

УДК 621.9.047:669:538.8

*В. М. Шеменков, И. И. Маковецкий*

## ФОРМИРОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ У ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ ТЛЕЮЩИМ РАЗРЯДОМ

UDC 621.9.047:669:538.8

*V. M. Shemenkov, I. I. Makovetsky*

## FORMATION OF MODIFIED SURFACE LAYERS IN TOOL STEELS BY GLOW DISCHARGE

### Аннотация

Представлены результаты исследования структуры инструментальных сталей в исходном состоянии и подвергнутых обработке тлеющим разрядом. Установлено, что обработка тлеющим разрядом приводит к измельчению и перераспределению карбидной фазы в поверхностном слое глубиной до 90 мкм, что приводит к повышению микротвердости до 15...30 %. Проведенные теоретические расчеты позволили установить глубину скин-слоя, возникающего в процессе обработки и находящегося в пределах 70...120 мкм.

### Ключевые слова:

тлеющий разряд, инструментальная сталь, структура, модифицирование, металлография, твердость, скин-эффект.

### Abstract

The results of investigating the structure of tool steels in the initial state and subjected to glow discharge treatment are presented. It was found that the glow discharge treatment leads to disintegration and redistribution of the carbide phase in the surface layer up to 90 microns deep, which results in an increase in microhardness up to 15...30 %. The theoretical calculations performed made it possible to determine the depth of the skin layer that is formed during processing in the range of 70...120 microns.

### Keywords:

glow discharge, tool steel, structure, modification, metallography, hardness, skin effect.

### Введение

Несмотря на тенденции развития инструментального производства, связанные с широким использованием твердых сплавов и сверхтвердых материалов, инструментальные стали, обладающие хорошей прочностью при изгибе, ударной вязкостью и трещиностойкостью, уверенно занимают свою нишу. Следует отметить, что подавляющее число мелкогабаритных режущих инструментов и штамповой оснастки изготавливаются из инструментальных сталей.

Современные реалии требуют постоянного повышения эксплуатацион-

ных свойств рабочих поверхностей ответственных деталей, в особенности инструментальной оснастки.

Тлеющий разряд с различными сочетаниями энергетических характеристик как источник ионизации межэлектродного пространства широко используется при реализации различных технологий как при создании защитных износостойких слоев, так и при поверхностном структурно-фазовом модифицировании инструментальной оснастки, особенно из инструментальных сталей [1, 2].

В Белорусско-Российском университете накоплен колоссальный опыт, позволяющий эффективно использовать



тлеющий разряд с определенным сочетанием технологических факторов [3, 4] для структурно-фазового модифицирования поверхностных слоев различных материалов [5–14].

Однако данный опыт опирается на результаты экспериментальных исследований. С теоретической точки зрения наибольший интерес представляет выявление причины формирования модифицированных поверхностных слоев.

В результате проведенных ранее электрофизических исследований процесса взаимодействия тлеющего разряда и поверхности обрабатываемого изделия была выдвинута гипотеза о возникновении в процессе обработки скин-эффекта, что приводит к неравномерному течению тока по сечению металлосодержащего изделия. Возникающие в процессе вихревые токи, как следствие, приводят к разогреву изделия.

Целью работы являлось подтверждение гипотезы о том, что глубина модифицированного слоя связана с действием скин-эффекта, проявляющегося в обрабатываемых образцах из инструментальных сталей, вызванного возбуждением высокочастотных осцилляций разрядного тока.

### **Методика исследования**

В качестве объекта исследования были выбраны образцы прямоугольной формы (15 × 15 × 5) из:

– стали У8 ГОСТ 1435–74 промышленной плавки. Образцы были подвергнуты закалке в воде с 790 °С (выдержка 1 ч 30 мин) с последующим отпуском при 250 °С в течение 2 ч;

– стали 5ХЗВЗМФС (ДИ23) ГОСТ 5950–2000 промышленной плавки. Образцы были подвергнуты закалке в масле с 1130 °С (выдержка 1 ч 30 мин) с последующим отпуском при 550 °С в течение 2 ч;

– стали Х12 ГОСТ 5950–2000 промышленной плавки. Образцы были подвергнуты закалке в масле с 970 °С (вы-

держка 1 ч 30 мин) с последующим отпуском при 180 °С в течение 1,5 ч;

– стали Р6М5 ГОСТ 19265–73 промышленной плавки. Образцы были подвергнуты закалке в масле от 1220 °С (выдержка 1 ч 30 мин в печи с чугунной стружкой) с последующим трехкратным отпуском при 560 °С в течение 2 ч.

