

УДК 621.039.6

### ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО НИКЕЛЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПЛАЗМЫ

А. Г. АНИСОВИЧ<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Физико-технический институт НАН Беларуси,  
ул. Купревича, 10, 220141, г. Минск, Беларусь

Исследовано влияние холодной плазмы воздуха на катодный никель марки Н-1. Проанализировано изменение микроструктуры, макро- и микронапряжений, а также статических смещений атомов из положений равновесия. Методом прицельной металлографии показано, что при воздействии плазмы микроструктура материала остается неизменной. В ходе рентгеноструктурных исследований установлено, что плазменная обработка не влияет на уровень микронапряжений. Показано снижение величины макронапряжений и статических смещений атомов из положений равновесия при воздействии плазмы в течение 5 и 10 мин. При этом макронапряжения изменяются от напряжений растяжения в исходном состоянии до напряжений сжатия после обработки плазмой.

**Ключевые слова:** низкоэнергетическая плазма; микроструктура; электролитический никель; статические смещения атомов.

**Благодарность.** Работа выполнена при финансовой поддержке государственной программы научных исследований на 2016–2020 гг. «Конвергенция-2020», подпрограммы «Микромир, плазма и Вселенная» (задание 2.4.02).

---

#### Образец цитирования:

Анисович А. Г. Изменение напряженного состояния электролитического никеля при воздействии плазмы. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика.* 2021;1: 82–89.  
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2021-1-82-89>

#### For citation:

Anisovich AG. Change of tension state of electrolytic nickel under exposure to plasma. *Journal of the Belarusian State University. Physics.* 2021;1:82–89. Russian.  
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2021-1-82-89>

---

#### Автор:

**Анна Геннадиевна Анисович** – доктор физико-математических наук, доцент; заведующий лабораторией микроскопии и структурного анализа.

#### Author:

**Anna G. Anisovich**, doctor of science (physics and mathematics), docent; head of the laboratory of microscopy and structural analysis.  
[anna-anisovich@yandex.ru](mailto:anna-anisovich@yandex.ru)  
<https://orcid.org/0000-0003-3732-815X>

## CHANGE OF TENSION STATE OF ELECTROLYTIC NICKEL UNDER EXPOSURE TO PLASMA

A. G. ANISOVICH<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Physical-Technical Institute, National Academy of Sciences of Belarus,  
10 Kupreviča Street, Minsk 220141, Belarus

A study of the effect of cold air plasma on cathode nickel grade N-1 has been carried out. The changes in the microstructure, macro- and microstresses, as well as static displacements of atoms from equilibrium positions are investigated. By the method of aim metallography it was shown that the microstructure does not change under plasma exposure. X-ray structural studies have established that the level of microstresses does not change when exposed to plasma. A decrease in the magnitude of macrostresses is shown when exposed to plasma for 5 and 10 min. Macrostresses in this case vary from tensile stresses in the initial state to compressive stresses after exposure to plasma. The change in the static displacements of atoms from the equilibrium positions and their decrease when exposed to plasma have been established.

**Keywords:** low-energy plasma; microstructure; electrolytic nickel; static displacements of atoms.

**Acknowledgements.** This work was supported by the state program of scientific research for 2016–2020 «Convergence-2020», subprogram «Microcosm, plasma and the Universe» (assignment 2.4.02).

### Введение

Низкотемпературная плазма представляет интерес для исследователей в силу эффективности ее воздействия на некоторые свойства материалов. Установлено изменение адгезии [1], шероховатости [2] и гидрофобных свойств [3; 4] поверхностей материалов. Показано существенное изменение механических свойств [5; 6], твердости и износостойкости гальванических покрытий хрома [7]. Увеличение износостойкости при воздействии плазмы связано с изменением морфологии поверхности [8]. После газоразрядной обработки алюминия и его сплавов с магнием низкоэнергетическими ионами гелия наблюдалось улучшение пластических свойств, обусловленное повышением однородности пластической деформации [9].

Исследования изменения структуры металлов и сплавов под воздействием холодной плазмы воздуха немногочисленны. Причиной тому являются проблемы в интерпретации получаемых результатов: микроструктурные эффекты воздействия незначительны или находятся на грани чувствительности метода. Есть основание полагать, что изменение свойств металлов и сплавов при обработке плазмой обусловлено процессами, происходящими на уровне кристаллической решетки [10].

