

**5. Самарский, А.А.** Теория разностных схем / А.А. Самарский. – М.: Наука, 1977. – 656 с.

УДК 621.789

**Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО**, д-р техн. наук (БНТУ),  
**В.М. АСТАШИНСКИЙ**, д-р техн. наук (ИТМО),  
**А.Ф. ПАНТЕЛЕЕНКО**,  
**М.В. СПЕЦИАН**,  
**Д.А. МАРУКОВИЧ** (БНТУ)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ПЛАЗМЕННОЙ МОДИФИКАЦИИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ УГЛЕРОДИСТОЙ И ЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛЕЙ**

В развитых странах мира и крупных научно-технических центрах на постсоветском пространстве (г. С.-Петербург, г. Томск, г. Минск, г. Мариуполь и др.) в последние годы ведутся активные исследования в области обработки поверхностей материалов мощными высокоэнергетическими потоками.

Так, например, в Институте электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины разработана перспективная импульсно-плазменная технология трансформации свойств поверхностей сталей и твердых сплавов [1, 2], позволяющая в зависимости от количества импульсов и плотности мощности плазменного воздействия в 2–4 раза повысить износостойкость поверхности твердосплавных прокатных валков вследствие измельчения кристаллов, обогащения кобальтовой связки сложными карбидами и создания в слое сжимающих напряжений.

Авторами работы [3] установлено, что при плазменном нагреве без оплавления углеродистой инструментальной стали У10 формируется неравновесная структура измельченного мартенсита и остаточного метастабильного аустенита (до 70 %), установлена корреляция скорости движения плазмотрона с фазовым составом, его трансформацией, структурой, свойствами. В аналогичном направлении ведутся работы в С.-Петербургском НПФ «Плазмацентр» [4], Приазовском государственном техническом университете [5], ГНУ

«Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси» (ИТМО) [6, 7].

Модификацию образцов сталей проводили на магнитоплазменном компрессоре компактной геометрии МПК-КГ в ИТМО импульсными плазменными потоками при следующих параметрах плазмы: плазмообразующее вещество: воздух; давление – 3 мм рт. ст.;  $U = 4,5$  кВ; скорость плазмы – до 100 км/с; плотность электронов –  $10^{16} - 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ;

Таблица 1 – Режимы обработки образцов

	Количество импульсов	Расстояние до поверхности, см
МПК-КГ	1	8
	5	8
	1	30
	5	17

Модификации подвергались образцы из сталей У8, У12, 10Р6М5. Методология модифицирования изложена в работах [1, 2].

Были проведены исследования морфологии модифицированных образцов. Установлено, что в случае модифицирования поверхности в режиме оплавления (кратность воздействия  $n = 5$ , дистанция от среза плазмотрона до модифицируемой поверхности  $L = 17$  см и  $n = 5$ ,  $L = 8$  см) происходит следующее. В результате ускоренного охлаждения в появившемся на модифицируемой поверхности расплаве формируется измельченная неравновесная ячеисто-дендритная структура, что вызывает повышение ее твердости (для отдельных сталей до 2,5 раз).

На рисунке 1 а, б приведена топография поверхности стали 10Р6М5, обработанной по такому «жесткому» режиму с оплавлением (магнитоплазменный компрессор МПК-КГ,  $n = 5$ ,  $L = 17$  см;  $n = 5$ ,  $L = 8$  см).

В рельефно выступающих оплавленных участках основы стали 10Р6М5 углублены округлые включения более тугоплавких карбидных сферолитов диаметром от 20 до 60 мм.

Аналогичная картина наблюдается и в случае модифицирования поверхности сталей У8 и У12.

При обработке образцов на «более мягких» режимах (только закалка, исключая оплавление поверхности,  $n = 1$ ,  $L = 30$  см) происходит следующее: незначительное скругление полос (рискот от предшествующей механической обработки), либо полное сохранение геометрии поверхности, образующейся при механической обработке шлифа.