Обработка образцов осуществлялась тлеющим разрядом с напряжением горения 3000 В и плотностью тока 0,375 мА/м<sup>2</sup> в течение 30 мин.

В работе применялся электронно-микроскопический и дюрметрический анализы.

Электронно-микроскопический анализ поверхностного слоя образцов проводился при помощи сканирующего электронного микроскопа Tescan VEGA 2SBA. Подготовка образцов осуществлялась по стандартной методике.

Дюрметрический анализ по глубине образца осуществлялся по методу Виккерса под действием нагрузки в 0,49 Н на твердомере Zwick Roell ZHV 1M.

Исследование осциллограммы тока тлеющего разряда осуществлялось осциллографом GW Instek GDS-710222.

### **Результаты экспериментальных исследований**

С помощью осциллографирования плазмы тлеющего разряда было установлено, что зондовый сигнал повторяет форму тока на выходе выпрямителя (рис. 1). Для двухполупериодной схемы эта форма синусоидальная, но на начальном участке каждой синусоиды наблюдаются высокочастотные (90...110 кГц) колебания. Зависимость амплитуды этих колебаний от напряжения носит колоколообразный характер с максимумом, положение которого определяется величиной разрядного тока.

Установленные зависимости ВЧ-составляющей сигнала от параметров разряда позволяют связать появление ВЧ-импульсов с разрывом тока тлеющего разряда и его переходом в



режим ВЧ-колебаний вследствие нарушения критерия стационарности Бома [15]. ВЧ-колебания катодного падения потенциала плазмы, горящей в нестационарном режиме, способны вызывать импульсное течение ионного тока. В таком случае поверхность катода (облучаемого изделия) подвергается не стационарной, а импульсной («пакет-

ной») бомбардировке потоками ускоренных ионов. Частота их соударений с поверхностью определяется условиями формирования ВЧ-колебаний плазмы, а также характеристиками ионов. Природу этих колебаний можно объяснить нестабильностью при переходе от таунсендовского к тлеющему разряду [16].

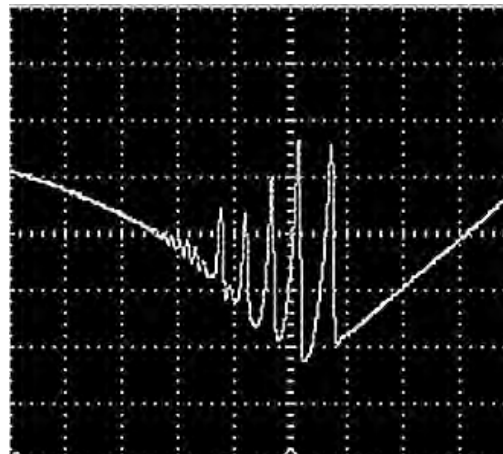
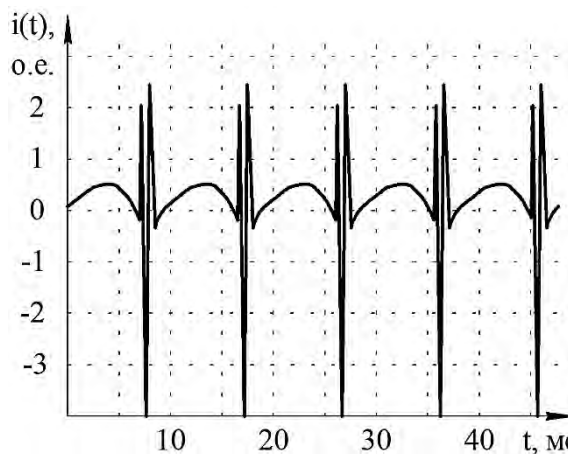


Рис. 1. Оциллограммы тока разряда

На основании электронно-микроскопического анализа выявлено, что структура стали У8 до обработки является мартенситной с карбидными включениями легирующих элементов.