Возможность практического применения низкотемпературной плазмы для повышения комплекса свойств материалов подтверждена патентами [11–13].

В данной работе исследовано влияние низкотемпературной плазмы воздуха на изменение напряженного состояния и микроструктуры катодного никеля марки Н-1.

### Материалы и методики эксперимента

Рентгеноструктурные исследования проведены в излучении  $\text{CuK}_\alpha$  на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3 (НПП «Буревестник», Россия), оснащенном аппаратно-программным комплексом для управления прибором и обработки результатов измерений.

Оценка микронапряжений производилась по методике, описанной в работе [14]. Макронапряжения определяли по формуле

$$\sigma = -\frac{E}{\mu} \text{ctg}\theta \Delta\theta,$$

где  $E$  и  $\mu$  – модуль Юнга и коэффициент Пуассона соответственно;  $\theta$  – положение максимума линии эталона;  $\Delta\theta$  – смещение максимума интерференционной линии образца относительно эталона ( $\theta - \theta_{\text{образца}}$ ). Значение модуля Юнга никеля принималось равным 196 ГПа, коэффициента Пуассона – 0,28.

Статические смещения атомов из положения равновесия вычисляли по соотношению

$$\bar{u}_{\text{ст}}^2 = \frac{3a^2 \ln \frac{I_{\text{эталона}}}{I_{\text{образца}}}}{4\pi^2 (h^2 + k^2 + l^2)},$$

где  $I_{\text{эталона}}$  и  $I_{\text{образца}}$  – интегральная интенсивность линий эталона и исследуемого образца соответственно;  $h, k, l$  – индексы Миллера;  $a$  – параметр кристаллической решетки образца.

Исследование микроструктуры осуществлялось с использованием металлографического комплекса на базе оптического инвертированного микроскопа МИ-1 (ООО «Оптоэлектронные системы», Беларусь) при 1000-кратном увеличении и освещении по методу светлого поля [15]. Шлифы изготавливались по общепринятой методике. Травление производилось реактивом состава 50 %  $\text{HNO}_3$  + 50 %  $\text{HF}$ . В исследовании применялся метод прицельной металлографии, который заключается в фотографировании одного и того же участка структуры до и после воздействия.

Обработка образцов никеля низкотемпературной неравновесной плазмой низкого давления ( $P \sim 133$  Па), возбуждаемой в атмосфере воздуха высокочастотным емкостным разрядом, проведена на экспериментальном стенде на основе генератора высокочастотного ( $f = 5,28$  МГц) тока (рис. 1). Стенд оснащен комплексом измерительной аппаратуры, обеспечивающей контроль режимов обработки.

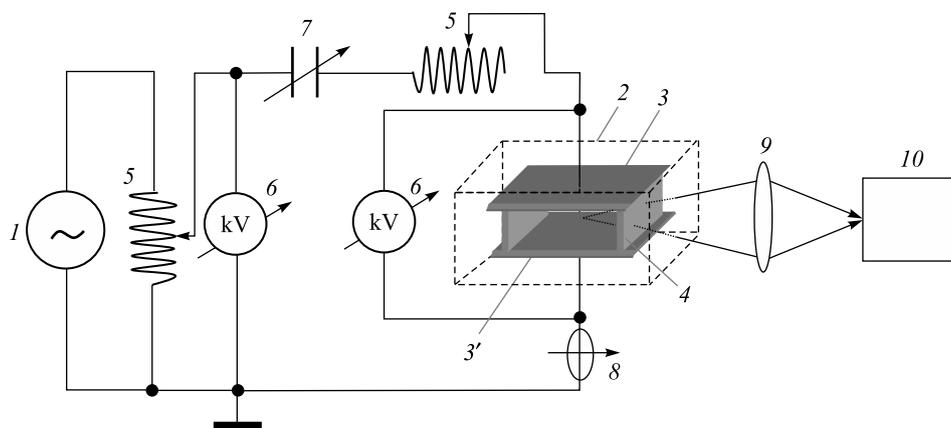


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда:

- 1 – высокочастотный генератор; 2 – разрядная камера (РК);  
 3 и 3' – высоковольтный и заземленный электроды РК; 4 – кварцевое окно РК;  
 5 – индукционная катушка; 6 – киловольтметр; 7 – конденсатор;  
 8 – пояс Роговского; 9 – объектив; 10 – спектрометр

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental stand:

- 1 – high-frequency generator; 2 – discharge chamber (DC);  
 3 and 3' – high-voltage and grounded DC electrodes; 4 – DC quartz window;  
 5 – induction coil; 6 – kilovoltmeter; 7 – capacitor; 8 – Rogowski coil; 9 – objective; 10 – spectrometer

Образцы располагались в разрядной камере (РК) на охлаждаемом проточной водой заземленном электроде 3'. Расстояние между электродами  $L$  составляло 20 мм. Удельный энергозатрат в разряд был порядка  $1 \text{ Вт/см}^3$ , время  $t$  воздействия на образцы задавалось равным 5 и 10 мин.

