

УДК 621.9.048.7+621.78

А. В. Алифанов, В. С. Голубев, В. Н. Алехнович, И. А. Романчук, А. М. Милюкова, 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.

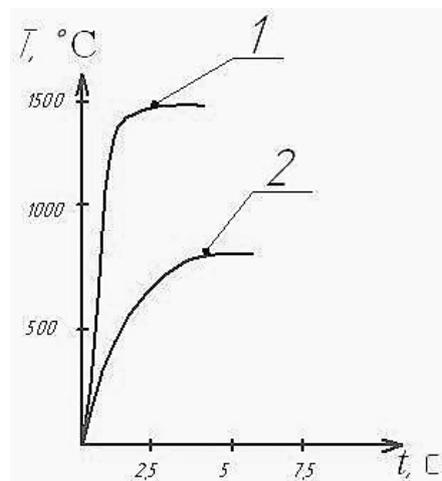
Введение. Основными причинами выхода из строя ответственных деталей, например рабочих органов сельхозмашин, являются износ, деформация, выкрашивание, растрескивание рабочих поверхностей и кромок, что ведет к поломке изделия и простоя оборудования в целом. Каждый из этих видов разрушения требует от используемого 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 плазмотрона (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 плазмотрона. 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

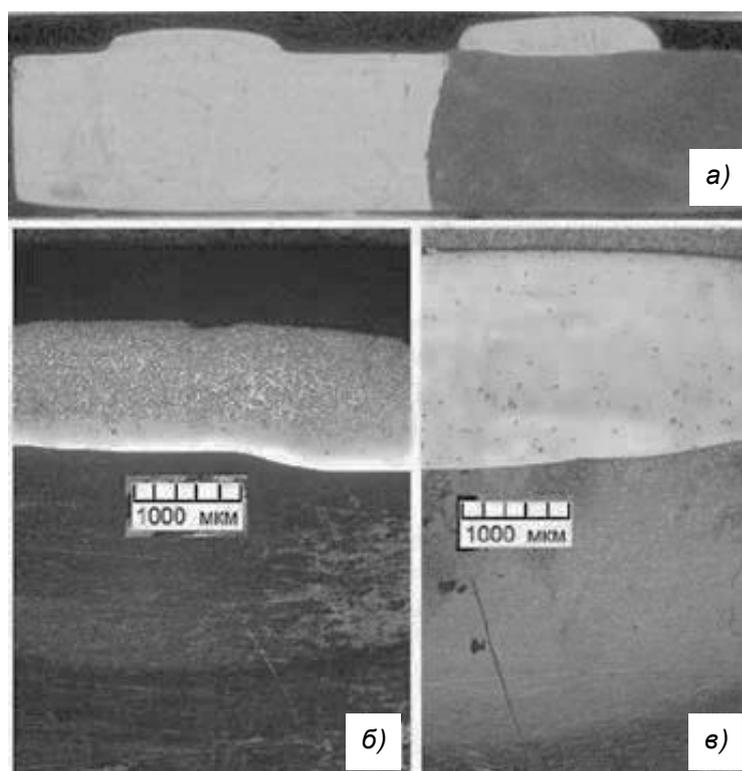
В ходе экспериментов провели исследования особенностей нагрева упрочняемой поверхности плазменной струей, генерируемой в постоянно-импульсном режиме. Температуру измеряли на поверхности в центре образца и на глубине 2,0 мм от обрабатываемой поверхности с помощью модернизированной головки АПИР на базе 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 наплавов. × 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_{μ} , 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 (≈ 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.

