

Изменение текстуры деформированной меди при воздействии холодной плазмы воздуха

Докт. физ.-мат. наук, проф. А. Г. Анисович¹⁾, канд. физ.-мат. наук, доц. И. И. Филатова²⁾

¹⁾Государственное научное учреждение «Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси» (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Государственное научное учреждение «Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси» (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Исследованы изменения микроструктуры и текстуры образцов меди М1 после пластической деформации прокаткой и воздействия низкотемпературной неравновесной плазмы высокочастотного емкостного разряда, возбуждаемого на частоте $f = 5,28$ МГц в воздухе при низком давлении ($p \sim 1$ Торр). Методом металлографического анализа показано, что изменения микроструктуры незначительны. Размер зерна не изменяется; улучшается визуализация структуры, повышается четкость выявления границ зерен после металлографического травления. Результаты рентгеноструктурного анализа свидетельствуют о том, что воздействие плазмы приводит к изменению относительной интенсивности интерференционных линий рентгенограммы. После деформации преобладающей является ориентировка (011), что характерно для текстуры прокатки меди. Воздействие плазмы в течение 5 мин приводит к повышению интенсивности линий (200), (220) и (311). При обработке в течение 10 мин относительная интенсивность линий также незначительно возрастает. Параметр кристаллической решетки после воздействия плазмы не изменяется. Установлено, что изменение интенсивности линий рентгенограммы не связано с действием микронапряжений, изменением размеров блоков когерентного рассеяния. Значение отношения $\sin\theta_{(200)}/\sin\theta_{(111)} = 1,15$ свидетельствует о том, что дефекты упаковки в процессе воздействия не образуются. Рентгеновские эффекты при воздействии плазмы аналогичны наблюдаемым при отпуске деформированных металлов, когда основные ориентировки текстуры деформации или сохраняются на уровне деформированного металла, или усиливаются. При воздействии плазмы реализуется начальный процесс релаксации напряжений, связанный с перемещением атомов на расстояния, меньшие межатомных, когда кристаллическая решетка совершенствуется. Основной причиной изменений являются напряжения 3-го рода, обусловленные смещениями атомов из положений равновесия.

Ключевые слова: пластическая деформация, плазменная обработка, микроструктура, текстура, возврат, напряжения, статические смещения атомов

Для цитирования: Анисович, А. Г. Изменение текстуры деформированной меди при воздействии холодной плазмы воздуха / А. Г. Анисович, И. И. Филатова // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 4. С. 270–277. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-4-270-277>

Change in Texture of Deformed Copper Exposed to Cold Air Plasma

A. G. Anisovich¹⁾, I. I. Filatova²⁾

¹⁾State Scientific Institution “Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus” (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾State Scientific Institution “B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The changes in the microstructure and texture of M1 copper samples after plastic deformation by rolling and exposure to low temperature non-equilibrium plasma of a high-frequency capacitive discharge excited at a frequency of $f = 5.28$ MHz

Адрес для переписки

Анисович Анна Геннадиевна
Государственное научное учреждение
«Институт прикладной физики
Национальной академии наук Беларуси»
ул. Академическая, 16,
220072, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 29 664-65-56
anna-anisovich@yandex.ru

Address for correspondence

Anisovich Anna G.
State Scientific Institution
“Institute of Applied Physics of the
National Academy of Sciences of Belarus”
16, Academic str.,
220072, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 29 664-65-56
anna-anisovich@yandex.ru

in air at low pressure ($p \sim 1$ Torr) have been studied in the paper. The metallographic analysis showed that changes in the microstructure of samples are insignificant. The grain size does not change; the visualization of the structure is improved, and the clarity of detection of grain boundaries is increased after metallographic etching. The results of X-ray structural analysis showed that the effect of plasma treatment leads to a change in the relative intensity of the interference lines of the X-ray diffraction pattern. After deformation, the prevailing orientation is (011), which is typical for the texture of copper rolling. After exposure to plasma for 5 minutes, the intensity of lines (200), (220) and (311) increases. A slight increase in the relative intensity of the lines is observed after plasma treatment for 10 minutes. The parameter of the crystal lattice does not change after exposure to plasma. It was found that the change in the intensity of the X-ray lines is not associated with the action of microstresses or a change in the size of coherent scattering blocks. The ratio $\sin\theta_{(200)}/\sin\theta_{(111)} = 1.15$ indicates that stacking faults are not formed during plasma treatment. X-ray effects under plasma exposure are similar to those observed during tempering of deformed metals, when the main orientations of the deformation texture are either maintained at the level of the deformed metal or are enhanced. Under plasma exposure, the initial process of stress relaxation is realized, associated with the movement of atoms over distances smaller than interatomic distances, when the crystal lattice is improved. The main reason of the changes is third-order stresses, caused by the displacement of atoms from their equilibrium positions.