Спектроэнергетические характеристики плазмы контролировались с помощью спектрометра SL100 (см. рис. 1, 10), оснащенного регистрирующей излучение плазмы двумерной ПЗС-матрицей размером  $256 \times 256$  пк. В диапазоне длин волн  $\Delta\lambda = 200\text{--}1000$  нм эмиссионные спектры возбуждаемой плазмы представлены молекулярными полосами второй положительной (2+) и первой положительной (1+) систем азота, а также первой отрицательной (1-) системы молекулярного иона азота  $\text{N}_2^+$ . Анализ пространственных распределений интенсивностей  $I$  ( $0 < l < L$ ) свечения плазмы показал, что возбуждаемый разряд является неоднородным вдоль межэлектродного промежутка  $L$  и имеет присущие для  $\alpha$ -формы высокочастотного разряда приэлектродные зоны нескомпенсированного пространственного заряда. Вид распределений  $I$  ( $0 < l < L$ ) носит экстремальный характер с одним максимумом в центральной зоне межэлектродного промежутка.

Газокинетическую температуру плазмы  $T_g$ , определяющую тепловые потоки на помещаемый в разряд обрабатываемый образец, и эффективность его бомбардировки заряженными частицами контролировали с использованием метода эмиссионной спектроскопии. Значения  $T_g$  устанавливали по распределению интенсивности излучения  $I(\lambda)$  электронно-колебательных полос системы 2+ азота в спектрах с неразрешенной вращательной структурой. Величина температуры  $T_g$  в пределах погрешности ее измерений практически не изменялась вдоль межэлектродного промежутка и составляла  $\approx 300$  К. Таким образом, можно считать, что располагавшиеся на нижнем электроде образцы дополнительному термическому нагреву в плазме не подвергались.

## Результаты и их обсуждение

В процессе воздействия плазмы наблюдается существенное изменение вида рентгенограммы (рис. 2). При визуальном сравнении заметно перераспределение интенсивности линий (наиболее значительное – у линий (220) и (311)). Изменение относительной интенсивности интерференционных линий представлено в табл. 1.

Таблица 1

Изменение интенсивности интерференционных линий никеля, %

Table 1

Change in the intensity of the interference lines of nickel, %

| <i>hkl</i> | Время обработки, мин |       |       | Интенсивность табличная |
|------------|----------------------|-------|-------|-------------------------|
|            | 0                    | 5     | 10    |                         |
| (111)      | 100                  | 97,86 | 96,41 | 100                     |
| (200)      | 48,83                | 49,35 | 43,76 | 49                      |
| (220)      | 8,75                 | 100   | 100   | 98                      |
| (311)      | 13,77                | 32,87 | 33,46 | 33                      |
| (222)      | 2,9                  | 2,38  | 4,21  | 2                       |

Изменение интенсивности интерференционных линий рентгенограмм металлических материалов обуславливают следующие факторы: изменение уровня микронапряжений и размеров блоков когерентного рассеяния, образование дефектов упаковки, а также текстура [14]. Микронапряжения, как правило, влияют на параметр кристаллической решетки и уширение интерференционных линий рентгенограммы.

Параметр кристаллической решетки не изменяется в процессе воздействия плазмы (табл. 2). Полуширина линии (311) снижается, но данное изменение незначительно. Так как полуширина линии (311) эталона составляет  $5,68 \cdot 10^{-3}$  рад, провести расчет физического уширения линии не представляется возможным. Таким образом, можно считать, что изменение уровня дезориентированных микронапряжений в процессе воздействия низкотемпературной плазмы не существенно.