Обработка тлеющим разрядом приводит к перераспределению карбидной фазы в поверхностном слое глубиной до 50...65 мкм (рис. 2).

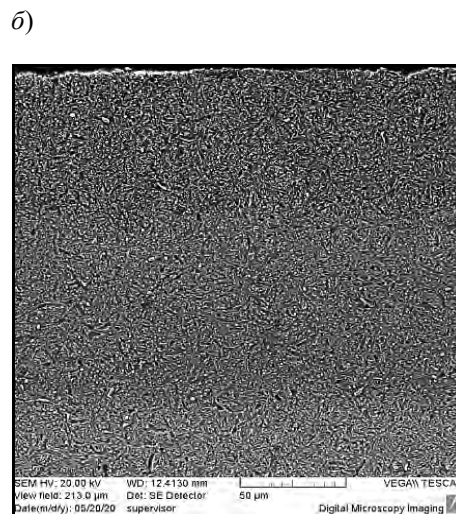
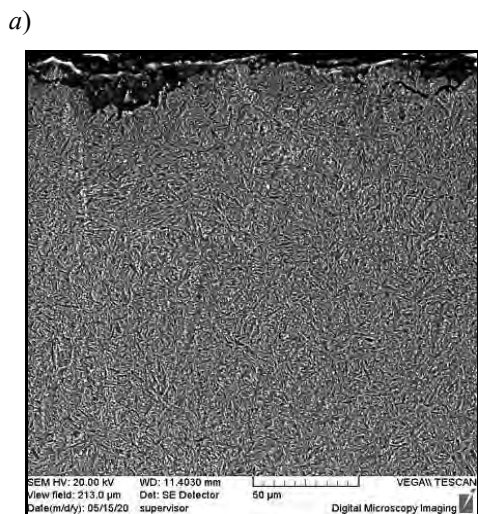


Рис. 2. Структура стали У8: а – до обработки тлеющим разрядом; б – после обработки тлеющим разрядом



Структура стали 5ХЗВЗМФС до обработки является мартенситной с линейным расположением карбидных включений легирующих элементов. Обработка тлеющим разрядом приводит к измельчению и перераспределению карбидной фазы в поверхностном слое глубиной до 60...70 мкм (рис. 3).

На основании электронно-микро-

скопического анализа выявлено, что структура стали Х12 до обработки является мартенситной с линейным расположением карбидных включений сложной формы. Обработка тлеющим разрядом приводит к измельчению и перераспределению карбидной фазы в поверхностном слое глубиной до 65...80 мкм (рис. 4) [14].

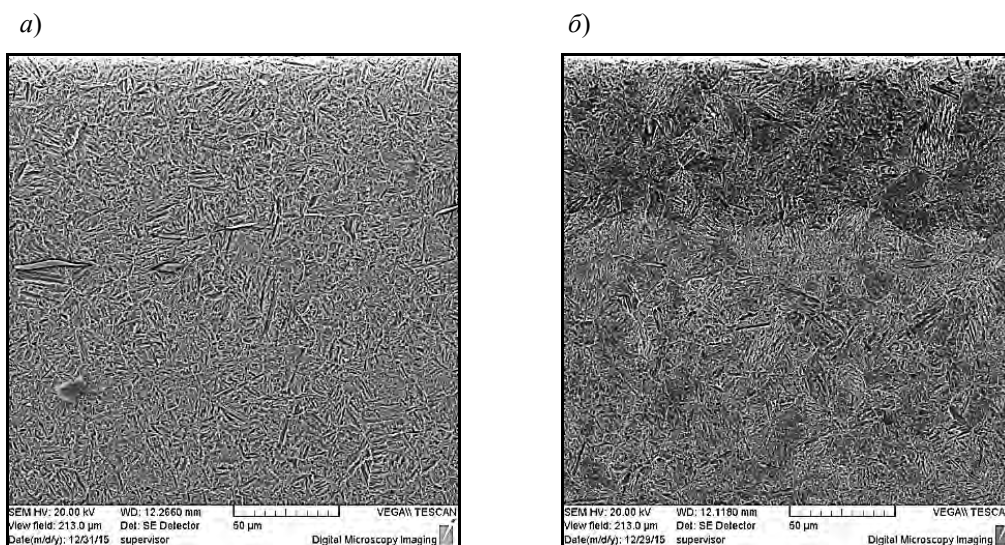


Рис. 3. Структура стали 5ХЗВЗМФС: *a* – до обработки тлеющим разрядом; *б* – после обработки тлеющим разрядом

