \quad (15)$$

Траекторию на участке 2–3 можно принять за часть окружности (см. рис. 6). Проектируем на направление касательной и нормали к траектории в данной точке:

$$m \frac{d^2V}{dt^2} = mg \cdot \cos\varphi + F_{2-3}, \quad (16)$$

где F_{2-3} — сила, с которой газ давит на участке 2–3.

$$S = OM = R \cdot \varphi,$$

$$\frac{d^2S}{dt^2} = R \frac{d^2\varphi}{dt^2} = R \frac{du}{dt} = R \frac{d\omega}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} = R \frac{d\omega}{d\varphi} \cdot \omega, \quad (17)$$

где ω — угловая скорость.

Подставив выражение (17) в уравнение (16), получим

$$mR \frac{d\omega}{d\varphi} \cdot \omega = mg \cdot \cos\varphi + F_{2-3}.$$

Разделим переменные и сведем в уравнение $\omega \cdot mRdr = (mg \cdot \cos\varphi + F_{2-3})d\varphi$.

Решая это дифференциальное уравнение, получим выражение:

$$mR \int \omega dr = (mg \cdot \cos\varphi + F_{2-3})d\varphi + C, \\ mR \frac{\omega^2}{2} = mg \cdot \sin\varphi + F_0\varphi + C. \quad (18)$$

Начальной скоростью на участке 2–3 будет скорость, полученная в конце участка 1–2 (V_{2-1}).

Таким образом, начальные условия для участка 2–3: $\varphi = 0$; $V = V_{1-2}$.

Используя формулу теоретической механики, преобразуем уравнение (18) и получим уравнение

$$\frac{mV_{2-3}^2}{2R} = mg \cdot \sin\varphi + F_0 + C, \quad (19)$$

где V_{2-3} — скорость частиц порошка в конце участка 2–3.

Из начальных условий находим C :

$$C = \frac{mV_{1-2}^2}{2R}.$$

Подставляя все значения в формулу (19), получим

$$\frac{mV_{2-3}^2}{2R} = mg \cdot \sin\varphi + F_{2-3}\varphi + \frac{mV_{1-2}^2}{2R}.$$

Отсюда определим скорость частиц на участке 2–3 по формуле

$$V_{2-3}^2 = 2Rg \cdot \sin\varphi + \frac{2RF_{2-3}\varphi}{m} + V_{1-2}^2, \\ V_{2-3} = \sqrt{2Rg \cdot \sin\varphi + \frac{2RF_{2-3}\varphi}{m} + V_{1-2}^2}. \quad (20)$$

Скорость в конце участка 3–4 также определяли согласно теореме изменения кинетической энергии материальной точки:

$$V_{3-4} = \sqrt{\frac{2(mg \cdot \cos\gamma) + F_{3-4}}{m} \cdot \frac{h_{3-4}}{\cos\gamma} + [V_{2-3} \cdot \cos(\varphi - \gamma)]^2}, \quad (21)$$

где γ — угол между вертикалью и траекторией движения частиц на участке 3–4 (для разных конструкций плазмотронов γ изменяется в пределах от 5 до 30°).

В соответствии с предложенной математической моделью разработан программный комплекс для ПЭВМ [44, 45], с использованием которого проанализирован характер движения частиц порошка в зависимости от массы и геометрических параметров траектории. По результатам расчетов построены экспериментальные зависимости (рис. 7), которые показывают, что с увеличением массы частиц скорость их снижается (см. рис. 7, а). Повышение расстояния (высоты) от порошкового питателя до плавляемой детали на любом участке движения частиц приводит к росту их скорости (см. рис. 7, б–г). Скорость частиц возрастает также с увеличением угла γ и радиуса R (см. рис. 7, д, е). При этом чем ближе эти параметры к вертикальной прямой транспортирования порошка, тем выше скорость частиц. Исходные данные частиц порошка (размер, площадь, масса и сила, действующая на частицу на разных участках траектории), используемые при расчетах, приведены в таблице.