Как было показано в работе [16], величина блоков когерентного рассеяния электролитического никеля не претерпевает существенных изменений и поэтому также не вносит вклад в изменение интенсивности линий. Отсутствие изменений уровня микронапряжений подтверждают и результаты исследования микроструктуры. На рис. 3 видно, что микроструктура никеля представлена двойниками различной ориентации, располагающимися внутри зерен, и в процессе обработки плазмой в течение 5 и 10 мин не изменяется.

Для образцов, обработанных плазмой, соотношение  $\frac{\sin \theta_{(200)}}{\sin \theta_{(111)}}$  также остается неизменным [16]. Это

говорит о том, что под воздействием низкотемпературной плазмы дефекты упаковки не образуются.

Изменение интенсивности линий на рентгенограммах при классических способах обработки связывают в первую очередь с наличием текстуры. Исследование возможной трансформации текстуры при воздействии плазмы проведено в работе [16]. Было показано повышение интенсивности ориентировки  $\langle 220 \rangle$ , что означает существенное усиление текстуры электролитического осаждения. При таком уровне изменения ориентировок текстуры следовало бы ожидать значительного изменения микроструктуры. Усиление текстуры электролитического осаждения не может быть связано и с процессами упрочнения или разупрочнения за счет изменения дислокационной структуры, поскольку это также отразилось бы в изменении величины микронапряжений. Вносимые плазмой изменения концентрируются на масштабном уровне, намного меньшем, чем размер блоков когерентного рассеяния [16].

Из данных, представленных в табл. 2, видно, что существенно изменяются микронапряжения, а также статические смещения атомов из положений равновесия. Макронапряжения в процессе обработки снижаются по абсолютной величине. В исходном состоянии в никеле присутствуют напряжения растяжения, а при воздействии плазмы формируются напряжения сжатия.

Статические смещения атомов из положения равновесия также снижаются в результате обработки, что говорит о совершенствовании кристаллической решетки никеля (см. табл. 2). Изменение статических смещений под воздействием низкотемпературной плазмы наблюдалось в латуни и меди [17; 18].

