

УДК 621.793

## ФИНИШНОЕ ПЛАЗМЕННОЕ УПРОЧНЕНИЕ ИНСТРУМЕНТА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ, РАБОТАЮЩЕГО В УСЛОВИЯХ ФРИКЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

© Тополянский Павел Абрамович<sup>1</sup>, канд. техн. наук; Соснин Николай Алексеевич<sup>2</sup>, д-р техн. наук; Ермаков Сергей Александрович<sup>2</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup>НПФ «Плазмацентр». Россия, г. Санкт-Петербург. E-mail: topoljansky@mail.ru

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. Россия. E-mail: info@plasmacentre.ru

Статья поступила 25.01.2010 г.

Рассмотрено новое поколение высокоэффективного оборудования плазменного упрочнения и нанесения покрытий для повышения долговечности инструмента металлургических производств, работающего в условиях фрикционного взаимодействия. Приведены результаты рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии износостойкого нанопокртия, наносимого методом финишного плазменного упрочнения. Показано, что состав поверхностного слоя покрытия соответствует  $\text{SiO}_2\text{C}_x$ , а на глубине примерно 20–30 нм —  $\text{SiO}_2$ .

**Ключевые слова:** упрочнение; покрытие; рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия.

Современные технологии, использующие электродуговые плазмотроны, находят всё большее применение при решении задач упрочнения изделий путем нанесения различных упрочняющих покрытий или модификации свойств поверхностного слоя металла (рис. 1 и таблица).

Преимущества таких технологий — в их высокой экономической эффективности за счет малого энергопотребления, высокого коэффициента использования расходных материалов, надежности оборудования и его быстрой окупаемости [1]. Универсальность плазменных технологий дает возможность реализовать в промышленных условиях плазменные технологии сварки, наплавки, напыления, упрочнения и закалки. Примером может служить установка УПО-302, выпускавшаяся Санкт-Петербургским заводом «Электрик» и рассчитанная на пять вариантов плазменных технологий.

Для выбора оптимальной плазменной технологии разработана компьютерная программа Technologies [2], дающая возможность в производственных условиях обоснованно определять наилучший вариант упрочняющей обработки поверхности инструмента.

Среди плазменных технологий следует обратить внимание на новую технологию — финишное плазменное упрочнение (ФПУ) путем нанесения износостойкого нанопокртия на основе соединений кремния толщиной 10–2000 нм. Отличительные особенности данного метода: осуществление процесса при атмосферном давлении, без вакуума; минимальный нагрев изделий при обработке до 100–120 °С; отсутствие изменений шероховатости поверхности; возможность обработки труднодоступных зон и изделий любых габаритов; локальность нанесения покрытия; использование малогабаритного, мобильного и экономичного оборудования.

Данный процесс, предназначенный для повышения долговечности рабочих поверхностей изделий, изготовленных традиционными методами, является

заключительной финишной операцией, поэтому он назван — финишное плазменное упрочнение.

Наносимое в процессе ФПУ нанопокртие имеет повышенную твердость (до 52 ГПа), низкий коэффи-

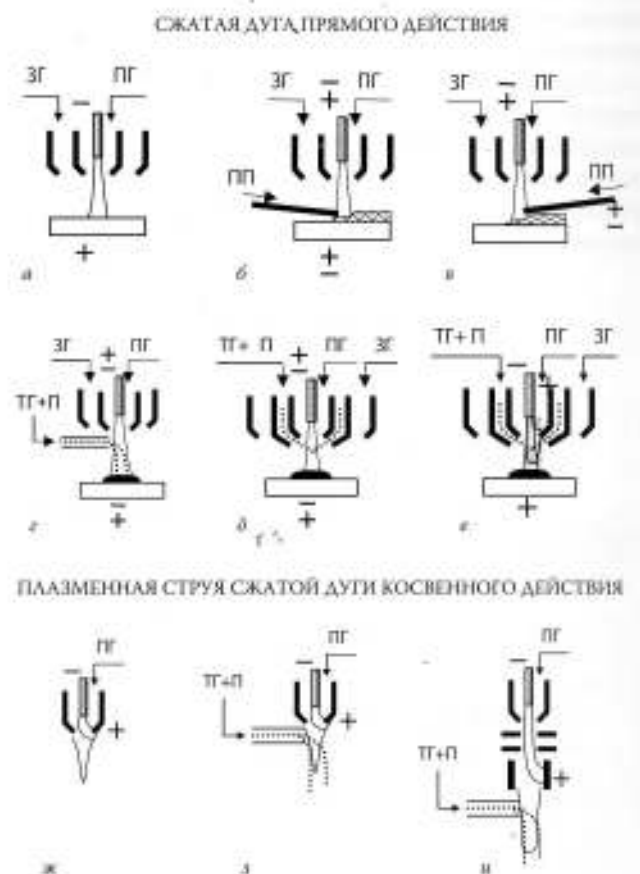


Рис. 1. Схемы плазмотронов для сварки (а), закалки (а, ж); наплавки (б–е); напыления (з, и) и финишного плазменного упрочнения путем нанесения износостойкого нанопокртия (и) (ПГ — плазмообразующий; ЗГ — защитный; ТГ — транспортирующий газы; ПП — присадочная проволока; П — порошок или пары реагентов при нанесении нанопокртия)

