

УДК 621.9.048.7+621.78

**А. В. Алифанов, В. С. Голубев, В. Н. Алехнович, И. А. Романчук, А. М. Милукова, О. А. Толкачева**  
Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси»,  
ул. Купревича, 10, 220141 Минск, Беларусь, +375 (17) 369 85 52, alifanov\_aav@mail.ru

## ПЛАЗМЕННАЯ НАПЛАВКА ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА РАБОЧИЕ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ

В статье рассмотрены вопросы плазменной наплавки порошковых самофлюсующихся материалов на никелевой основе на упрочняемые поверхности стальных образцов.

**Ключевые слова:** плазменная наплавка; порошки самофлюсующиеся; сталь 65Г; сталь 60ПП; износостойкие покрытия, повышение твердости.

Табл. 1. Рис. 5. Библиогр.: 10 назв.

**A. V. Alifanov, V. S. Golubev, V. N. Alehnovich, I. A. Pomanchuk, A. M. Milukova, O. A. Tolkacheva**  
Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, 10 Kuprevicha Str., 220004 Minsk,  
the Republic of Belarus, +375 (17) 369 85 52, alifanov\_aav@mail.ru

## PLASMA SURFACING OF WEAR-RESISTANT POWDER MATERIALS ON WORKING SURFACES OF STEEL PARTS

The article deals with plasma surfacing of powdered self-fluxing materials on a nickel base on the hardening surfaces of steel samples.

**Key words:** plasma surfacing; self-fluxing powders; steel 65 G; steel 60 PP; wear-resistant surfaces; hardening.  
Table 1. Fig. 5. Ref.: 10 titles.

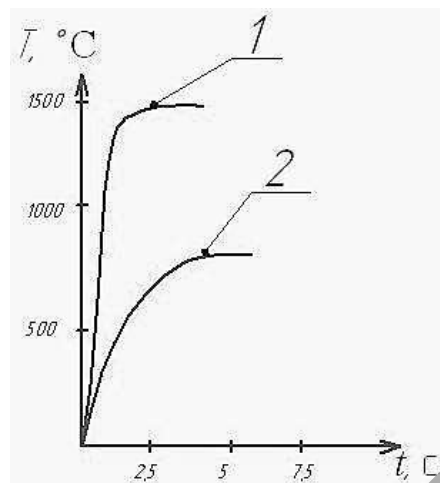
**Введение.** Основными причинами выхода из строя ответственных деталей, например рабочих органов сельхозмашин, являются износ, деформация, выкрашивание, растрескивание рабочих поверхностей и кромок, что ведет к поломке изделия и простоя оборудования в целом. Каждый из этих видов разрушения требует от используемого материала наличия определенных свойств. Так, для повышения стойкости к механическому или абразивному износу необходимо увеличение твердости материала. Однако повышение твердости может вызывать увеличение хрупкости и, следовательно, появление выкрашивания рабочей поверхности и кромок, которое будет вызывать еще более интенсивный износ. Уменьшить склонность к выкрашиванию и трещинообразованию возможно только повышением его вязкости, повышая работу ударного разрушения. Таким образом, для создания материала с оптимальными характеристиками для ответственных деталей необходимо, чтобы они обладали сложносочетаемыми свойствами. Тем не менее, решить проблему можно с использованием технологий создания слоистых материалов, формируя на поверхности рабочие слои с необходимыми эксплуатационными свойствами [1—5]. В настоящее время существует большое количество технологий и методов для получения слоев необходимой глубины с заданными свойствами. Наплавка самофлюсующихся порошков с помощью плазматрона (плазменная наплавка) позволяет получить более качественные износостойкие покрытия, например, по сравнению с широко применяемой на практике электродуговой наплавкой в среде защитных газов или покрытыми электродами при сохранении высокой производительности и возможности обработки в автоматизированном режиме [5].

Целью данного исследования является разработка процесса плазменной наплавки высокопрочных самофлюсующихся порошковых материалов на стальные, в том числе тонкостенные, изделия с использованием постоянно-импульсного режима работы плазматрона. Такой

режим работы позволяет уменьшить опасность проплавления наплавляемой тонкостенной поверхности, уменьшить термические поводки, повысить качество наплавленного слоя.

