

Д. т. н. **И. Н. Кравченко**^{1,2} (✉), к. т. н. **С. В. Карцев**², д. т. н. **Ю. А. Кузнецов**³,
д. т. н. **С. А. Величко**⁴

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

⁴ ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарёва», г. Саранск, Россия

УДК 621.793.74:539.234]:62-9

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ И ПЛАЗМЕННОГО ОПЛАВЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

Представлены результаты оптимизации параметров и режимов плазменного напыления (сила тока дуги плазматрона 170–175 А, напряжение 165–170 В, расход газа 2,5–2,7 м³/ч, расход напыляемого материала 10 г/с, дистанция напыления 140–160 мм) и последующего плазменного оплавления (сила тока дуги плазматрона 190–200 А, напряжение 165–170 В, расход газа 2,5–2,7 м³/ч, расстояние от плазматрона до детали 40–60 мм, толщина оплавливаемого покрытия до 2 мм), влияющих на формирование качественных покрытий с заданными свойствами.

Ключевые слова: плазменное напыление, оплавление покрытий, оптимизация режимов, плазмобразующий газ, плазматрон.

ВВЕДЕНИЕ

Плазменные методы нанесения защитных и износостойких покрытий относятся к числу наиболее активно развиваемых и промышленно освоенных способов [1–7]. Однако широкое их применение сдерживается не только относительно высокой стоимостью, но и недостаточной работоспособностью. Это связано прежде всего с более низкими физико-механическими показателями материала покрытия по сравнению с композитным материалом и низкой прочностью сцепления, которая для металлических покрытий составляет 10–50 МПа [8–10], что на порядок ниже прочности металлов.

В настоящее время применяемые в промышленности технологии плазменного напыления не всегда могут обеспечить получение качественных покрытий [11–14], удовлетворяющих данным требованиям. Решение этой проблемы может иметь следующие направления:

– оптимизация режимов плазменного напыления и последующего оплавления, способствующих повышению работоспособности покрытий в рабочих условиях;

– разработка способа подготовки напыляемой поверхности, обеспечивающего нанесение покрытий заданной толщины;

– нанесение многослойных покрытий повышенной прочности, удовлетворяющих заданному комплексу требований.

Исходя из этого, можно сделать вывод о необходимости проведения дальнейших комплексных исследований, направленных на развитие этих направлений, для достижения поставленной цели — повышение качества покрытий, получаемых методом плазменного напыления и их последующего плазменного оплавления [15, 16].

ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Поскольку оплавление является окончательной операцией технологического процесса, то его выполнение возможно только после получения качественных покрытий. Поэтому в первую очередь устанавливали закономерности влияния отдельных параметров на режимы плазменного напыления и подбирали оптимальные значения этих параметров [17, 18]. При этом методика исследований включала оценку:



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

- зависимости скорости напыления от расхода плазмообразующего газа (смесь сжатого воздуха с горячими углеводородами);
- зависимости диаметра пятна нагрева от расстояния между плазмотроном и деталью;
- зависимости скорости напыления от толщины напыляемого покрытия;
- зависимостей производительности и удельного расхода порошка от толщины напыляемого покрытия.

Экспериментальные исследования диаметра пятна напыления от расстояния между плазмотроном и деталью проводили при постоянных значениях следующих параметров: сила тока дуги плазмотрона 170–180 А, напряжение 170 В, расход газа 2,7 м³/ч, расход порошка 0,85 г/с, длительность напыления 30 с, толщина пластины 10 мм. Оценку продолжительности плазменного оплавления в зависимости от расстояния между плазмотроном и деталью, а также скорости оплавления в зависимости от силы тока и толщины оплаваемого покрытия выполняли при постоянных параметрах: сила тока дуги плазмотрона 190–200 А, напряжение дуги плазмотрона 170 В, расход плазмообразующего газа 2,7 м³/ч, толщина пластины 10 мм, толщина напыленных покрытий 1,0, 1,5 и 2,0 мм.