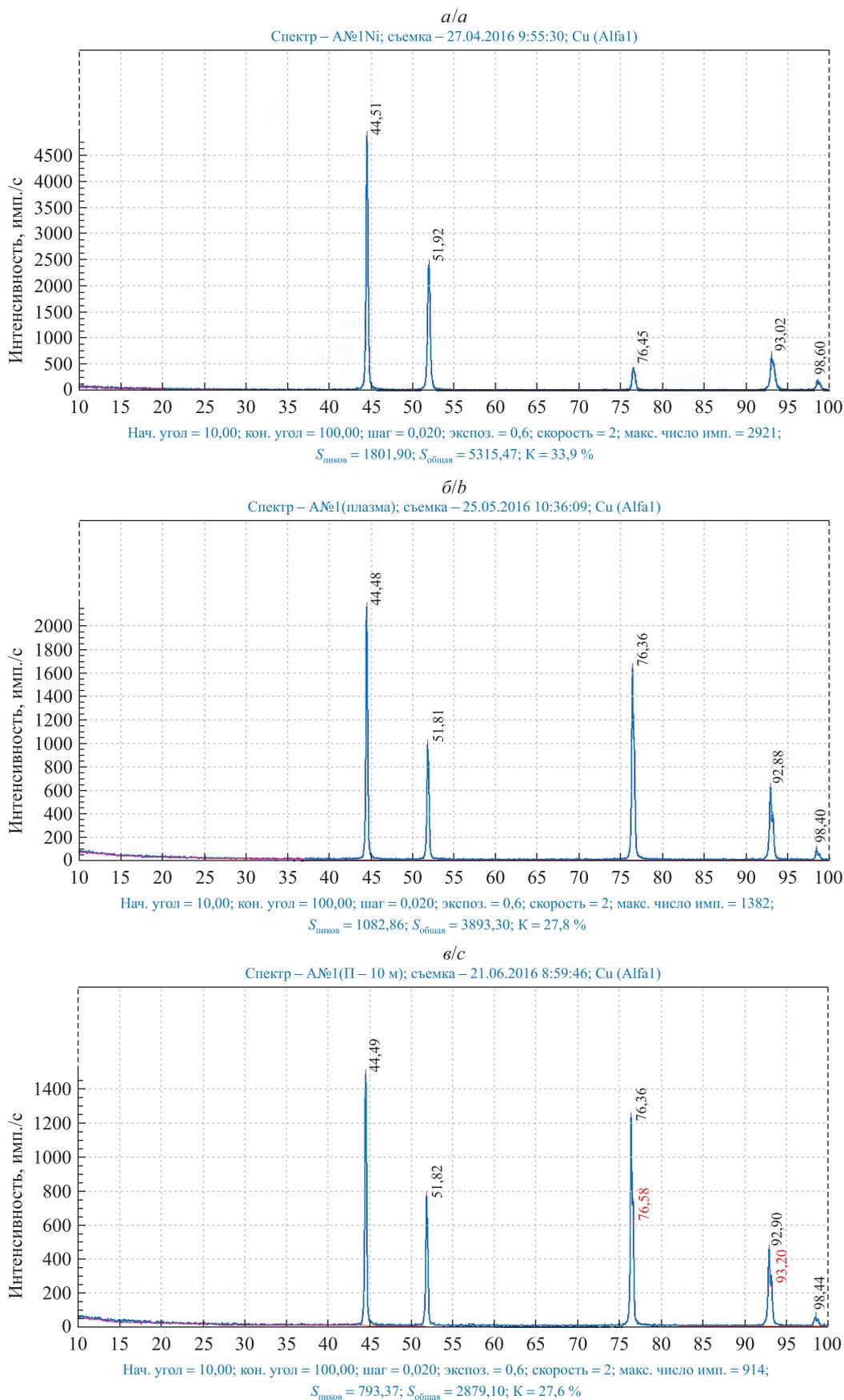


Рис. 2. Рентгенограммы образцов после обработки плазмой:  
*a* – исходное состояние; *б*, *в* – обработка плазмой в течение 5 и 10 мин соответственно

Fig. 2. X-ray diffraction patterns of samples after plasma treatment:  
*a* – initial state; *b*, *c* – plasma treatment for 5 and 10 min, respectively

Таблица 2

Изменение параметра кристаллической решетки, полуширины интерференционной линии и напряженного состояния электролитического никеля после воздействия плазмы

Table 2

Changes in the crystal lattice parameter, the half width of the interference line and the stress state of electrolytic nickel after exposure to plasma

| Время обработки, мин | Параметр решетки, нм | Полуширина линии $(311)_{Ni}$ , $10^{-3}$ рад | Макронапряжение, ГПа | Статическое смещение, нм |
|----------------------|----------------------|---|----------------------|--------------------------|
| 0                    | 0,3520               | 7,26  | 0,47                 | 0,00994                  |
| 5                    | 0,3522               | 4,42  | -0,1103              | 0,00662                  |
| 10                   | 0,3522               | 4,50  | -0,1103              | 0,00374                  |

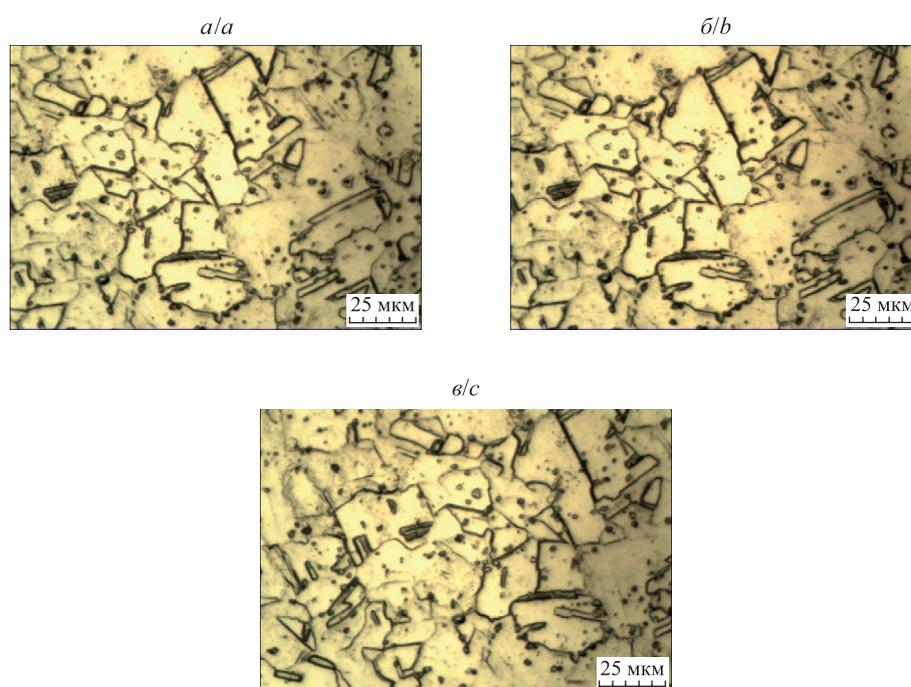


Рис. 3. Структура образца в исходном состоянии (а) и после обработки плазмой в течение 5 мин (б) и 10 мин (в) (прицельная металлография)