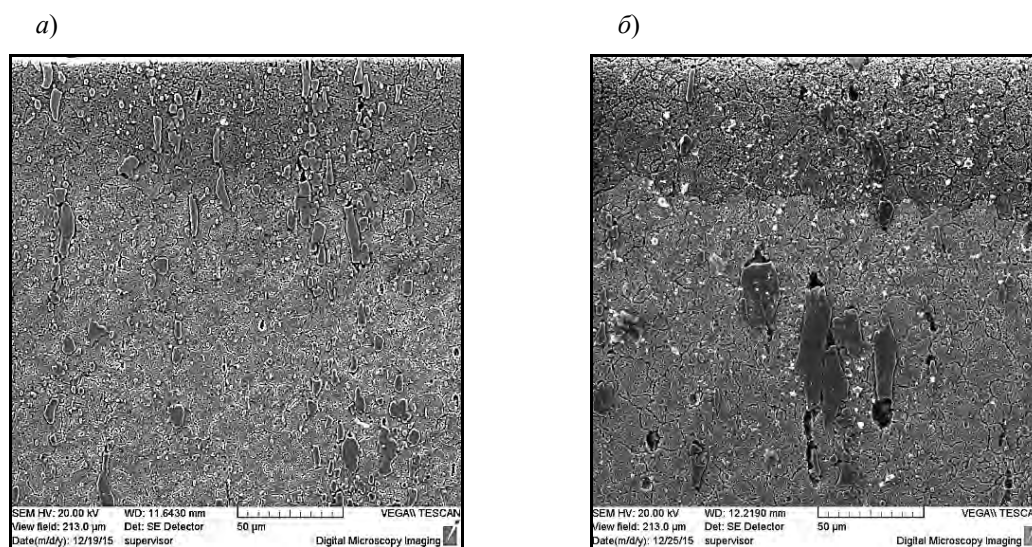


Рис. 4. Структура поверхностного слоя стали Х12: *a* – до обработки тлеющим разрядом; *б* – после обработки тлеющим разрядом



Быстрорежущая сталь Р6М5 до обработки соответствует структуре мартенсита закалки с карбидными включениями. Обработка тлеющим

разрядом приводит к измельчению и перераспределению карбидной фазы в поверхностном слое глубиной до 60...70 мкм (рис. 5) [10].

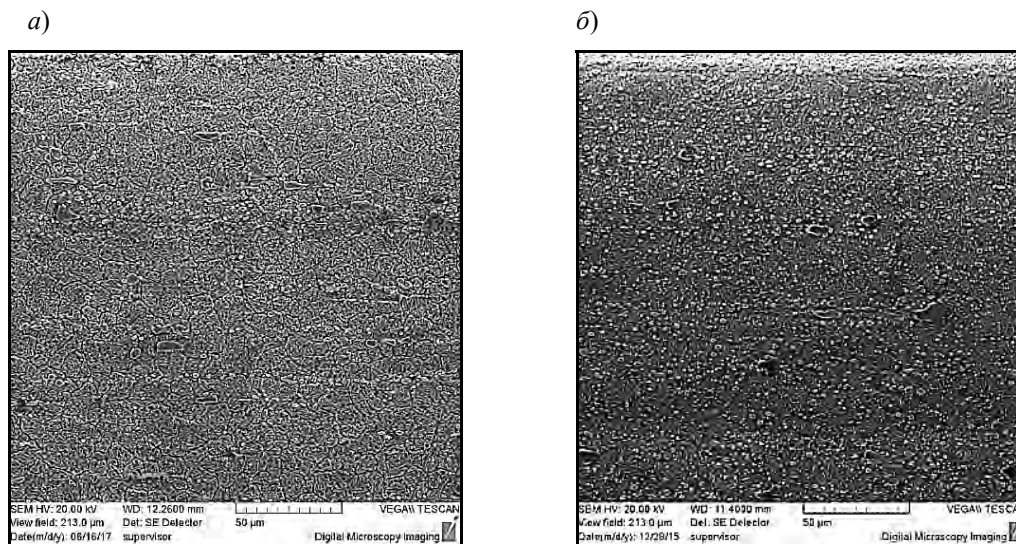


Рис. 5. Структура поверхностного слоя стали Р6М5: а – до обработки тлеющим разрядом; б – после обработки тлеющим разрядом

В результате обработки тлеющим разрядом, помимо структурных изменений, наблюдается изменение микротвердости поверхностных слоев материалов на 15...30 %. Результаты дюрометрического анализа представлены на рис. 6.