При напылении производительность определяли как площадь напыления в единицу времени [1, 19]. При известной скорости плазменного напыления V и ширине напыленного покрытия b (диаметр пятна напыления) производительность процесса напыления W выражается формулой

$$W = Vb. \quad (1)$$

Удельный расход порошка G , необходимый для плазменного напыления, определяли как отношение расхода порошка Q_n к производительности процесса напыления W по формуле

$$G = Q_n / W. \quad (2)$$

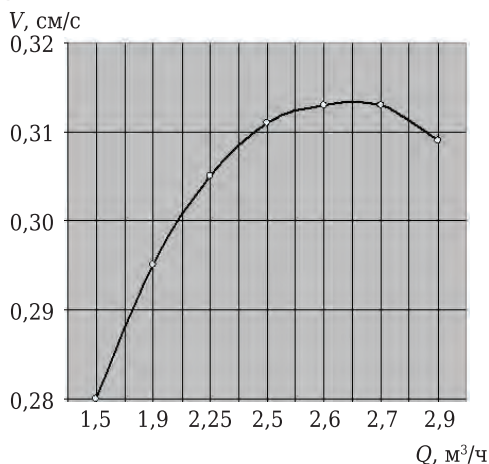


Рис. 1. Зависимость скорости V напыления от расхода Q плазмообразующего газа. Параметры напыления: сила тока 170 А; напряжение 170 В; толщина напыляемого покрытия 1–1,2 мм; расстояние между плазмотроном и деталью 150 мм

ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ НАПЫЛЕНИЯ ОТ РАСХОДА ПЛАЗМООБРАЗУЮЩЕГО ГАЗА

Отличительной особенностью применяемой для лабораторных исследований мобильной многофункциональной плазменной установки является численное равенство силы тока (170–180 А) и напряжения (170 В); использование воздуха как плазмообразующего газа значительно повышает напряжение и энтальпию плазменной струи. Поэтому исследование данной зависимости заключалось в определении оптимального расхода воздуха.

В процессе опыта расход воздуха изменяли от 1,6 до 3 м³/ч через каждые 0,5 м³/ч и фиксировали приборами (манометр, ротаметр), установленными на пульте управления. Экспериментальные данные показали, что с увеличением расхода сжатого воздуха скорость плазменного напыления возрастает до определенного значения (рис. 1), а затем постепенно снижается. Такой характер кривой объясняется тем, что при возрастании расхода газа в дуговом разряде сопла увеличиваются число заряженных частиц и степень ионизации воздуха, что способствует повышению температуры и энтальпии плазменной струи. Дальнейшее возрастание расхода газа ведет к тому, что количество газовых молекул, поступающих в сопло плазмотрона, начинает значительно превышать число частиц, способных ионизироваться в дуговом разряде при данной мощности плазменной струи.

Увеличение содержания холодного газа ведет к снижению температуры и, как следствие, к уменьшению скорости напыления. Из рис. 1 видно, что наиболее высокой скорости плазменного напыления соответствует расход воздуха от 2,5 до 2,75 м³/ч. Полученную норму расхода воздуха можно считать оптимальной.

ЗАВИСИМОСТЬ ДИАМЕТРА ПЯТНА НАПЫЛЕНИЯ ОТ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ПЛАЗМОТРОНОМ И ДЕТАЛЬЮ

Плазменное напыление осуществляли на заранее подготовленную поверхность с подогревом до 200 °С термоабразивным инструментом [19, 20]. Контроль процесса осуществляли термopарами, спаянными с одного конца и уплотненными в просверленных отверстиях с противоположной стороны напыляемой поверхности. Другие два провода соединены с гальванометром; по шкале с делениями в градусах определяли температуру. Опыты проводили при изменении расстояния от 50 до 200 мм через каждые 20 мм.

Установлено (рис. 2), что при изменении расстояния от 50 до 140 мм формируются покрытия низкого качества из-за значительного силового воздействия плазменной струи и перегрева напыляемой поверхности; наблюдаются свертывание покрытий, а также трещины и отслаивание.