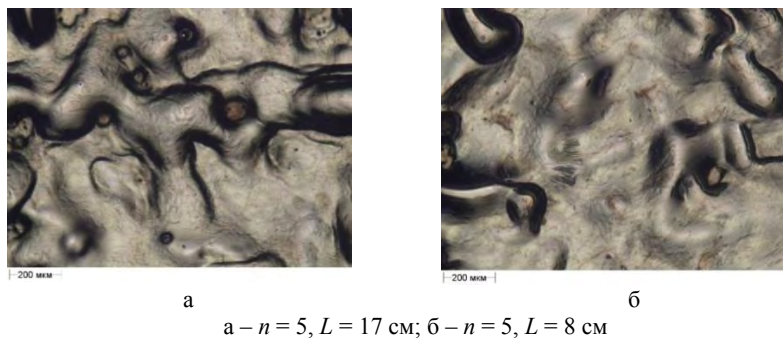


Рисунок 1 – Поверхность модифицированной в режиме оплавления стали 10P6M5

Плазменное воздействие на образцы проводилось при однократном и пятикратном импульсах на различных дистанциях ( $L = 8$  см,  $L = 17$  см,  $L = 30$  см).

Результаты обработки стали 10P6M5 в режиме закалки ( $n = 1$ ,  $L = 30$  см) приведены на рисунке 2, а. В этом случае толщина модифицированного слоя составляет 7–13 мкм (11–13 мкм для режима  $n = 1$ ,  $L = 8$  см), микротвердость закаленного слоя составляет 920 HV и 729 HV соответственно. Микротвердость основы находится на таком же уровне (260–263 HV), как и ранее. В структуре стали четко различимы белые включения первичных карбидов. Очевидно, что при данном режиме модификации подвергается лишь поверхность образца, а во внутреннем объеме материала существенных изменений не происходит.

Модифицирование стали 10P6M5 в режиме оплавления ( $n = 5$ ,  $L = 8$  см) (рисунок 2, б) формирует слой толщиной около 15 мкм, микротвердость которого составляет 1150 HV, микротвердость ос-

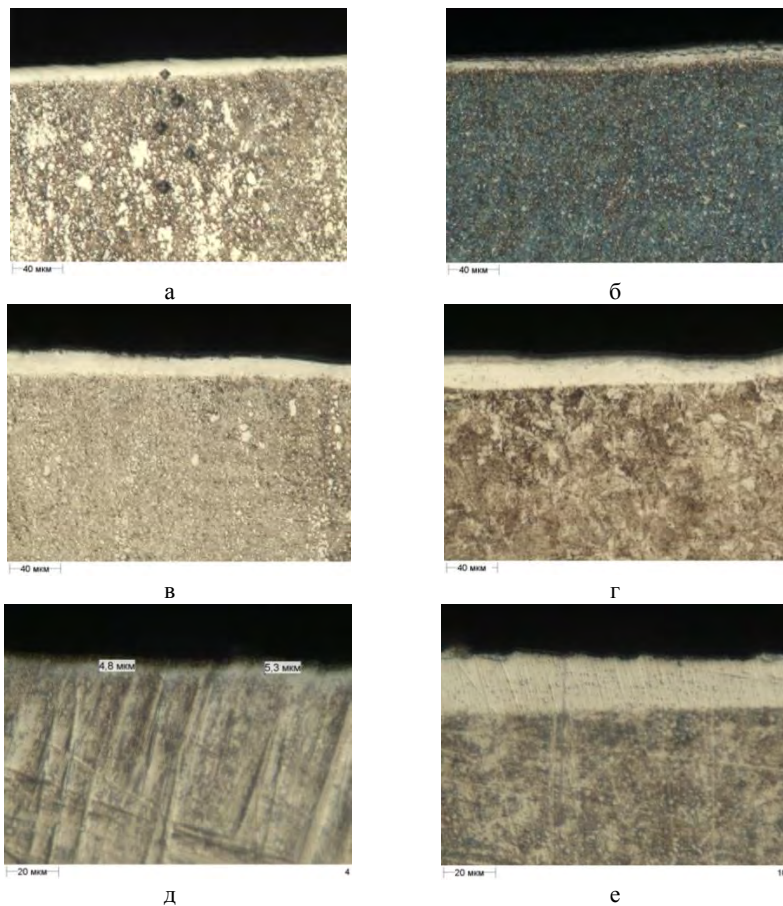
новы стали – 260 HV. При пятикратном сканировании стали 10P6M5 с оплавлением поверхности на другом режиме ( $n = 5$ ,  $L = 17$  см) толщина модифицированного слоя составляет 10–18 мкм, однако твердость его ниже, чем в предыдущем случае (559–656 HV), что соответствует уровню твердости закаленной стали 10P6M5 (рисунок 2, в). При данных режимах обработки стали 10P6M5 наблюдается ярко выраженное измельчение («растворение») карбидных включений. Первичные карбиды уменьшаются в размерах, а вторичные практически исчезают. Это объясняется возросшим тепловложением (увеличение количества импульсов и уменьшение дистанции модификации).