Как можно отметить исходя из результатов, представленных на рис. 2–6, данные электронно-микроскопического

и дюрометрического анализов достаточно хорошо коррелируют между собой и позволяют сделать вывод, что глубина модифицированного слоя при обработке стальных изделий существенно зависит от наличия в них легирующих элементов, влияющих на электрофизические свойства.



Рис. 6. Микротвердость поверхностного слоя после обработки тлеющим разрядом: 1 – стали У8; 2 – стали 5X3B3MFC; 3 – стали X12; 4 – стали Р6М5



**Теоретическое описание**

Как известно, магнитное поле создается течением тока в электролитах, электрическими разрядами в газах, катодными и анодными лучами, проявляется при движении электронов в атомах, при колебаниях атомных ядер в молекулах, при изменении ориентации элементарных диполей в диэлектриках и т. д. Во всех случаях магнитное поле возникает в результате движения заряженных микрочастиц, а также благодаря наличию у микрочастиц собственного магнитного момента.

Исходя из предположения, что тлеющий разряд порождает изменяющееся по гармоническому закону электромагнитное поле, есть основания предполагать, что в результате взаимодействия данного электромагнитного поля с помещенной в рабочее пространство стальной заготовкой в приповерхностном слое последней возникает так называемый скин-эффект.

Используя методику, описанную в [17, 18], получим формулу, которая достаточно точно позволяет определить эффективную глубину проникновения магнитного поля в проводник или так называемую эффективную толщину скин-слоя.

Используем систему уравнений Максвелла с дополнительными уравнениями среды:

$$\text{rot } \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}; \quad (1)$$

$$\text{div } \bar{B} = 0; \quad (2)$$

$$\text{rot } \bar{H} = \bar{j} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}; \quad (3)$$

$$\text{div } \bar{D} = \rho; \quad (4)$$

$$\bar{j} = \sigma \bar{E}; \quad (5)$$

$$\bar{D} = \epsilon \epsilon_0 \bar{E}; \quad (6)$$

$$\bar{B} = \mu \mu_0 \bar{H}, \quad (7)$$

где  $\bar{E}$  – вектор напряженности электрического поля;  $\bar{B}$  – вектор напряженности магнитного поля;  $\bar{H}$  – вектор магнитной индукции;  $\bar{j}$  – плотность электрического тока;  $\bar{D}$  – электрическая индукция;  $\rho$  – объемная плотность стороннего электрического заряда;  $\sigma$  – удельная проводимость;  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость;  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная;  $\mu$  – магнитная проницаемость;  $\mu_0$  – магнитная постоянная.

Возьмем ротор от уравнения (3):

$$\text{rot rot } \bar{H} = \text{rot } \bar{j} + \text{rot } \frac{\partial \bar{D}}{\partial t},$$

далее используем свойства векторных операторов и получаем

$$\text{grad div } \bar{H} - \Delta \bar{H} = \sigma \text{rot } \bar{E} + \frac{\partial}{\partial t} \text{rot } \bar{D}.$$

Так как  $\text{div } \bar{H} = \frac{1}{\mu \mu_0} \text{div } \bar{B} = 0$ , то

$$-\Delta \bar{H} = -\sigma \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} - \epsilon \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \right),$$

откуда с учетом (6) и (7) получаем

$$\Delta \bar{H} = \sigma \mu \mu_0 \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} + \epsilon \epsilon_0 \mu \mu_0 \frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial t^2}. \quad (8)$$

Данному уравнению соответствует дисперсионное уравнение

$$k^2 = \sigma \mu \mu_0 i \omega + \epsilon \epsilon_0 \mu \mu_0 \omega^2.$$



Найдем волновое число  $k$ , мнимая часть которого определяет глубину проникновения, для случая сильной проводимости среды ( $\sigma \gg \omega$ ):

$$k_0 = \sqrt{\sigma \omega \mu \mu_0} \cdot \sqrt{i} \cdot \sqrt{1 - \frac{\omega \varepsilon \varepsilon_0}{\sigma}} i.$$