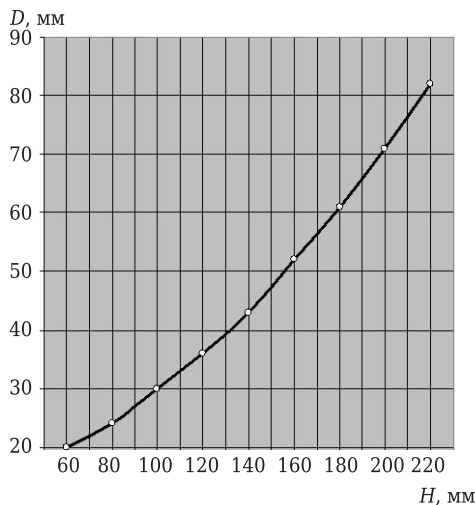


Рис. 2. Зависимость диаметра D пятна напыления от расстояния H между плазмотроном и деталью. Параметры напыления: сила тока дуги плазмотрона 170 А; напряжение дуги плазмотрона 170 В; расход плазмообразующего газа 1,7 м³/ч; длительность напыления 60 с; расход порошка 0,85 г/с

Наиболее качественные покрытия получаются при расстоянии 140–160 мм. Этот интервал и соответствующий ему диаметр пятна напыления (45–50 мм) можно считать рациональными. При этом за заданное время (30 с) наносится покрытие толщиной 0,8–1,0 мм.

При дальнейшем увеличении расстояния до 200 мм качество покрытий не ухудшается, но процесс плазменного напыления становится экономически нецелесообразным: толщина покрытия за это время уменьшается до 0,4–0,6 мм, потери порошка увеличиваются. Это объясняется уменьшением теплового воздействия частиц порошка, часть которых с увеличением расстояния достигает напыляемой поверхности не в оплавленном состоянии, а в холодном.

ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ НАПЫЛЕНИЯ ОТ ТОЛЩИНЫ НАНОСИМОГО ПОКРЫТИЯ

Экспериментальные исследования выполняли после опытного определения рациональных параметров напыления (рис. 3). При плазменном напылении применяли порошковую смесь следующего состава [21]: сплав на основе никеля марки ПР-70Х17С4Р4 (27 %) и сплав на основе железа марки ПГ-ФБХ-6-2 (73 %). Толщину напыленного покрытия измеряли с помощью шаблона и проверяли микрометром, продолжительность процесса — секундомером.

Результаты исследований показали, что для стабильного процесса напыления покрытия заданной толщины и требуемого состава наиболее рационально наносить при постоянном расходе порошковой смеси, а необходимую толщину покрытия регулировать изменением скорости напыления. Из рис. 3 видно, что с

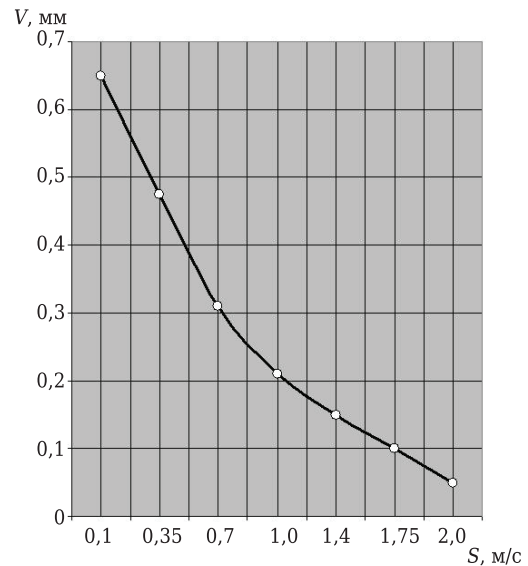


Рис. 3. Зависимость скорости V напыления от толщины S напыляемого покрытия. Параметры напыления: сила тока дуги плазмотрона 170 А; напряжение дуги плазмотрона 170 В; расход плазмообразующего газа 2,7 м³/ч; толщина пластины 10 мм; расстояние между плазмотроном и деталью 150 мм; расход порошковой смеси 0,85–1,0 г/с; размеры напыляемой пластины 10×50×100 мм

увеличением толщины покрытия скорость напыления снижается. Это объясняется последовательностью и техникой напыления, которая заключается в подогреве напыляемого участка поверхности, последовательном повторновозвратном движении плазмотрона и напылении отдельных слоев толщиной 0,08–1,1 мм за один проход. При возрастании толщины каждый последующий слой укладывается на достаточно прогретый предыдущий слой и требует меньших затрат энергии.

ЗАВИСИМОСТИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И УДЕЛЬНОГО РАСХОДА ПОРОШКА ОТ ТОЛЩИНЫ НАПЫЛЯЕМОГО ПОКРЫТИЯ

При объединении формул (1) и (2) получена номограмма (рис. 4), с помощью которой можно определить по заданной толщине покрытия производительность плазменного напыления и необходимый расход порошка при выбранной постоянной мощности дуги, подводимой к плазмотрону. Так, при плазменном напылении покрытия толщиной 1,5 мм производительность составляет 0,7 см²/с, а расход порошка при этой производительности 1,2 г/см² (правило пользования номограммой показано пунктирными линиями). Предложенная номограмма характеризует технико-экономические показатели процесса, по ней можно планировать расход порошка и продолжительность плазменного напыления требуемой поверхности на заданную толщину.

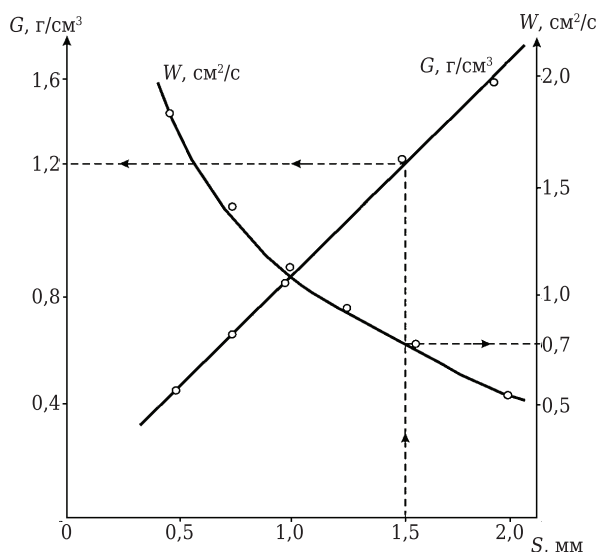


Рис. 4. Зависимость производительности W и удельного расхода G порошка от толщины S напыляемого покрытия

ЗАВИСИМОСТЬ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ПЛАЗМЕННОГО ОПЛАВЛЕНИЯ ОТ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ПЛАЗМОТРОНОМ И ДЕТАЛЬЮ

Расстояние между плазмотроном и деталью фиксировали металлической линейкой, установленной параллельно плазмотрону, продолжительность напыления — секундомером.

Из рис. 5 видно, что с увеличением расстояния от плазмотрона до детали продолжительность плазменного оплавления возрастает. При приближении плазмотрона к детали менее чем на 40 мм оплавление нарушается из-за высокой

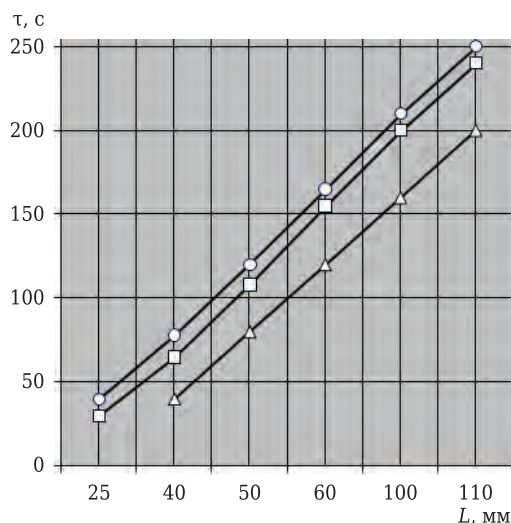


Рис. 5. Зависимость продолжительности τ оплавления от расстояния L между плазмотроном и деталью: $\circ$, $\square$, Δ — толщина напыленного покрытия 2,0, 1,5 и 1,0 мм соответственно. Параметры напыления: напряжение дуги плазмотрона 170 В; расход плазмообразующего газа $2,7 \text{ м}^3/\text{ч}$; расстояние от плазмотрона до детали 50 мм; толщина пластины 10 мм

концентрации энергии и температуры плазменной струи.