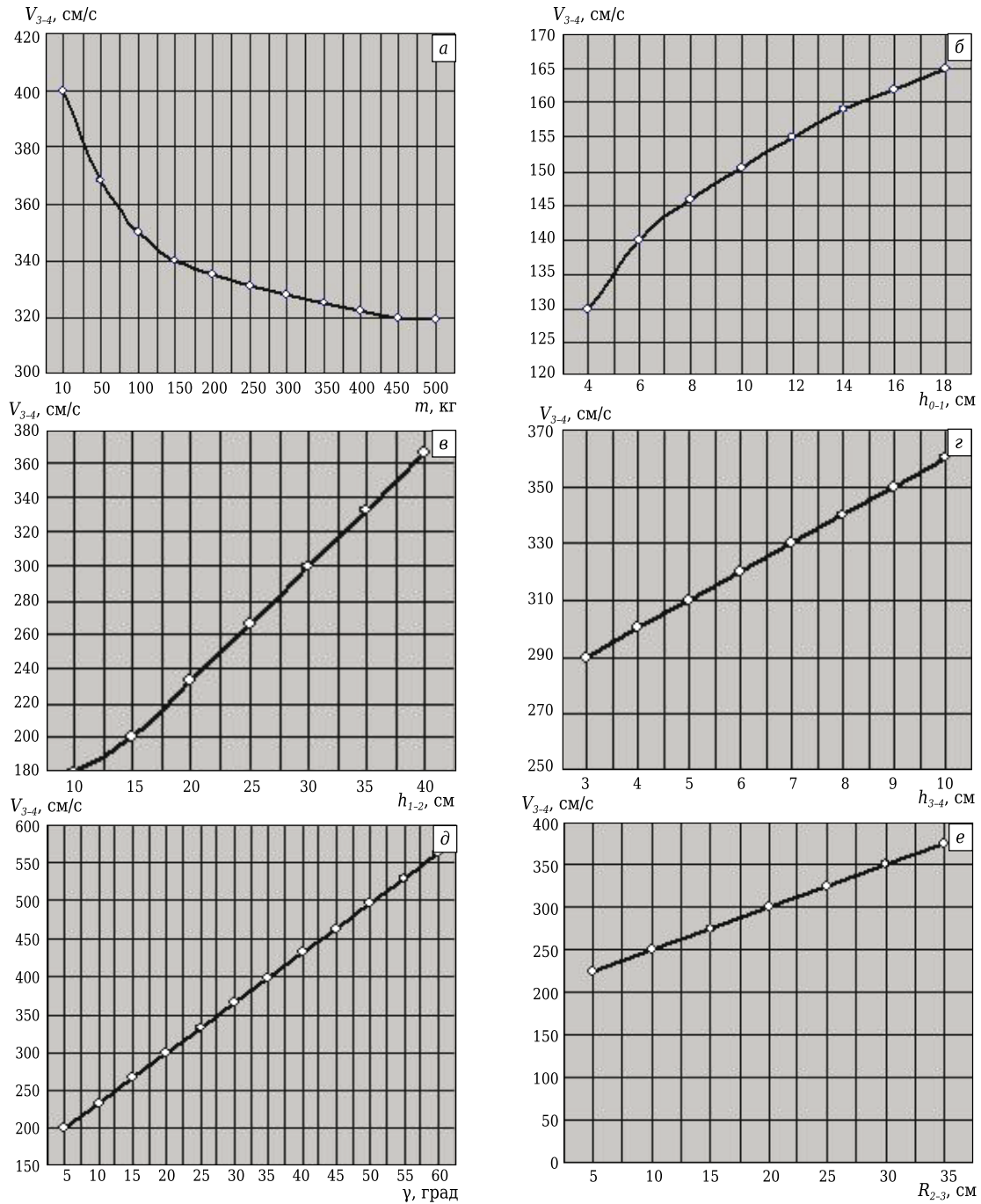


Рис. 7. Зависимости скорости V движения частиц от массы m и геометрических параметров движения (h , γ , R)

Для проверки расчетных данных скорость частиц на выходе определяли методами покадровой фотосъемки и видеосъемки с использованием программы Pinnacle Studio Plus (рис. 8),

которая позволяет осуществлять покадровый просмотр как видео, так и фотосъемки (рис. 9).