Окончательно

$$k_0 \approx \sqrt{\sigma \omega \mu \mu_0} \cdot \sqrt{i} = \sqrt{\sigma \omega \mu \mu_0} \cdot \frac{1+i}{\sqrt{2}}.$$

Глубина проникновения волны

$$\rho = \frac{1}{\text{Im}(k_0)} = \sqrt{\frac{2}{\sigma \omega \mu \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{\pi \sigma \nu \mu \mu_0}}$$

или

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \nu \mu \mu_0}}, \quad (9)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление материала заготовки, Ом·м;  $\nu$  – частота магнитного поля, с<sup>-1</sup>;  $\mu$  – магнитная проницаемость материала заготовки, для стали  $\mu \approx 100$  при индуктивности магнитного поля не более при 0,002 Тл;  $\mu_0$  – магнитная постоянная, Н·А<sup>-2</sup>,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ .

Таким образом, подставив значения параметров в выражение (9), можно оценить глубину скин-слоя для конкретной инструментальной стали при обработке тлеющим разрядом (табл. 1).

Табл. 1. Расчетное значение глубины скин-слоя при обработке тлеющим разрядом

Обрабатываемый материал	Удельное сопротивление материала заготовки при температуре заготовки, Ом·м [19]		Частота магнитного поля, с <sup>-1</sup>	Глубина скин-слоя при температуре заготовки, м	
	20 °С	100 °С		20 °С	100 °С
У8	$18 \cdot 10^{-8}$	$23,2 \cdot 10^{-8}$	10 <sup>5</sup>	$67,5 \cdot 10^6$	$76,7 \cdot 10^6$
5ХЗВЗМФС	$43,6 \cdot 10^{-8}$	$50,2 \cdot 10^{-8}$		$105,1 \cdot 10^6$	$112,8 \cdot 10^6$
X12	$50,6 \cdot 10^{-8}$	$58,4 \cdot 10^{-8}$		$113,2 \cdot 10^6$	$121,6 \cdot 10^6$
P6M5	$41,9 \cdot 10^{-8}$	$47,2 \cdot 10^{-8}$		$103 \cdot 10^6$	$109,3 \cdot 10^6$

Как видно из результатов моделирования, возникающий в процессе обработки тлеющим разрядом различных сталей скин-эффект формирует эффективный слой от 65 до 120 мкм. Следует отметить, что исходя из анализа табл. 1 на величину скин-слоя в значительной степени влияют легирующие элементы и температура нагрева изделия в процессе обработки.

### Заключение

Обработка инструментальных сталей тлеющим разрядом приводит к

формированию модифицированного поверхностного слоя, который отличается от основного материала повышенной на 15...30 % твердостью.

В качестве гипотезы предложено, что модифицирование поверхностного слоя при обработке тлеющим разрядом связано с возникающим скин-эффектом. Представленное теоретическое описание процесса показывает, что в процессе обработки может формироваться скин-слой глубиной до 120 мкм и он хорошо согласуется с толщиной модифицированного слоя, выявленного электронно-микроскопическим и дюрOMET-