При недостаточном прогреве детали происходит быстрый перегрев покрытия. Кроме того, причинами нарушения покрытия, подлежащего оплавлению, могут быть высокая скорость истечения плазменной струи и значительное давление на напыленную поверхность. С точки зрения качества оплавления и производительности процесса расстояние от 40 до 60 мм можно считать рациональным.

При расстоянии от 60 до 80 мм качество оплавленных покрытий не ухудшается, но возрастает продолжительность оплавления. Чем дальше удаляется от плазмотрона плазменная струя, тем с меньшей силой она подвергается сжимающему воздействию со стороны сопла плазмотрона и проходящего через него газа. При этом плазменная струя расширяется до свободных размеров, плотность и сопротивление падают и, как следствие, снижается температура, уменьшается подвод теплоты, возрастает продолжительность оплавления.

ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ОПЛАВЛЕНИЯ ОТ СИЛЫ ТОКА И ТОЛЩИНЫ ОПЛАВЛЯЕМОГО ПОКРЫТИЯ

Анализ результатов проведенных исследований показал, что скорость оплавления с увеличением силы тока возрастает (рис. 6) и снижается с увеличением толщины оплавляемого покрытия (рис. 7). Продолжительность оплавления возрастает с ростом толщины пластины (рис. 8).

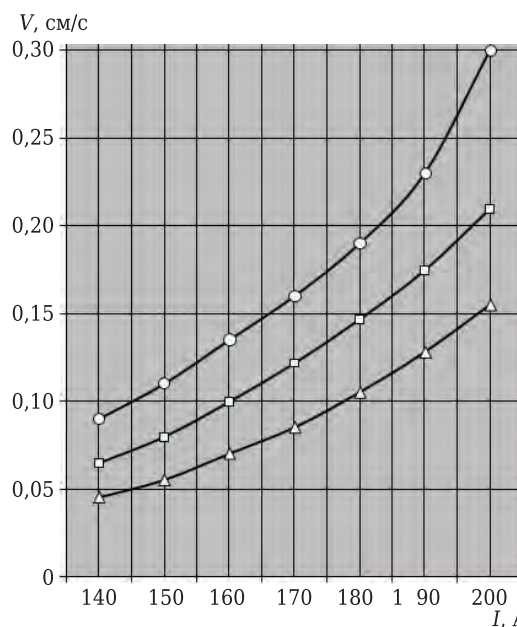


Рис. 6. Зависимость скорости V оплавления от силы тока I ; обозначения на кривых и параметры напыления такие же, как на рис. 5

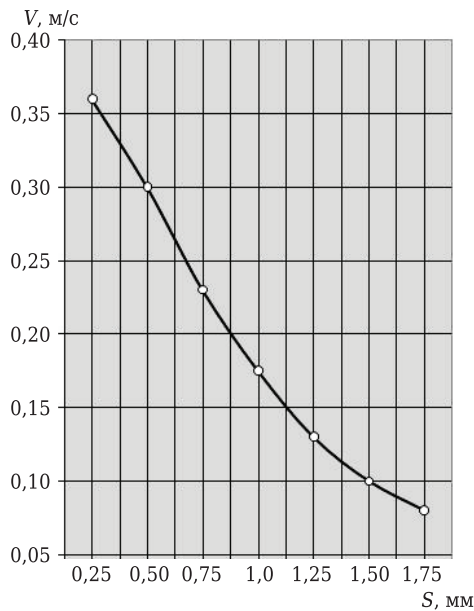


Рис. 7. Зависимость скорости V оплавления от толщины S оплавленного покрытия. Параметры напыления: сила тока дуги плазмотрона 200 А; напряжение дуги плазмотрона 170 В; расход плазмообразующего газа (сжатый воздух) $2,7 \text{ м}^3/\text{ч}$; расстояние между плазмотроном и деталью 50 мм