Первый метод покадровой фотосъемки применяется при непрерывном освещении летящих

Исходные данные частиц порошка, используемые при расчетах

r , мм	S , 10^{-8} м ²	m , 10^{-8} кг	F_{1-2} , 10^{-4} Н	F_{2-3} , 10^{-4} Н	F_{3-4} , 10^{-4} Н
0,1	3,14	3,1	1,44	1,03	0,63
0,2	6,3	25	2,84	2,08	1,26
0,3	28	84	12,6	92,4	5,6
0,4	50	200	22,5	16,5	10,0
0,5	79	390	35,5	26,07	15,8
0,6	113	669	50,85	37,3	22,6

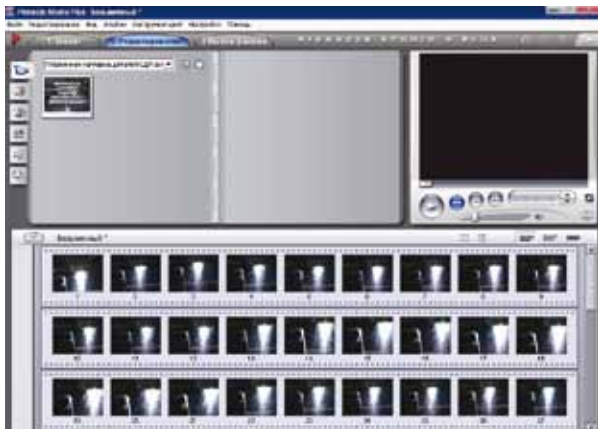


Рис. 8. Интерфейс программы Pinnacle Studio Plus для просмотра кадров фото и видеосъемки

частиц. При плазменной наплавке источником постоянного освещения является плазменная струя. Длину траектории полета частиц определяли по цифровой фотографии (с учетом экспозиции фотосъемки), а время — по выдержке. Второй метод видеосъемки отличается более высокой точностью определения скорости полета частиц. Съемки выполняли цифровой видеокамерой Sony

Handycam HDR-CX7EK в видеоформате MPEG4 – AVCHD с возможностью фотосъемки при расходе газа 6–16 л/мин, расходе порошка 0,25–0,55 г/с и диаметре частиц 0,1–0,6 мм.

Скорость частиц рассчитывали с учетом их относительного взаимного положения на соседних видеокадрах и межкадровой экспозиции. Измерения показали, что скорость частиц находится в пределах 0,74–1,32 м/с. На изменение скорости частиц значительно влияют их размер и высокий предел скорости (1,32 м/с). Измерение скорости частиц двумя методами показало их высокую сходимость по точности.

Результаты измерений свидетельствуют также о том, что скорость твердых частиц несколько ниже (при прочих равных условиях), чем скорость транспортирующего их газа. Значения скоростей частиц V_{3-4} , рассчитанных теоретически и полученных экспериментально, различаются не более чем на 13 %, что указывает на возможность и целесообразность применения полученных выражений (11), (20) и (21) для определения скорости частиц расчетным путем с использованием программного обеспечения.

Таким образом, частицы порошка обеспечиваю-т ламинарное истечение газа из защитного соп-



Рис. 9. Покадровый просмотр видеосъемки для определения скорости полета частиц, транспортируемых защитным газом через сопло плазматрона

ла, поскольку они замедляют (гасят) его движение и служат как бы фиксированными в статистическом смысле центрами сопротивления движению газа в виде пакета сеток, используемых при плазменном способе наплавки для улучшения качества защиты. Однако в отличие от неподвижных сеток газопорошковая смесь является постоянно движущимся фильтром (практически с неограниченной длиной) и при сравнительно небольшом расходе газа обеспечивает достаточную жесткость струи. Кроме того, частицы порошка находятся в газовой среде вплоть до поступления к расплавленному металлу и защищены тем самым от контакта с окружающей средой. При этом качество защиты расплавленного металла в меньшей степени зависит от изменения параметров режима плазменной наплавки (силы тока дуги плазмотрона, скорости плазменной наплавки и др.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании проведенных исследований предложен новый способ защиты сварочной