**Оборудование, приборы и методика.** Для выполнения поставленной задачи была разработана конструкция плазмотрона повышенной надежности с катодом из вольфрама, легированного лантаном, диаметром 4 мм. Источник питания дежурной и основной дуги может выдавать на выходе постоянное и постоянно-импульсное напряжение. Для обеспечения подачи в зону плазменной струи упрочняющего порошка в постоянном и импульсном режиме разработали и изготовили специальную конструкцию порошкового питателя. В конструкции использовался эффект кипящего слоя и применялся вибрирующий дозирующий электрод.

Надежность разработанной конструкции плазмотрона обеспечивается водяным охлаждением анодного медного сопла и катодного узла с вольфрамовым электродом, соединенных для водоохлаждения проточной водой последовательно, а также анод и катод, электроизолированные между собой. Важным моментом, определяющим рабочую надежность разработанного плазмотрона, является его герметичность. Для этого уплотнительные кольца располагают на торцевых поверхностях анода и катода. При осевом сжатии (сборке плазмотрона) они автоматически сжимаются, что позволяет осуществить герметизацию конструкции в целом. Уплотнительные кольца изготавливаются из высокотемпературной, высокоэластичной силиконовой резины.



1 — на поверхности образца, 2 — на глубине 2,0 мм от нагреваемой поверхности

**Рисунок 1.** — Динамика нагрева плазменной струей на заданных участках образца

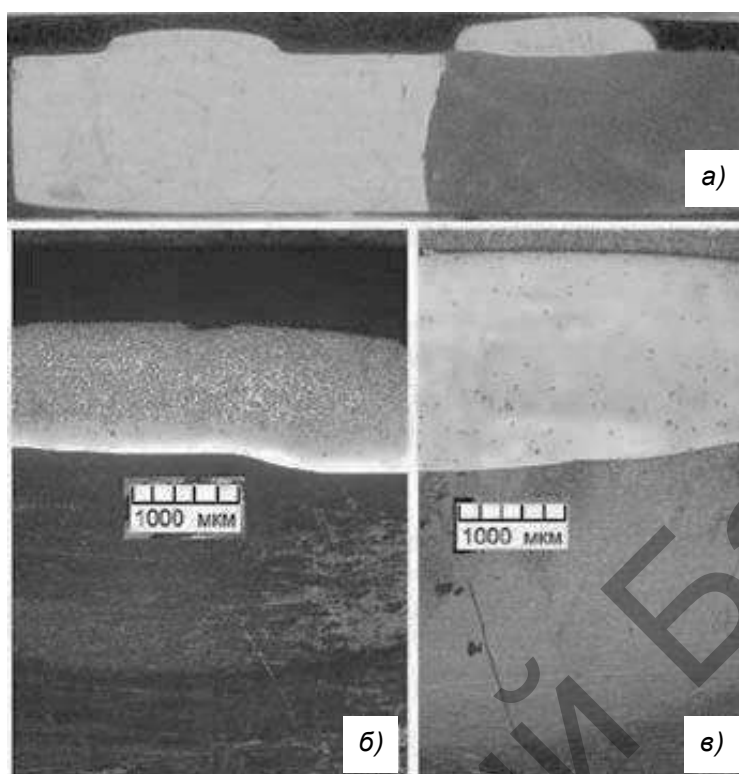
В ходе экспериментов провели исследования особенностей нагрева упрочняемой поверхности плазменной струей, генерируемой в постоянно-импульсном режиме. Температуру измеряли на поверхности в центре образца и на глубине 2,0 мм от обрабатываемой поверхности с помощью модернизированной головки АПИР на базе полупроводникового фотодиода и пирометром TemPro 300. Микротвердость измерялась на микротвердомере ПМТ-3, а твердость наплавленных слоев измерялась твердомером ТК-2М и ультразвуковым измерителем твердости МЕТ У1А.

Динамика нагрева поверхности плоского образца плазменной струей в режиме плазменно-импульсного нагрева мощностью 1,5 кВт на поверхности и на глубине 2,0 мм приведена графически (рисунок 1).