рическим анализами, в результате чего можно с уверенностью утверждать, что

выдвинутая гипотеза имеет право на существование.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Григорьев, С. Н.** Методы повышения стойкости режущего инструмента / С. Н. Григорьев. – Москва: Машиностроение, 2009. – 368 с.
2. Структурно-фазовое модифицирование инструментальных материалов тлеющим разрядом: [монография] / В. М. Шеменков [и др.]; под общ. ред. канд. техн. наук, доц. В. М. Шеменкова. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – 270 с.: ил.
3. Способ упрочнения изделий из металла или сплава, или сверхтвердого или графитсодержащего материала: пат. № 14716 ВУ, U C 21 D 1/78 / В. М. Шеменков, А. Ф. Короткевич. – Опубл. 10.05.2011.
4. Способ упрочнения изделий из металла или сплава, или сверхтвердого или графитсодержащего материала: пат. № 22048 ВУ, C1 / В. М. Шеменков, Ф. М. Трухачев, О.В. Обидина, М. А. Белая, А. Л. Шеменкова. – Опубл. 30.02.2018.
5. **Шеменков, В. М.** Влияние параметров модифицирующей обработки тлеющим разрядом на структуру и свойства твердых сплавов / В. М. Шеменков, Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко // Весн. Гродзенскага дзяржаўнага ўн-та імя Я. Купалы. – 2012. – Т. 6, № 2 (133). – С. 52–65.
6. **Терешко, И. В.** Изменение свойств материалов и необходимость автоматизации технологической среды плазменной обработки в тлеющем разряде / И. В. Терешко, В. А. Логвин, В. П. Редько // Качество. Инновации. Образование. – 2015. – Т. 2, № 5. – С. 403–410.
7. **Шеменкова, А. Л.** Влияние тлеющего разряда на структуру и фазовый состав режущей оксидно-карбидной керамики / А. Л. Шеменкова, Ф. Г. Ловшенко, В. М. Шеменков // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2015. – №3 (48). – С. 79–87.
8. Влияние плазменной обработки на структуру и свойства твердого сплава ВК10 / О. В. Обидина [и др.] // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2015. – № 4. – С. 482–487.
9. Влияние обработки тлеющим разрядом на структуру, фазовый состав и износостойкость сталей, подвергнутых химико-термической обработке / В. М. Шеменков [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2016. – № 1. – С. 100–113.
10. Влияние плазменной обработки на структуру и свойства быстрорежущих сталей Р6М5 и S90 / О. В. Обидина [и др.] // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2016. – № 4. – С. 522–529.
11. Влияние обработки тлеющим разрядом на структуру, фазовый состав, твердость и износостойкость быстрорежущей стали Р9 / В. М. Шеменков [и др.] // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2017. – № 4. – С. 535–541.
12. **Шеменков, В. М.** Влияние обработки тлеющим разрядом на структуру, фазовый состав и твердость износостойких защитных покрытий на основе титана / В. М. Шеменков, М. А. Белая, А. Л. Шеменкова // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2017. – № 1. – С. 118–127.
13. **Логвин, В. А.** Изменение дислокационной структуры  $\alpha$ -Fe в результате воздействия плазмы тлеющего разряда / В. А. Логвин, И. В. Терешко, С. А. Шептунов // Вестн. Брянского гос. техн. ун-та. – 2018. – № 3. – С. 47–56.
14. Влияние обработки тлеющим разрядом на структуру, фазовый состав и износостойкость инструментальных штамповых сталей / В. М. Шеменков [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2018. – № 4 (61). – С. 28–38.
15. Bohm criterion failure and periodic oscillations of the plasma sheath in nonstationary plasmas / Ya. Z. Slutsker [et al.] // Strong Microwaves in Plasmas. – Nizhny Novgorod: Inst. Appl. Phys. RAS, 2003. – Vol. 2. – P. 537–547.
16. **Сафронов, Е. А.** Неравновесность плазмы тлеющих разрядов в атомарных и молекулярных газах атмосферного давления: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.08 / Е. А. Сафронов. – Минск, 2011. – 185 с.
17. **Ландау, Л. Д.** Теоретическая физика: учебное пособие в 10 т. Т. VIII: Электродинамика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 656 с.
18. **Мешков, И. Н.** Электромагнитное поле / И. Н. Мешков, Б. В. Чириков. – Новосибирск: Наука, 1987. – 272 с.



19. Марочник сталей и сплавов / А. С. Зубченко [и др.]; под общ. ред. А. С. Зубченко. – 2-е изд., доп. и испр. – Москва: Машиностроение, 2003. – 784 с.: ил.

*Статья сдана в редакцию 24 августа 2020 года*

**Владимир Михайлович Шеманков**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.  
E-mail: VShemenkov@yandex.ru.

**Илья Иванович Маковецкий**, канд. физ.-мат. наук, доц., Белорусско-Российский университет.  
E-mail: imi.makzi@gmail.com.

**Vladimir Mikhailovich Shemenkov**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.  
E-mail: VShemenkov@yandex.ru.

**Ilya Ivanovich Makovetsky**, PhD (Physics and Mathematics), Associate Prof., Belarusian-Russian University.  
E-mail: imi.makzi@gmail.com.