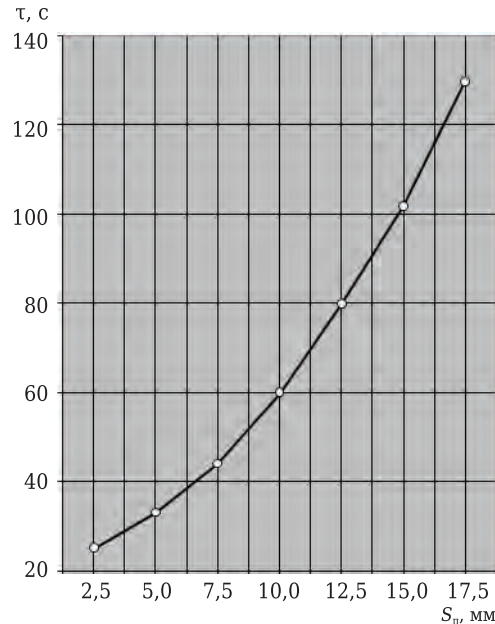


Рис. 8. Зависимость продолжительности t оплавления от толщины пластины S_p . Параметры напыления такие же, как на рис. 7

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Характер приведенных результатов исследования имеет общее объяснение, заключающееся в том, что для получения качественных покрытий необходимо в зону оплавления доставить достаточное количество теплоты, т. е. довести деталь и покрытие до температуры оплавления и поддерживать ее постоянное значение. При этом

необходимое количество теплоты будет определяться массой металла, и чем больше толщина покрытия и толщина детали, тем больше продолжительность и ниже скорость оплавления при прочих равных условиях. В то же время с увеличением силы тока количество подводимой теплоты возрастает, что обеспечивает повышение скорости оплавления.

Библиографический список

1. **Сидоров, А. И.** Восстановление деталей напылением и наплавкой / А. И. Сидоров. — М. : Машиностроение, 1987. — 192 с.
2. **Лашенко, Г. И.** Плазменное упрочнение и напыление / Г. И. Лашенко. — Киев : Экотехнология, 2003. — 64 с.
3. **Пузряков, А. Ф.** Теоретические основы технологии плазменного напыления / А. Ф. Пузряков ; 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. — 360 с.
4. **Калита, В. И.** Плазменные покрытия с нанокристаллической и аморфной структурой / В. И. Калита, Д. И. Комлев. — М. : Лидер М, 2008. — 388 с.
5. **Соснин, Н. А.** Плазменные технологии. Руководство для инженеров / Н. А. Соснин, С. А. Ермаков, П. А. Тополянский. — СПб. : Изд-во Политех. ун-та, 2008. — 406 с.
6. **Балдаев, Л. Х.** Газотермическое напыление / Л. Х. Балдаев, В. Н. Борисов, В. А. Вахалин [и др.] ; 2-е изд. — М. : Старая Басманная, 2015. — 539 с.
7. **Кравченко, И. Н.** Ресурсосберегающие плазменные технологии при ремонте перерабатывающего оборудования / И. Н. Кравченко, М. А. Глинский, С. В. Карцев [и др.]. — М. : ИНФРА-М, 2021. — 202 с. DOI: 10.12737/1083289.
8. **Оковитый, В. А.** Исследование параметров напыления биокерамических плазменных покрытий на нанокристаллические подложки / В. А. Оковитый, Ф. И. Пантелеенко, О. Г. Девойно [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2010. — № 10. — С. 27–31.
9. **Кадырметов, А. М.** Повышение эффективности плазменного напыления модуляцией параметров / А. М. Кадырметов, О. М. Тимохова, А. С. Пустовалов // Воронежский научно-технический вестник. — 2017. — № 1 (19). — С. 129–136.
10. **Шарая, О. А.** Инженерия поверхности упрочненных деталей / О. А. Шарая, А. Г. Пастухов, И. Н. Кравченко. — М. : ИНФРА-М, 2020. — 124 с. DOI: 10.12737/1031713.
11. **Сухочев, Г. А.** Технологическое обеспечение качества нанесения защитных покрытий комбинированной обработкой / Г. А. Сухочев, О. Н. Кириллов, Д. М. Небольсин [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2010. — № 8 (68). — С. 39–44.
12. **Кадырметов, А. М.** Исследование процессов плазменного нанесения и упрочнения покрытий и пути управления их качеством / А. М. Кадырметов // Научный журнал КубГАУ. — 2012. — № 81 (07). — С. 308–325.