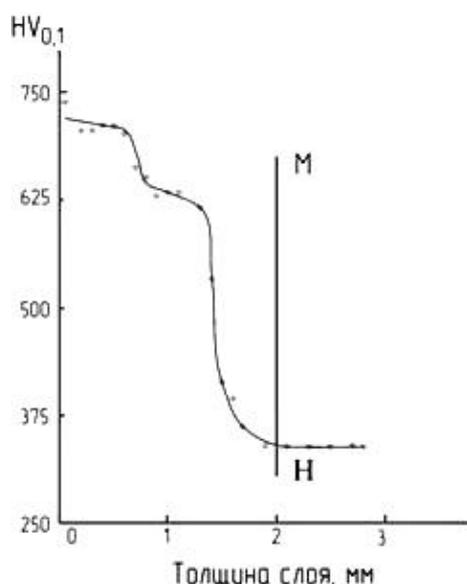
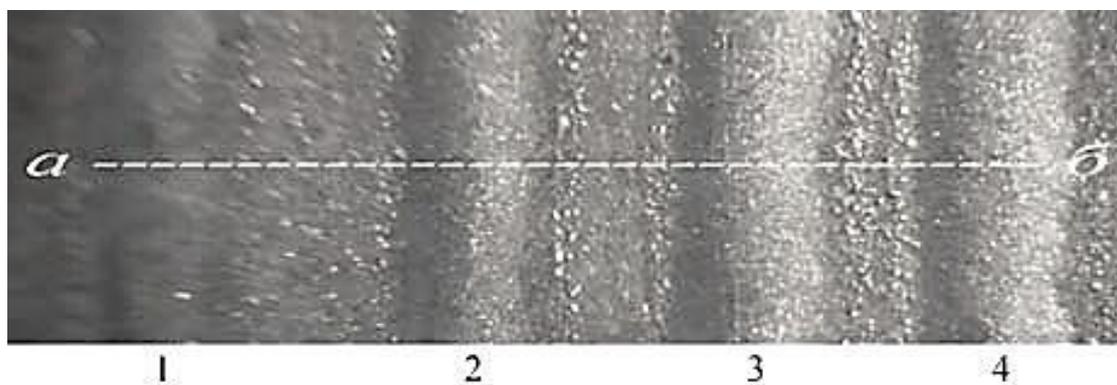


Рисунок 3. — Распределение микротвердости при увеличении расстояния от поверхности наплавленного слоя вглубь основы

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. $\times 7$

Справа от разграничительной линии МН регистрировались значения микротвердости основного металла ($\approx 340\ HV_{0,1}$), изменяющиеся в пределах $260 \dots 350\ HV_{0,1}$ при увеличении расстояния от 3 мм до 6 мм. Слева от линии МН, по направлению к поверхности наплавленного слоя, микротвердость увеличивается примерно в два раза при уменьшении расстояния от 2 мм до 1,3 мм.

Основной причиной такого распределения микротвердости на этом участке, по-видимому, является значительное разбавление материала покрытия основным металлом, а также наличие на поверхности подслоя обезуглероженного слоя [7; 8]. При дальнейшем уменьшении расстояния до поверхности наплавленного слоя (h меньше 1,3 мм) измеренная микротвердость увеличивается с $620\ HV_{0,1}$ до $\approx 740\ HV_{0,1}$, причем наблюдается ее «ступенчатое» распределение, причина которого заключается в текстурированности данного участка покрытия.

Исследовано влияние расстояния от сопла плазмотрона до поверхности подслоя $l_{\text{сп}}$ на размеры и микротвердость наплавленных слоёв. При скорости перемещения плазмотрона $v = 1\ 200$ мм / мин и $l_{\text{сп}} = 8 \dots 12$ мм формировались отдельные дорожки

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.

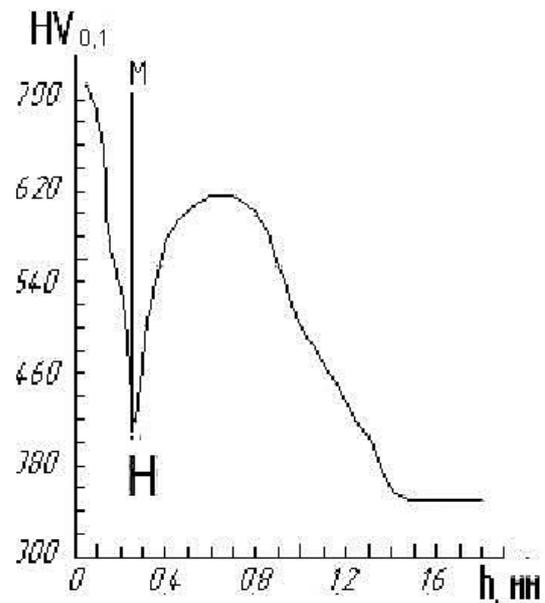


Рисунок 5. — Распределение микротвердости при увеличении расстояния от поверхности наплавленного слоя вглубь основы

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. Мorigаки ; 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