Key words: plastic deformation, plasma treatment, microstructure, texture, recovery, stress, static displacements of atoms

For citation: Anisovich A. G., Filatova I. I. (2025) Change in Texture of Deformed Copper Exposed to Cold Air Plasma. *Science and Technique*. 24 (4), 270–277. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-4-270-277>

Введение

Одним из быстроразвивающихся направлений в технике является использование высокоэнергетических воздействий для улучшения свойств различных материалов. Значительное место в этом ряду занимают технологии на основе холодной плазмы с газокINETической температурой до 350 К, активно применяемые во многих отраслях, включая биотехнологию, биомедицину, текстильную и пищевую промышленность [1–3]. Плазменная обработка позволяет осуществлять нетермическую модификацию свойств материалов, является экологически чистой и экономически выгодной технологией, что важно для устойчивого развития экономики [1].

Исследования влияния холодной плазмы на структуру и свойства поверхностей и покрытий представлены в ряде работ [4–6]. Многие исследования доведены до промышленных технологий и используются, в частности, в обработке металлов для упрочнения рабочих поверхностей деталей и нанесения тонких покрытий различного функционального назначения [7]. В [8] показана высокая эффективность влияния плазменного воздействия на изменение морфологии поверхности гальванических покрытий, в результате чего износ снижается в 1,5–2 раза. Плазменные методы применяются для формирования защитных покрытий, упрочнения изделий в машиностроении. В качестве плазмообразующего газа, как правило, используют аргон, гелий, азот или воз-

дух. Обработка плазмой изменяет свойства поверхности, во многом определяющие качество изделий триботехнического назначения [9]. Показана принципиальная возможность управления структурой и напряженным состоянием покрытий, обработанных воздушной плазмой [10]. Выполнен анализ оптимальных режимов упрочняющей обработки для повышения эксплуатационных характеристик инструментов из быстрорежущих сталей, модифицированных потоком низкоэнергетической плазмы [11]. Выявлены изменения характеристик поверхностного слоя упрочненных инструментов и установлена зависимость величины микротвердости от режимов обработки.

Исследована трансформация структуры в плазме тлеющего разряда (He) и изменение пластичности сплавов на основе алюминия [12]. Причиной повышения пластичности сплавов алюминий–магний является повышение однородности структуры после воздействия плазмы. После термической обработки сплава, предварительно обработанного плазмой, в алюминиевых сплавах реализуется распад твердого раствора и изменение пористости.

Авторы [13] рассматривают плазменную обработку при низком давлении (300 Па, газ H_2 при 500 °С, длительность обработки 5 ч) как метод, позволяющий сформировать полностью плотный объемный диоксид циркония ZrO_{2-x} без значительных структурных модификаций. При этом с использованием спектроскопии диффузного отражения (DRS) обнаружено су-

щественное увеличение поглощения света: среднее увеличение абсолютного поглощения составляет 66,2 % и >65 % по всему спектру (200–3000 нм). Это свидетельствует о возможности использования плазменных методов в процессах создания экологически чистого производства материалов ZrO_{2-x} следующего поколения. В [14] предложена новая методология структурирования состава и микроструктуры диэлектрических тонкопленочных материалов с использованием Ag плазмы. В качестве основного механизма, ответственного за появление доменов с различной морфологией и химическим составом, рассматривается фокусированное попадание ионов Ag^+ плазмы на определенные участки подложки. Результаты, полученные в последнее время, дают основания утверждать, что использование высокоэнергетических физических воздействий на неметаллические материалы, в частности полимерные композиты, может являться эффективным методом управления их свойствами [15].