ванны газопорошковым потоком. Для осуществления и реализации этого способа сконструирован плазмотрон, позволивший производить наплавку по схеме, при которой газ, транспортирующий наплавочный порошок, выполняет одновременно защитные функции. Применение разработанного способа обеспечивает сокращение расхода аргона на 50–60 % и уменьшение габаритов плазмотрона, отказавшись от защитного сопла и защитного газа как самостоятельного потока.

2. Опыт работы плазменных установок в производственных условиях показал, что применение газопорошковой защиты для плазменной наплавки порошков из твердых сплавов, транспортируемых в зону наплавки газом горячими углеводородами от двигателя внутреннего сгорания, обеспечивает эффективность работы сжатой дуги, надежную защиту расплавленного металла от окружающего воздуха и позволяет получить износостойкие покрытия с минимальной глубиной проплавления основного металла.

Библиографический список

1. **Косилов, А. И.** Плазменная наплавка деталей порошковыми композициями / *А. И. Косилов* // Техника в сельском хозяйстве. — 1983. — № 2. — С. 51–56.
2. **Хасуи, А.** Наплавка и напыление / *А. Хасуи, О. Моригаки*; под ред. В. С. Степина, Н. Г. Шестеркина. — М.: Машиностроение, 1985. — 240 с.
3. **Сидоров, А. И.** Сравнительная оценка способов плазменной наплавки и плазменного напыления с оплавлением / *А. И. Сидоров, С. А. Сидоров, С. В. Карцев, И. Н. Кравченко* // Инженерно-техническое обеспечение АПК и машинно-технологические станции в условиях реформирования. В 2 т. Т. 2. — Орел: Изд-во ОрелГАУ, 2000. — С. 116–118.
4. **Переpletчиков, Е. Ф.** Плазменная наплавка / *Е. Ф. Переpletчиков* // Ремонт. Восстановление. Модернизация. — 2005. — № 12. — С. 35–40.
5. **Гладкий, П. В.** Плазменная наплавка / *П. В. Гладкий, Е. Ф. Переpletчиков, И. А. Рябцев*. — Киев: Эко-технология, 2007. — 292 с.
6. **Гладкий, П. В.** Плазменная наплавка (Обзор) / *П. В. Гладкий, Е. Ф. Переpletчиков, И. А. Рябцев* // Автоматическая сварка. — 2007. — № 2. — С. 32–40.
7. **А. с. 1473225, В 23 К 9/16, 9/04.** Плазмотрон для наплавки / *Н. А. Соснин, С. А. Ермаков, Б. Л. Вичик, В. П. Зайцев*; опубл. 09.03.1987.
8. **Сидоров, А. И.** Плазмотрон для наплавки порошковыми сплавами в защитной воздушно-порошковой среде / *А. И. Сидоров, С. А. Сидоров* // Сварочное производство. — 1987. — № 4. — С. 27.
9. **Коротеев, А. С.** Плазмтроны: конструкции, характеристики, расчет / *А. С. Коротеев, В. М. Миронов, Ю. С. Свирчук*. — М.: Машиностроение, 1993. — 296 с.
10. **Гладкий, П. В.** Тепловые характеристики дуги наплавочных плазмтронов / *П. В. Гладкий* // Автоматическая сварка. — 1999. — № 6. — С. 13–17.
11. **Аньшаков, А. С.** Влияние уступа в выходном электроде на эффективность работы двухкамерного плаз-