Fig. 3. The structure of the sample in the initial state (a) and after plasma treatment for 5 min (b) and 10 min (c) (sighting metallography)

Согласно [19] на искажения кристаллической решетки приходится основная часть энергии остаточных напряжений (98–99 %), локализованных около границ (напряжения 3-го рода). Область концентрации таких напряжений достигает нескольких десятых от межатомного расстояния. Искажения решетки, в отличие от тепловых колебаний, которые являются динамическими, остаются неизменными, т. е. статическими.

Смещения атомов из положения равновесия (или напряжения 3-го рода) вызывают уменьшение относительной интенсивности линий рентгенограммы, особенно при больших значениях  $\sin \frac{\theta}{\lambda}$  ( $\lambda$  – длина волны рентгеновского излучения). Их влияние на интенсивность аналогично влиянию тепловых колебаний. Но если тепловые колебания атомов усредняются во времени, то статические смещения атомов – по всем ячейкам кристалла. Статические искажения кристаллической решетки оказывают существенное влияние на некоторые физические и химические свойства материалов.

Одним из направлений дальнейших исследований может быть установление связи между уровнем макронапряжений и величиной статических смещений при воздействии низкотемпературной плазмы.

## Заклучение

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. При воздействии низкотемпературной неравновесной воздушной плазмы отмечается существенное перераспределение интенсивности линий рентгенограммы.
2. Наблюдаемые на рентгенограммах изменения не связаны с изменением уровня микронапряжений.
3. Вносимые плазмой изменения обусловлены изменением уровня напряжений 3-го рода (статических смещений атомов из положения равновесия).