**Основная часть.** В результате постоянно-импульсного нагрева на поверхности и в глубине образца возникают «тепловые волны». При наличии импульсной составляющей тока плазмотрона с частотой следования импульса 0,5 Гц колебания температуры на нагреваемой поверхности образца относительно максимального значения составляют 150°C. Увеличение частоты следования импульсов в 5 раз приводит к уменьшению колебания температуры на поверхности образца до 5°C. Колебания же температуры на глубине 2,0 мм от нагреваемой поверхности наблюдаются при частоте следования импульсов не более 0,1 Гц.

Разработанный и изготовленный в Физико-техническом институте Национальной академии наук Беларуси комплект оборудования для плазменной наплавки с использованием постоянной и постоянно-импульсной плазмы [6] позволил осуществить наплавку износостойкого порошкового материала на детали — образцы ножей кормоуборочного комбайна «Ягуар» (материал — сталь 65Г и сталь 60ПП).

Представлен внешний вид макрошлифа из наплавленного на стальные образцы самофлюсующегося порошкового сплава на никелевой основе марки ПГ-10Н-01 (рисунок 2).



а — внешний вид макрошлифов; б — использованный травитель марбле; в — ниталь

**Рисунок 2. — Внешний вид макрошлифов наплавки. × 4**

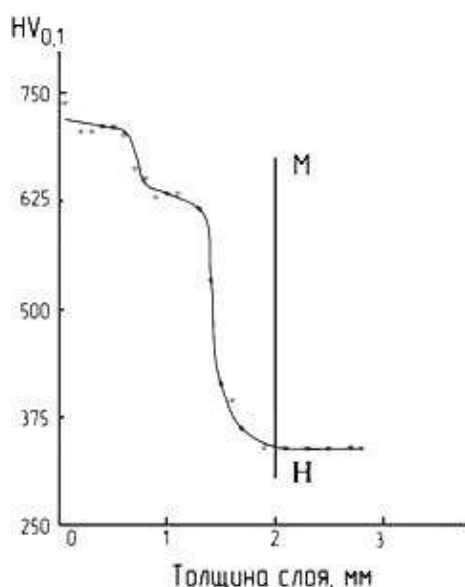
Режим наплавки и результаты измерений твёрдости ( $H_{\mu 1}$ ,  $H_{\mu 2}$ ) приведены в таблице 1, где  $G_{п.г}$ ,  $G_{т.г}$ ,  $G_{з.г}$  — объёмные расходы плазмообразующего, транспортирующего и защитного газов (аргон) соответственно;  $G_{п}$  — массовый расход порошкового присадочного материала,  $I_{д}$  — величина тока дуги, А;  $U_{д}$  — величина напряжения на дуге, В. Измерения  $H_{\mu 1}$  выполнялись на шлифованной поверхности наплавленного слоя твердомером ТК-2М, а  $H_{\mu 2}$  — в поперечном сечении (шлифе) с помощью ультразвукового измерителя твёрдости МЕТ У1А.

**Т а б л и ц а 1. — Параметры режима наплавки**

$I_{д}$ , А	$U_{д}$ , В	$G_{п.г}$ , л / мин	$G_{т.г}$ , л / мин	$G_{з.г}$ , л / мин	$G_{п}$ , г / мин	$H_{\mu 1}$ , HRC	$H_{\mu 2}$ , HRC
60	30	2,8	2,3	9,4	4	47...52	48...50

В обоих случаях получены близкие по значению величины  $H_{\mu}$ , однако полученные значения меньше регламентированной твёрдости порошкового сплава ПГ-12Н-01 (56...62 HRC).