Несмотря на то что уже накоплен значительный опыт исследований в области применения холодной воздушной плазмы для изменения свойств металлов и сплавов, имеются проблемы в интерпретации полученных результатов, так как наблюдаемые микроструктурные эффекты воздействия незначительны или находятся на грани чувствительности метода. Есть основание полагать, что изменения свойств материалов, вызванные воздействием холодной плазмы, связаны с процессами, происходящими на уровне кристаллической решетки обрабатываемых образцов.

Целью данной работы является исследование влияния холодной воздушной плазмы на изменение текстуры деформированной меди.

Материалы и методики эксперимента

В качестве образцов для исследований выбрана медь марки М1, являющаяся наиболее распространенным электротехническим материалом. Трансформация текстуры меди с использованием различных методов обработки изучена достаточно подробно, что повышает достоверность интерпретации полученных результатов.

Пластическую деформацию меди осуществляли холодной прокаткой со степенью обжатия 75 %. Затем деформированные образцы меди обрабатывали низкотемпературной неравновесной плазмой высокочастотного емкостного разряда 5 и 10 мин. Подробная схема экспериментальной установки представлена в [10].

Металлографический анализ проводился на инвертированном металлографическом микроскопе МИ-1. Шлифы для металлографических исследований изготавливали по общепринятой методике. Травление на микроструктуру осуществлялось реактивом состава: $FeCl_3$ – 20 г, HCl – 6 мл, C_2H_5OH – 100 мл. Фотографирование и количественную обработку микроструктур осуществляли в программе обработки изображения IMAGE SP. Для характеристики размера зерна использовали эквивалентный диаметр (диаметр круга, площадь которого равна площади зерна).

Рентгеноструктурные исследования проведены в излучении CuK_{α} на дифрактометре ДРОН-3, оснащенный аппаратно-программным комплексом для управления дифрактометром и обработки результатов измерений. Фазовый анализ производился по общепринятой методике. Текстурированный анализ проведен методом обратных полюсных фигур по методу Морриса [16]

$$P_{hkl} = \frac{I_{hkl}/I'_{hkl}}{\sum_{\Delta} A_{hkl}(I_{hkl}/I'_{hkl})}, \quad (1)$$

где P_{hkl} – полюсная плотность; I_{hkl} и I'_{hkl} – интенсивности интерференционных линий текстурованного образца и эталона соответственно; A_{hkl} – фракция кристаллитов в бестекстурном образце, рассеивающая рентгеновские лучи от плоскости (hkl). Величины A_{hkl} для ГЦК-решетки даны в [16].

Определяли полюсную плотность при съемке с плоскости прокатки ($P_{||}$) и с плоскости, перпендикулярной плоскости прокатки ($P_{\perp}$).

Результаты и их обсуждение

Структура меди после деформации, представленная на рис. 1, характерна для пластической деформации прокаткой. Зерна вытянуты в направлении деформации, при травлении границы зерен выявляются не полностью (рис. 1а).

После воздействия плазмы структурные эффекты аналогичны наблюдавшимся в [17]. Размер зерна существенно не изменяется (рис. 1b; 2). Наблюдаются несколько лучшая травимость структуры и соответственно лучшая четкость границ зерен, что может считаться признаком стабилизации структуры.

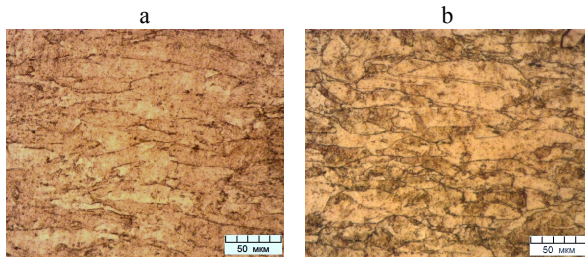


Рис. 1. Структура меди: а – после деформации прокаткой; б – после воздействия плазмы 5 мин

Fig. 1. Copper structure: а – after deformation by rolling; б – after exposure to plasma for 5 min