## Библиографические ссылки

1. Prysiazhnyi V, Stupavská M, Ráhe J, Kleber C, Černák M, Rafailović LD. A comparison of chemical and atmospheric plasma assisted copper plating on carbon fiber reinforced epoxy polymer surfaces. *Surface and Coatings Technology*. 2014;258:1082–1089. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.07.026.
2. Zendeenam Arman, Ghasemi J, Zendeenam Akbar. Employing cold atmospheric plasma (Ar, He) on Ag thin film and their influences on surface morphology and anti-bacterial activity of silver films for water treatment. *International Nano Letters*. 2018;8:157–164. DOI: 10.1007/s40089-018-0240-8.
3. Vivet L, Joudrier A-L, Bouttemy M, Vigneron J, Tan KL, Morelle JM, et al. Wettability and XPS-analyses of nickel – phosphorus surfaces after plasma treatment: an efficient approach for surface qualification in mechatronic processes. *Applied Surface Science*. 2013;274:71–78. DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.02.093.
4. Dong Sh, Guo P, Chen Yue, Chen Gui-yun, Ji H, Ran Ye, et al. Surface modification via atmospheric cold plasma (ACP): improved functional properties and characterization of zein film. *Industrial Crops and Products*. 2018;115:124–133. DOI: 10.1016/j.indcrop.2018.01.080.
5. Tereshko IV, Abidzina VV, Elkin IE, Tereshko AM, Glushchenko VV, Stoye S. The formation of nanoclusters in metals by the low-energy ion irradiation. *Surface and Coatings Technology*. 2007;201(19–20):8552–8556. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2006.03.056.
6. Tereshko IV, Abidzina VV, Tereshko AM, Elkin IE. Nanostructural evolution of steel and titanium alloys exposed to glow-discharge plasma. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2007;261(1–2):678–681. DOI: 10.1016/j.nimb.2007.04.021.
7. Anisovich AG, Azharonok VV, Gologan VF, Bobanova ZhI, Ivashku SKh, Kroitoru DM. The effect of low temperature nonequilibrium plasma on copper and chromium electrodeposited coatings. *International Journal of Research Studies in Science, Engineering and Technology*. 2016;3(2):42–49.
8. Anisovich AG, Azharonok VV, Gologan VF, Tereshko IV. Surface transformation of electrodeposited coatings under exposure to cold plasma and magnetic field. In: *7<sup>th</sup> International conference on materials science and condensed matter physics. Abstracts; 2014 September 16–19; Chisinau, Moldova*. Chisinau: [s. n.]; 2014. p. 281.
9. Барвинок ВА, Рясный АВ. Влияние низкоэнергетической плазменной обработки на физико-механические свойства и структуру алюминия и его сплавов. *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия физико-математических наук*. 2009;2(19):193–199. DOI: 10.14498/vsgtu715.
10. Anisovich AG, Azharonok VV, Filatova II. Lattice strain as a factor of structure formation. In: *8<sup>th</sup> International conference on materials science and condensed matter physics. Abstracts; 2016 September 12–16; Chisinau, Moldova*. Chisinau: [s. n.]; 2016. p. 327.
11. Логвин ВА, Жолобов АА, Логвина ЕВ, авторы; Белорусско-Российский университет, правообладатель. Режущая часть инструмента. Патент Республики Беларусь 7492. 30 августа 2011 г.
12. Логвин ВА, Логвина ЕВ, авторы; Белорусско-Российский университет, правообладатель. Способ обработки изделия в вакууме. Патент Республики Беларусь 16595. 30 апреля 2012 г.
13. Логвин ВА, Логвина ЕВ, авторы; Белорусско-Российский университет, правообладатель. Способ поверхностной обработки изделия в вакууме и устройство для его осуществления. Патент Республики Беларусь 16343. 30 апреля 2012 г.
14. Горелик СС, Расторгуев ЛН, Скаков ЮА. *Рентгенографический и электронно-оптический анализ*. 2-е издание. Москва: Металлургия; 1970. 366 с.
15. Анисович АГ, Румянцева ИН. *Практика металлографического исследования материалов*. Минск: Беларуская навука; 2013. 221 с.
16. Анисович АГ, Урбан ТП, Филатова ИИ, Буйницкая АС, Гончарик СВ. Изменение ориентировок текстуры электролитического никеля при обработке холодной плазмой воздуха. *Литье и металлургия*. 2019;4:107–114. DOI: 10.21122/1683-6065-2019-4-107-114.
17. Анисович АГ, Ажаронок ВВ, Басалай АВ, Гончарик СВ, Филатова ИИ, Чубрик НИ. Структурные изменения в медных сплавах под воздействием холодной плазмы воздуха. В: Чумаков АН, Кураица ММ, Усачёнок МС, редакторы. *Физика и диагностика лабораторной и астрофизической плазмы. Труды XI Белорусско-сербского симпозиума; 15–19 декабря 2016 г.; Минск, Беларусь*. Минск: Ковчег; 2016. с. 34–38.
18. Ажаронок ВВ, Анисович АГ, Басалай АВ, Гончарик СВ, Филатова ИИ, Чубрик НИ. Трансформация структуры меди под воздействием неравновесной низкотемпературной плазмы воздуха. *Инженерно-физический журнал*. 2013;86(4):731–738.
19. Жданов ГС. *Физика твердого тела*. Москва: МГУ; 1962. 502 с.

## References

1. Prysiazhnyi V, Stupavská M, Ráhe J, Kleber C, Černák M, Rafailović LD. A comparison of chemical and atmospheric plasma assisted copper plating on carbon fiber reinforced epoxy polymer surfaces. *Surface and Coatings Technology*. 2014;258:1082–1089. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.07.026.
2. Zendeenam Arman, Ghasemi J, Zendeenam Akbar. Employing cold atmospheric plasma (Ar, He) on Ag thin film and their influences on surface morphology and anti-bacterial activity of silver films for water treatment. *International Nano Letters*. 2018;8:157–164. DOI: 10.1007/s40089-018-0240-8.