**Сравнительные характеристики плазменных безвакуумных технологий нанесения покрытий и упрочнения поверхности**

Характеристика технологии	Наплавка	Напыление	Закалка (без оплавления)	ФПУ
Обработанная поверхность (в разрезе)				
Рекомендуемая толщина обрабатываемых деталей, мм	≥ 1	≥ 0,5	≥ 30	≥ 0,3
Толщина покрытия или глубина изменения свойств, мм	Слоями по 1–4	0,1–1,0	0,1–2,0	0,00001–0,002
Характерная температура поверхности в зоне обработки, °С	1000–1500	100–150	900–1200	100–120
Деформации изделия	Да	Нет	Да	Нет
Изменение структуры основы в зоне обработки	Да	Нет	Да	Нет
Предварительная подготовка поверхности	Обезжиривание	Обезжиривание и абразивно-струйная обработка	Обезжиривание	Обезжиривание
Сохранение класса шероховатости поверхности	Нет	Нет	Да	Да
Повышение износостойкости	Да	Да	Да	Да
Возможность получения диэлектрических свойств поверхности	Нет	Да	–	Да
Изменение твердости основы	Да	Нет	Да	Нет
Возможность использования для изделий с острыми кромками	Да (с последующей механической обработкой)	Нет	Да	Да
Возможность эксплуатации изделий при ударных нагрузках	Да	Нет	Да	Да
Необходимость дополнительной механической обработки	Да	Да	Нет	Нет
Наличие производственных отходов	Да	Да	Нет	Нет
Возможность проведения процесса вручную и автоматически	Да	Да	Только автоматически	Да

коэффициент трения (0,07 по стали ШХ15), обладает химической инертностью, высоким удельным электрическим сопротивлением ( $10^6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ). ФПУ отличается универсальностью и эффективностью и позволяет в несколько раз увеличить долговечность высоконагруженных деталей и инструмента [2]. Как показывает опыт эксплуатации, оборудование ФПУ (рис. 2) легко настраивается на упрочнение различных по назначению и габаритам изделий и окупается за 3–6 мес работы. Алгоритмическое сопровождение ФПУ упрощает выбор оптимальных параметров режимов обработки, что в итоге повышает производительность и качество продукции.

С целью установления вида химической связи элементов, находящихся в поверхностном слое образцов после ФПУ, и нанесения износостойкого нанопокрyтия использовали установку РН1-5500 ESCHA для рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Возбуждение фотоэмиссии производилось на Al-K $\alpha$  излучении ( $h\nu = 1486,6 \text{ эВ}$ ) мощностью 200 Вт. Давление остаточных газов в тестовой камере – не более  $6,7 \cdot 10^{-8} \text{ Па}$ . Область анализа поверхности –

круг диам. 1100 мкм. Обзорные спектры снимали при энергии пропускания анализатора 93,9 эВ и плотности сбора данных 0,8 эВ/шаг. Спектры высокого разрешения снимали при энергии пропускания анализатора 11,75 эВ и плотности сбора данных 0,1 эВ/шаг. Аппроксимацию спектров C1s выполняли нелинейным методом наименьших квадратов с использованием

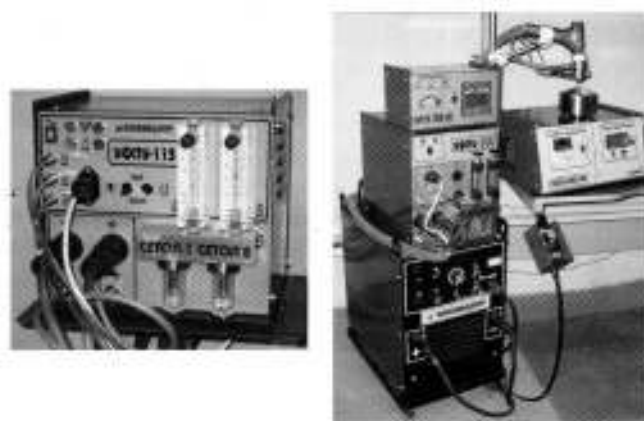


Рис. 2. Модули оборудования для ФПУ

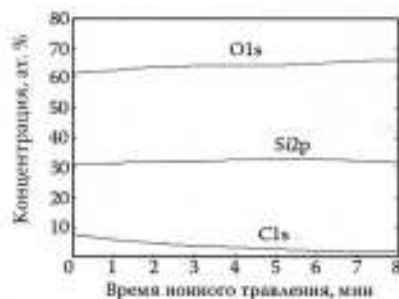


Рис. 3. Профиль концентраций при ионном травлении (начало координат соответствует 1-й мин травления)