13. **Кадырметов, А. М.** Перспективы упрочнения покрытий методом плазменного напыления с одновременной электромеханической обработкой / А. М. Кадырметов, В. О. Никонов, В. Н. Бухтояров [и др.] // Станочный парк. — 2012. — № 8 (96). — С. 23–25.

14. **Якубович, И. О.** Задачи и перспективы повышения качества покрытий, получаемых методом плазменного напыления / И. О. Якубович, Т. Г. Орешенко // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. — 2016. — Т. 1, № 12. — С. 344–345.

15. **Сидоров, А. И.** Сравнительная оценка способов плазменной наплавки и плазменного напыления с оплавлением. В 2 т. Т. 2. Инженерно-техническое обеспечение АПК и машинно-технологические станции в условиях реформирования / А. И. Сидоров, С. А. Сидоров, С. В. Карцев, И. Н. Кравченко. — Орел : Изд-во Орел ГАУ, 2000. — С. 116–118.

16. **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.

17. **Никонов, В. О.** Теоретическая оптимизация параметров процесса нанесения покрытия плазменным напылением с одновременной электромеханической обработкой / В. О. Никонов // Научный журнал КубГАУ. — 2013. — № 91. — С. 601–610.

18. **Кравченко, И. Н.** Оптимизация параметров процесса нанесения плазменных композиционных покрытий / И. Н. Кравченко, А. Ф. Пузряков, Н. И. Салеев [и др.] // Ремонт. Восстановление. Модернизация. — 2016. — № 4. — С. 20–26.

19. **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.

20. **Кравченко, И. Н.** Термопароабразивоструйная очистка загрязненных поверхностей деталей / И. Н. Кравченко, В. М. Корнеев, А. Ф. Слизов [и др.] // Ремонт. Восстановление. Модернизация. — 2019. — № 5. — С. 20–24. DOI: 10.31044/1684-2561-2019-0-5-20-24.

21. **Пат. 2342467 Российская Федерация, МПК С 23 С 4/04.** Композиционный состав порошкообразного материала для восстановления деталей строительных и дорожных машин / Карцев С. В., Петров А. Н., Гаврилов Д. А. [и др.]. — № 2007108249/02 ; заявл. 06.03.2007 ; опубл. 27.12.2008, Бюл. № 36. ■

Получено 11.12.20

© И. Н. Кравченко, С. В. Карцев,
Ю. А. Кузнецов, С. А. Величко, 2021 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



UNITECR 2021 — 17-й всемирный конгресс и объединенная международная техническая конференция по огнеупорам

14–17 сентября 2021 г.
г. Чикаго, США

Тезисы докладов по основным темам:

- Огнеупоры:
 - для черной металлургии
 - для цветной металлургии
 - для цементной промышленности
 - для стекольной промышленности
 - для нефтехимических процессов
- Огнеупорные материалы для сжигания отходов и др.
- Сырье
- Экологическая устойчивость и переработка
- Достижения в области производства и оборудования
- Огнеупорные инженерные системы и дизайн
- Новые разработки
- Базовая наука
- Энергосбережение и теплоизоляция
- Тестирование огнеупоров
- Образование
- Применение промышленных огнеупоров
- Кооперация производителей, потребителей и исследователей

www.Unitecr2021.org