- мтронна / *А. С. Аньшаков, Э. К. Урбах* [и др.] // Теплофизика и аэромеханика. — 2006. — Т. 13, № 3. — С. 493–500.
12. **Клименко, Г. К.** Конструкции электродуговых плазмтронов [Электронный ресурс] / *Г. К. Клименко, А. А. Ляпин*. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. — 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
13. **Радько, С. И.** Устройство электродугового плазмтрона и моделирование его энергетических характеристик / *С. И. Радько, Э. К. Урбах* // Доклады ТУСУР. — 2012. — № 1 (25), ч. 1. — С. 212–215.
14. **Аньшаков, А. С.** Исследование энергетических характеристик в электродуговом плазмтроне с выходным ступенчатым электродом / *А. С. Аньшаков, П. В. Домаров* // Научный вестник НГТУ. — 2013. — № 4 (53). — С. 139–143.
15. **Самотугин, С. С.** Оптимизация конструкции плазмтрона для поверхностной модификации стальных изделий / *С. С. Самотугин, В. А. Газарин* // Вестник Приазовского гос. техн. ун-та. — 2017. — Вып. 35. — С. 104–110.
16. **Пат. 21914 Республика Беларусь**, МПК Н 05 Н 1/00. Плазмотрон для нанесения покрытия / *Оковитый В. В., Девойно О. Г., Оковитый В. А., Асташинский В. М.*; опубл. 30.06.2018.
17. **Сидоров, А. И.** Восстановление деталей сельскохозяйственной техники плазменной наплавкой: дис. ... докт. техн. наук: 05.20.03. — М., 1989. — 220 с.
18. **Сидоров А. И.** Эффективность плазменного напыления с последующим оплавлением / *А. И. Сидоров, С. В. Карцев* // Механизация и электрификация сельского хозяйства. — 2000. — № 12. — С. 20–23.
19. **Карцев, С. В.** Разработка технологического процесса упрочнения быстроизнашиваемых деталей землеройных машин плазменной наплавкой / *С. В. Карцев, И. Н. Кравченко, М. Н. Ерофеев* [и др.] // Отчет о НИР. Шифр «Наплавка». Рег. № 148. — Балашиха: ВТУ при Спецстрое России, 2006. — 135 с.