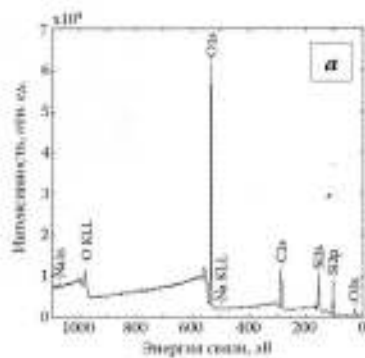


Рис. 4. Обзорные спектры:

а – на исходной поверхности; б – после травления ионами  $Ag^+$

функции Гаусса–Лоренца с добавлением асимметрии.

Исследовали образцы из стали У8, подвергнутые термической обработке до твердости 58–60 HRC и последующему нанесению износостойкого нанопокртия методом ФПУ.

Типичная глубина анализа в РФЭС — 2–3 нм. Для удаления поверхностного слоя адсорбированных примесей использовали ионную пушку. Ионное травление проводили ионами  $Ag^+$  при энергии ионов 2 кэВ, растре  $2 \times 2 \text{ мм}^2$ , что приблизительно соответствует скорости травления 2–3 нм/мин. Время травления составляло 9 мин, что было достаточно для удаления поверхностных слоев переменного состава (рис. 3).

Обзорные спектры образцов до и после травления показаны на рис. 4. Основной состав поверхностного слоя: кремний и кислород. Видно, что поверхностный углерод практически полностью удаляется в процессе травления. Анализ спектра углерода на исходной поверхности (рис. 5), показал, что часть углерода находится в химически связанном состоянии C–Si. Связи C–Si проявляются при аппроксимации спектра C1s – это пик 1 с энергией связи 283,3 эВ. Пик 2 (285,0 эВ) – углеводороды, пик 3 (286,3 эВ) – связи углеводородов с кислородом.

Наличие связей C–Si следует и из анализа спектра Si2p (рис. 6). Энергия связи спектра на исходной поверхности 102,2 эВ (см. рис. 6, а) меньше этого значения в  $SiO_2$  – 103,5 эВ [3]. Это свидетельствует о том, что из четырех связей углерода одна – с кремнием, остальные – с кислородом. После травления, когда углерода фактически не осталось, спектр Si2p имеет энергию связи 103,5 эВ (см. рис. 6, б). Положение спектра O1s также отвечает  $SiO_2$  – 532,5 эВ (рис. 7).

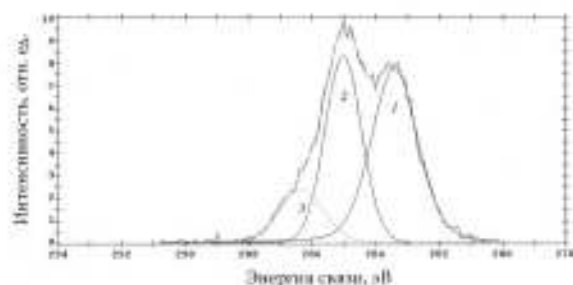


Рис. 5. Спектр C1s на исходной поверхности

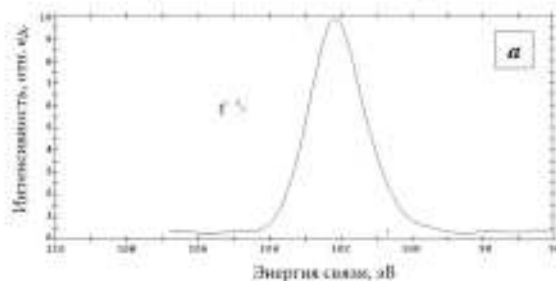


Рис. 6. Спектры Si2p:

а – на исходной поверхности; б – после травления ионами  $Ag^+$

Таким образом, исследования методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии образцов после финишного плазменного упрочнения с нанесением износостойкого тонкопленочного покрытия показали, что состав поверхностного слоя соответствует  $SiO_2C_x$ , а на глубине примерно 20–30 нм –  $SiO_2$ .