3. Vivet L, Joudrier A-L, Bouttemy M, Vigneron J, Tan KL, Morelle JM, et al. Wettability and XPS-analyses of nickel – phosphorus surfaces after plasma treatment: an efficient approach for surface qualification in mechatronic processes. *Applied Surface Science*. 2013;274:71–78. DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.02.093.
4. Dong Sh, Guo P, Chen Yue, Chen Gui-yun, Ji H, Ran Ye, et al. Surface modification via atmospheric cold plasma (ACP): improved functional properties and characterization of zein film. *Industrial Crops and Products*. 2018;115:124–133. DOI: 10.1016/j.indcrop.2018.01.080.
5. Tereshko IV, Abidzina VV, Elkin IE, Tereshko AM, Glushchenko VV, Stoye S. The formation of nanoclusters in metals by the low-energy ion irradiation. *Surface and Coatings Technology*. 2007;201(19–20):8552–8556. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2006.03.056.
6. Tereshko IV, Abidzina VV, Tereshko AM, Elkin IE. Nanostructural evolution of steel and titanium alloys exposed to glow-discharge plasma. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2007; 261(1–2):678–681. DOI: 10.1016/j.nimb.2007.04.021.
7. Anisovich AG, Azharonok VV, Gologan VF, Bobanova ZhI, Ivashku SKh, Kroitoru DM. The effect of low temperature nonequilibrium plasma on copper and chromium electrodeposited coatings. *International Journal of Research Studies in Science, Engineering and Technology*. 2016;3(2):42–49.
8. Anisovich AG, Azharonok VV, Gologan VF, Tereshko IV. Surface transformation of electrodeposited coatings under exposure to cold plasma and magnetic field. In: *7<sup>th</sup> International conference on materials science and condensed matter physics. Abstracts; 2014 September 16–19; Chisinau, Moldova*. Chisinau: [s. n.]; 2014. p. 281.
9. Barvinok VA, Rysnyi AV. Influence of low-energy plasma treatment on physical and mechanical properties and structure of aluminum and its alloys. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya fiziko-matematicheskikh nauk*. 2009;2(19):193–199. Russian. DOI: 10.14498/vsgtu715.
10. Anisovich AG, Azharonok VV, Filatova II. Lattice strain as a factor of structure formation. In: *8<sup>th</sup> International conference on materials science and condensed matter physics. Abstracts; 2016 September 12–16; Chisinau, Moldova*. Chisinau: [s. n.]; 2016. p. 327.
11. Logvin VA, Zholobov AA, Logvina EV, inventors; Belarusian-Russian University, assignee. *Rezhushchaya chast' instrumenta* [Tool cutting edge]. Belarusian patent 7492. 2011 August 30. Russian.
12. Logvin VA, Logvina EV, inventors; Belarusian-Russian University, assignee. *Sposob obrabotki izdeliya v vakuume* [Method of processing a product in a vacuum]. Belarusian patent 16595. 2012 April 30. Russian.
13. Logvin VA, Logvina EV, inventors; Belarusian-Russian University, assignee. *Sposob poverkhnostnoi obrabotki izdeliya v vakuume i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method of surface treatment of a product in vacuum and a device for its implementation]. Belarusian patent 16343. 2012 April 30. Russian.
14. Gorelik SS, Rastorguev LN, Skakov YuA. *Rentgenograficheskii i elektronno-opticheskii analiz* [X-ray and electron-optical analysis]. 2<sup>nd</sup> edition. Moscow: Metallurgiya; 1970. 366 p. Russian.
15. Anisovich AG, Rummyantseva IN. *Praktika metallograficheskogo issledovaniya materialov* [The practice of metallographic research of materials]. Minsk: Belaruskaja navuka; 2013. 221 p. Russian.
16. Anisovich AG, Urban TP, Filatova II, Buynitskaya AS, Goncharik SV. Change in the texture orientation of electrolytic nickel by cold air plasma. *Foundry Production and Metallurgy*. 2019;4:107–114. Russian. DOI: 10.21122/1683-6065-2019-4-107-114.
17. Anisovich AG, Azharonok VV, Basalay AV, Goncharik SV, Filatova II, Chubrik NI. Structural change in copper alloys caused by air cold plasma treatment. In: Chumakov AN, Kuraica MM, Usachonak MS, editors. *Physics and diagnostics of laboratory and astrophysical plasmas. The 11<sup>th</sup> Belarusian-Serbian symposium; 2016 December 15–19; Minsk, Belarus*. Minsk: Kovcheg; 2016. p. 34–38. Russian.
18. Azharonok VV, Anisovich AG, Basalay AV, Goncharik SV, Filatova II, Chubrik NI. Transformation of copper structure on exposure to a nonequilibrium low-temperature air plasma. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2013;86(4):731–738. Russian.
19. Zhdanov GS. *Fizika tverdogo tela* [Solid state physics]. Moscow: Moscow State University; 1962. 502 p. Russian.

Статья поступила в редколлегию 05.10.2020.  
Received by editorial board 05.10.2020.