При модифицировании углеродистых инструментальных сталей У8 и У12 наблюдаются закономерности, характерные для стали 10P6M5. При обработке на «мягких» режимах ( $n = 1$ ,  $L = 30$  см) на поверхности образцов образуется тонкий нетравящийся слой толщиной 4–5 мкм (рисунок 2, д), существенного изменения микроструктуры основы не наблюдается.

При пятикратном воздействии и расстоянии 17 см на поверхности образцов происходит образование модифицированного слоя толщиной 30–36 мкм. Четко видно, что микроструктура основы образцов – типичная для заэвтектоидной стали У12 – зернистый перлит. В модифицированном слое наблюдается выделение тонких частиц округлой формы (вероятнее всего это нетравящиеся карбиды) (рисунок 2, е). Микротвердость модифицированного слоя – 1050 HV. Для данного режима характерно снижение микротвердости в «подслое» модифицированного слоя, аналогично ЗТВ (зоне термического влияния) при сварке или лазерной обработке. На глубине около 120 мкм от поверхности происходит незначительное увеличение микротвердости.

При обработке на режимах, где  $n = 5$ ,  $L = 8–17$  см, происходит существенное тепловложение (т.к. наблюдается оплавление поверхности), отмечается существенное увеличение микротвердости, в прямой зависимости от расстояния модифицирования (чем меньше расстояние, тем выше микротвердость). Таким образом, данные режимы можно рекомендовать для упрочнения крупногабаритных деталей и инструмента, в том случае если нет жестких требований к геометрическим параметрам поверхности. В случае плазменного модифицирования инструментов с высокими требованиями к качеству поверхности и точностью геометрических параметров целесо-

образно применение режимов с  $n = 1$ ,  $L = 8-30$  см, так как происходит только поверхностная закалка с увеличением микротвердости (а значит и износостойкости), без значительного оплавления поверхности.



а – сталь 10P6M5,  $n = 1$ ,  $L = 30$  см; б – сталь 10P6M5,  $n = 5$ ,  $L = 8$  см;  
 в – сталь 10P6M5,  $n = 5$ ,  $L = 17$  см; г – сталь У8,  $n = 5$ ,  $L = 17$  см;  
 д – сталь У12,  $n = 1$ ,  $L = 30$  см; е – сталь У12,  $n = 5$ ,  $L = 17$  см

Рисунок 2 – Микроструктура сталей после плазменной обработки

## Литература

1. Импульсно-плазменное модифицирование поверхности изделия из сплава WC-20%Co / Ю.Н. Тюрин [и др.] // ФИП. – 2009. – Т. 7. – № 3. – С. 262–267.
2. Тюрин, Ю.Н. Плазменные упрочняющие технологии / Ю.Н. Тюрин, М.Л. Жданкевич. – Киев: Наук. думка, 2008. – 215 с.
3. Фазовый состав, структура и упрочнение стали У10 при плазменной поверхностной закалке / А.А. Бердников [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. – М.: Машиностроение. – 2016. – № 2. – С. 31–34.
4. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.plasmacentre.ru/FPS/equipment.php>.
5. Самотугина, Ю.С. Плазменное модифицирование сталей и инструмента из высокоуглеродистых сплавов / Ю.С. Самотугина. – Монография. – Мариуполь: Приазовский ГТУ, 2015. – 185 с.
6. Модификация материалов компрессионными плазменными потоками / В.В. Углов [и др.]. – Минск: БГУ, 2013. – 248 с.
7. Структурно-фазовые состояния титана при воздействии компрессионными плазменными потоками / В.М. Асташинский [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 2016. – 180 с.

УДК 621.794.61: 621.747.02

Ю.В. СОКОЛОВ, д-р. техн. наук (БНТУ),  
А.А. ПАРШУТО, канд. техн. наук,  
Е.А. СТЕПАНОВА-ПАРШУТО (ФТИ)

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ОКСИДИРОВАНИЯ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПОЛУЧЕНИЮ ОКСИДНЫХ ПЛЕНОК ДЕКОРАТИВНОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ

Привлекательный товарный вид и способность оксидных пленок противостоять внешним тепловым, механическим и коррозионным воздействиям со стороны окружающей среды являются необходи-