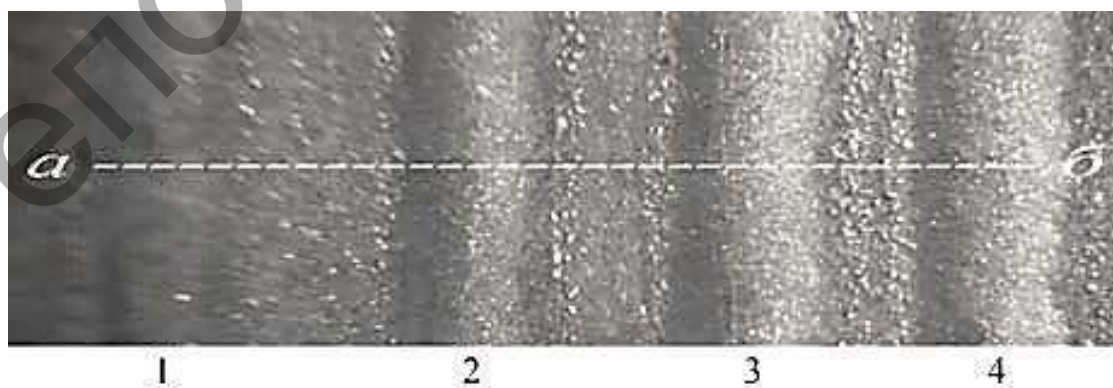
Возможно, данные различия связаны с неоднородным распределением микротвёрдости по глубине наплавленного слоя (рисунок 3), небольшой его толщиной и относительно «мягким» подслоем из стали 65Г ( $\approx 30$  HRC). Граница раздела покрытия — основного металла располагается на расстоянии примерно 2 мм от поверхности вдоль линии измерения микротвёрдости слоя (линия МН на рисунке 3). С учётом глубины проплавления основного металла 0,3 мм толщина наплавленного покрытия составляет примерно 1,7 мм при ширине зоны наплавки 9 мм.



**Рисунок 3.** — Распределение микротвердости при увеличении расстояния от поверхности наплавленного слоя вглубь основы

мещения плазмотрона  $v = 1\ 200$  мм / мин и  $l_{\text{сп}} = 8 \dots 12$  мм формировались отдельные дорожки шириной  $3,0 \dots 3,5$  мм (рисунок 4) и длиной 50 мм; максимальная толщина покрытий при этом не зависит от величины расстояния от сопла до подложки и составляет примерно 200 мкм. Наличие на периферии наплавленных валиков отдельных частиц нерасплавленного порошка (рисунок 4) свидетельствует о том, что размеры зоны ввода присадочного порошкового материала больше размеров сварочной ванны (ванны расплавленного металла).

Шлиф (для исследований) вырезался по линии  $a-b$  (рисунок 4) перпендикулярно поверхности наплавки и протравливался в нитале. Распределение микротвердости при увеличении расстояния от поверхности наплавленного покрытия имеет немонотонный характер (рисунок 5). Причем максимальная микротвердость наплавленного порошкового сплава ПГ-10Н-01 превышает  $725\ HV_{0,1}$ .



$a-b$  — линия разреза, 1 —  $l_{\text{сп}} = 9$  мм; 2 —  $l_{\text{сп}} = 10$  мм; 3 —  $l_{\text{сп}} = 11$  мм; 4 —  $l_{\text{сп}} = 12$  мм

**Рисунок 4.** — Вид (фрагмент) наплавленного материала на сталь 60ПП.  $\times 7$

Уменьшение микротвердости для сталей 65Г и 60ПШ составляет  $260 HV_{0,1}$  и  $410 HV_{0,1}$  соответственно в переходном слое (подслое) между покрытием и основным металлом. Это связано, по-видимому, с наличием в этой области обезуглероженного слоя, не полностью удалённого в процессе предшествующей обработки. При увеличении расстояния вглубь образца, т. е. вправо от разграничительной линии МН, регистрируется возрастание микротвёрдости с максимумом при  $h = 0,6 \dots 0,7$  мм, а затем уменьшение до величины, характерной для исходного металла ( $260 \dots 350 HV_{0,1}$ ). Измеренные значения микротвёрдости в максимуме распределения ( $590 \dots 620 HV_{0,1}$ ) свидетельствуют о протекании процессов перекристаллизации в этой области, связанных с релаксацией тепла источника нагрева.

Формирование зон с повышенной микротвёрдостью на расстояниях  $h = 0,5 \dots 1,0$  мм от поверхности наплавленного покрытия не только увеличивает твёрдость и суммарную глубину упрочнения, но и повышает вероятность возникновения поперечных трещин, зарождающихся в основном металле и продолжающихся в покрытии [9].

Работоспособность деталей в условиях абразивного и других видов износа зависит от характеристик композиции «покрытие — основной металл», сформированной в приповерхностных слоях в результате плазменно-порошковой наплавки. Наличие слоя с пониженной микротвердостью на границе «покрытие — подслоя», с одной стороны, уменьшает износостойкость всей композиции «покрытие — основной металл», но, с другой стороны, этот слой обладает демпфирующими свойствами [10], что очень важно при работе упрочнённой детали в условиях ударно-абразивного воздействия.