20. **Ермаков, С. А.** Особенности плазменной порошковой наплавки двухдуговым плазмотроном / С. А. Ермаков, Н. А. Соснин, П. А. Тополянский // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки. Ч. 1. — СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2007. — С. 94–101.
21. **Карцев, С. В.** Особенности плазменной наплавки порошковых материалов / С. В. Карцев, А. Н. Шиповалов, Г. А. Храпов, С. М. Зубачев // Труды ГосНИТИ. — 2009. — Т. 103. — С. 146–148.
22. **Кудинов, В. В.** Нанесение плазмой тугоплавких покрытий / В. В. Кудинов, В. М. Иванов. — М. : Машиностроение, 1981. — 192 с.
23. **Кулик, А. Я.** Газотермическое напыление композиционных порошков / А. Я. Кулик, Ю. С. Борисов, А. С. Мнухин [и др.]. — Л. : Машиностроение, 1985. — 199 с.
24. **Борисов, Ю. С.** Газотермические покрытия из порошковых материалов : справочник / Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов, С. Л. Сидоренко [и др.]. — Киев : Наукова думка, 1987. — 543 с.
25. **Кудинов, В. В.** Нанесение покрытий плазмой / В. В. Кудинов, П. Ю. Пекшес, В. Е. Белашенко [и др.]. — М. : Наука, 1990. — 408 с.
26. **Балдаев, Л. Х.** Газотермическое напыление / Л. Х. Балдаев, В. Н. Борисов, В. А. Вахалин [и др.] ; под общ. ред. Л. Х. Балдаева. — М. : Маркет ДС, 2007. — 344 с.
27. **Калита, В. И.** Плазменные покрытия с нанокристаллической и аморфной структурой / В. И. Калита, Д. И. Комлев. — М. : Лидер М, 2008. — 388 с.
28. **Сидоров, А. И.** Восстановление деталей напылением и наплавкой / А. И. Сидоров. — М. : Машиностроение, 1987. — 192 с.
29. **Карцев, С. В.** Исследование эффективности способа защиты плазменной наплавки газопорошковым потоком / С. В. Карцев, А. Н. Шиповалов, Г. А. Храпов, И. Н. Кравченко // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки. Ч. 1. — СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2007. — С. 131–134.
30. **Ардентов, В. В.** О влиянии конструкции проточной части горелок на характеристики газовой защиты / В. В. Ардентов, Г. Н. Федоренко // Сварочное производство. — 1983. — № 10. — С. 14, 15.
31. **Новожилов, Н. М.** Основы металлургии дуговой сварки в газах / Н. М. Новожилов. — М. : Машиностроение, 1979. — 231 с.
32. **Дмитрик, В. В.** Разработка метода определения температурного режима расплава ванны / В. В. Дмитрик // Изв. вузов. Машиностроение. — 1999. — № 1. — С. 76–80.
33. **Гладкий, П. В.** Температура и геометрические размеры сварочной ванны при плазменно-порошковой наплавке / П. В. Гладкий, А. В. Павленко, Е. Ф. Переплетчиков // Автоматическая сварка. — 2006. — № 6. — С. 15–19.
34. **Соснин, Н. А.** Плазменные технологии. Руководство для инженеров / Н. А. Соснин, С. А. Ермаков, П. А. Тополянский. — СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2013. — 406 с.
35. **Пузряков, А. Ф.** Технологии нанесения защитных и износостойких покрытий повышенной прочности / А. Ф. Пузряков, И. Н. Кравченко, И. К. Соколов [и др.]. — М. : Эко-Пресс, 2013. — 300 с.
36. **Кравченко, И. Н.** Ресурсосберегающие плазменные технологии при ремонте перерабатывающего оборудования / И. Н. Кравченко, М. А. Глинский, С. В. Карцев [и др.]. — М. : ИНФРА-М, 2020. — 202 с.
37. **Пат. 92238 Российская Федерация**, МПК Н 01 J 1/02. Плазмотрон для плазменной наплавки / Карцев С. В. — № 2009123241 ; заявл. 18.06.2009 ; опубл. 10.03.2010, Бюл. № 7.
38. **Гордон, Г. М.** Пылеулавливание и очистка газов в цветной металлургии / Г. М. Гордон, И. Л. Пейсахов. — М. : Металлургия, 1977. — 456 с.
39. **Старк, С. Б.** Пылеулавливание и очистка газов в металлургии / С. Б. Старк. — М. : Металлургия, 1977. — 328 с.
40. **Юдаев, В. Ф.** Коэффициенты усреднения импульса и кинетической энергии ламинарного и турбулентного режимов течения / В. Ф. Юдаев // Изв. вузов. Машиностроение. — 1985. — № 3.
41. **Юдаев, В. Ф.** О коэффициентах усреднения импульса и кинетической энергии течений ньютоновской и неньютоновской жидкостей / В. Ф. Юдаев // Изв. вузов. Машиностроение. — 1986. — № 9.
42. **Юдаев, В. Ф.** Гидравлика / В. Ф. Юдаев. — М. : ИНФРА-М, 2017. — 301 с.
43. **Старк, С. Б.** Газоочистные аппараты и установки в металлургическом производстве / С. Б. Старк. — М. : Металлургия, 1990. — 400 с.
44. Диалоговая информационная система «Выбор режимов плазменной наплавки при разработке технологии восстановления деталей» [Электронный ресурс]. — Балашиха : ВТУ при Спецстрое России, 2008. — 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
45. **Кравченко, И. Н.** Оптимизация технологических режимов нанесения защитных покрытий плазменными методами (TST Plasma Renovation) / И. Н. Кравченко, М. А. Глинский, В. М. Корнеев, А. В. Сиротов // Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ № 2017619358 (RU). — № 2017615973 ; заявл. 26.06.2017 ; опубл. 24.08.2017. ■

Получено 23.05.20

© И. Н. Кравченко, С. В. Карцев,
Ю. А. Кузнецов, 2020 г.