Приведем примеры использования ФПУ (рис. 8):

– нанесение покрытия на обжимающие ролики линии проката стальных труб. Ролики изготавливаются из инструментальной стали 4X5MФС и проходят термообработку до твердости HRC 51–53. В зоне работы роликов происходит сварка шва прокатываемой трубы. При эксплуатации не упрочненных роликов происходит схватывание материала трубы с поверхностью роликов;

– нанесение покрытия на накатные и профилирующие ролики, изготавливаемые из стали Р6М5 (твердость HRC 64–67), предназначенные для прокатывания оцинкованной металлической полосы и других изделий;

– упрочнение игл матричного комплекта технологического инструмента для прессования алюминиевой трубы. Материал игл 4X5MФС с твердостью HRC 47–50. Условия работы игл – всестороннее сжатие



Рис. 7. Спектр O1s после травления нитрида AlN

под действием деформируемого алюминия с температурой в зоне деформации до 600 °С, давлением до ~700 МПа и силами трения, возникающими под действием вытекающего в фильеру потока алюминия. Характер износа — уменьшение наружного диаметра и галм из-за истирания;

– упрочнение фильер и оправок, изготовленных из стали У8А с твердостью HRC 58–63, предназначенных для волочения в условиях холодной протяжки труб из медных сплавов. Процесс осуществляется при температуре окружающего воздуха, в процессе волочения металл разогревается до 60 °С, в качестве смазки используется СОЖ Резол. Характер износа — задиры;

– повышение долговечности дисковых ножей агрегатов продольной резки, изготавливаемых из стали 5ХВ2С (твердость HRC 48–52). Ножи холодной резки проката во время эксплуатации испытывают значительные напряжения при ударном приложении циклических температурно-силовых нагрузок в сочетании с малой пластической деформацией и износом режущих кромок в условиях сухого трения. Основным механизмом износа ножей холодной резки металла являются усталостные разрушения, проявляющиеся в затуплении рабочей кромки за счет выкрашивания металла при знакопеременных нагрузках. Важным фактором снижения вероятности усталостного разрушения является создание сжимающих остаточных напряжений, уменьшение количества микродефектных

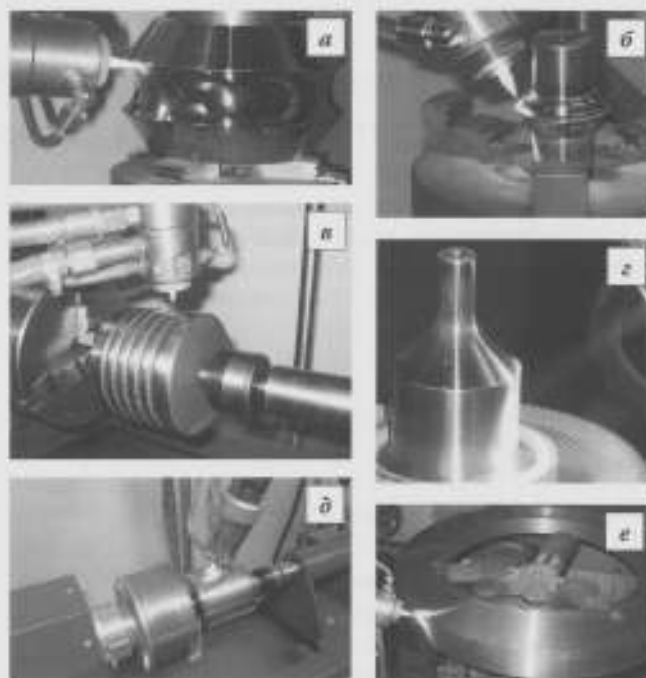


Рис. 8. Процесс ФПУ обжимającego ролика(а); накатного ролика(б); профилирующего ролика(в); игам для прессования(г); оправки для волочения(д); дискового ножа (е)

зон и концентраторов напряжений на рабочей поверхности ножа.

**Библиографический список**

1. Коротков В.А., Бердников А.А., Толстов И.А. Восстановление и упрочнение деталей и инструмента плазменными технологиями. – Челябинск : Изд-во «Металл», 1993. – 144 с.
2. Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров. – СПб: Изд-во Политехи. ун-та, 2008. – 406 с.
3. Moulder J.F., Stickle W.F., Sobol P.E., Bomben K.D. *in*: J. Chastain (Ed), Handbook of X-ray Photoelectron Spectroscopy, Eden Prairie MN, Perkin-Elmer Corp., 1992. Minnesota. – P. 50.

**ATMOSPHERIC PRESSURE PLASMA JET COATING OF METALLURGICAL PRODUCTION INSTRUMENT OPERATING IN FRICTIONAL ENGAGEMENT CONDITIONS**

©Topolyansky P.A., PhD; Sosnin N.A., PhD; Ermakov S.A., PhD

The new generation of high-efficiency plasma strengthening and coating equipment for increasing the service life of metallurgical production instrument operating in frictional engagement conditions was considered. The results X-ray photoelectron spectroscopy wear-resistant coating deposited by the method of finish plasma hardening are described. It was showed that the composition of the coating surface layer corresponds to SiO<sub>2</sub>C<sub>2</sub>, and at a depth of about 20–30 nm — SiO<sub>2</sub>.

**Keywords:** hardening; coating; X-ray photoelectron spectroscopy.