**Заключение.** Выполненные эксперименты показали правильность выбранных конструкторских и технических решений и подходов при создании наплавочного плазмоторона и подготовки комплекса оборудования для плазменно-порошковой наплавки с целью упрочнения и восстановления быстроизнашивающихся деталей различного функционального назначения из конструкционных материалов.

Результаты проведенных исследований позволяют рекомендовать предложенный способ наплавки в качестве упрочняющей обработки ответственных стальных изделий, а также для устранения небольших локальных повреждений (износа) деталей сельскохозяйственного и общего машиностроения.

#### Список цитируемых источников

1. Фрумин, И. И. Современные типы наплавленного металла и их классификация / И. И. Фрумин // Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавленный металл : сб. науч. тр. — Киев : Навук. думка, 1977. — С. 3—17.
2. Плазменное поверхностное упрочнение / Л. К. Лещинский [и др.]. — Киев : Техника, 1990. — 195с.
3. Астапчик, С. А. Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке / С. А. Астапчик, В. С. Голубев, А. Г. Маклаков. — Минск : Белорус. наука, 2008. — 252 с.

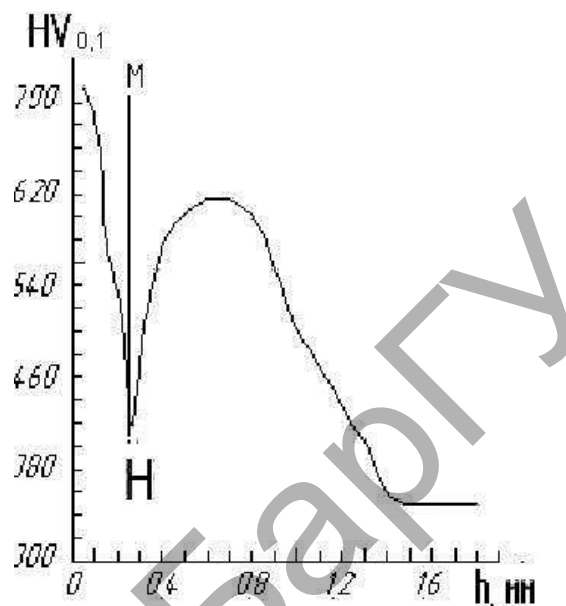


Рисунок 5. — Распределение микротвердости при увеличении расстояния от поверхности наплавленного слоя вглубь основы

4. Повышение работоспособности деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин / И. Н. Шило [и др.]. — Минск : БГАТУ, 2010. — 320 с.
5. *Рябцев, И. А.* Наплавка деталей машин и механизмов / И. А. Рябцев. — Киев : Экотехнология, 2004. — 160 с.
6. Разработка конструкции плазмотрона на постоянно-импульсном напряжении для наплавки высокопрочных порошковых материалов / А. В. Алифанов [и др.] // Техника и технологии: инновации и качество : материалы 4-й Междунар. науч.-техн. конф., 19 дек. 2017 г., г. Барановичи. — Барановичи : БарГУ, 2018. — С. 131—133.
7. Электродуговая наплавка металлоповерхностей в среде защитного газа с поперечными колебаниями электрода / В. С. Ивашко [и др.] // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин : материалы 10-й Междунар. науч.-практ. конф., 15—18 апр. 2008 г. : в 2 ч. — СПб., 2008. — Ч. 1. — С. 126—132.
8. Изменение структуры поверхности углеродистых сталей при лазерном модифицировании / В. И. Гуринович [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 2 кн. — Минск, 2013. — Кн. 2. — С. 169—176.
9. *Сидоров, А. И.* Восстановление деталей машин напылением и наплавкой / А. И. Сидоров. — М. : Машиностроение, 1988. — 188 с.
10. *Хасуи, А.* Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Моригаки ; под ред. В. С. Степанова, Н. Г. Шестеркина. — М. : Машиностроение, 1985. — 240 с.

Данная работа была выполнена благодаря поддержке Белорусского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта T17-008.

Поступила в редакцию 11.05.2018