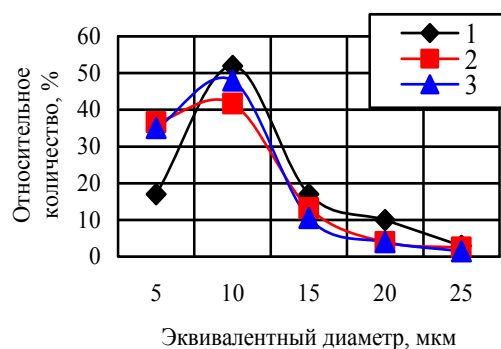


Рис. 2. Распределение зерен по размерам: 1 – после деформации; 2, 3 – после воздействия плазмы в течение 5 и 10 мин соответственно

Fig. 2. Distribution of grain sizes: 1 – after deformation; 2, 3 – after exposure to plasma for 5 min and 10 min, respectively

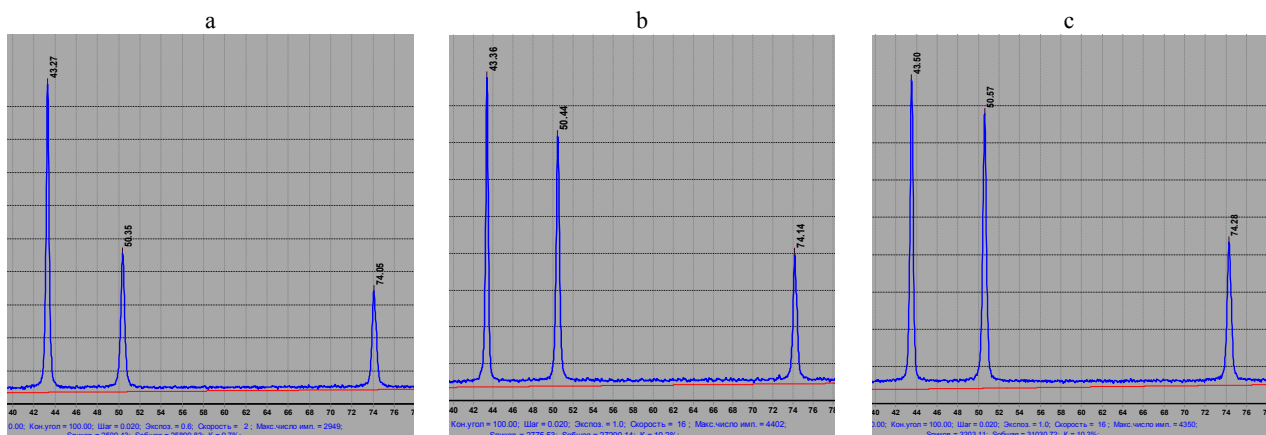


Рис. 3. Фрагменты рентгенограмм меди: а – после деформации; б, с – после 5 и 10 мин воздействия плазмы соответственно

Fig. 3. Fragments of X-ray diffraction patterns of copper: а – after deformation; б, с – after 5 and 10 plasma exposure, respectively

На рентгенограмме деформированной меди присутствуют 5 основных интерференционных линий (рис. 3а, табл. 1). Из анализа изменения относительной интенсивности линий видно, что преобладающей является ориентировка $\langle 011 \rangle$, что характерно для текстуры прокатки меди [18]. После воздействия плазмы в течение 5 мин наблюдается изменение относительной интенсивности интерференционных линий (табл. 1, рис. 3б). Интенсивность линий (200), (220) и (311) повышается. После обработки плазмой в течение 10 мин наблюдается незначительное изменение относительной интенсивности в сторону повышения (рис. 3с). Параметр кристаллической решетки после воздействия плазмы не изменяется.

Изменение интенсивности интерференционных линий рентгенограмм металлических материалов связано с изменением уровня микронапряжений и размеров блоков когерентного рассеяния, образованием дефектов упаковки и изменением текстуры. В отсутствие дефектов упаковки для ГЦК-решетки выполняется соотношение, не зависящее от изменения периодов кристаллической решетки [19]:

$$\frac{\sin \theta_{(200)}}{\sin \theta_{(111)}} = \frac{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}_{(200)}}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}_{(111)}} = 1,155. \quad (3)$$

Для образцов, обработанных плазмой, соотношение (3) не изменяется (табл. 2), что свидетельствует об отсутствии образования дефектов упаковки в процессе воздействия плазмы.

Таблица 1

Расшифровка рентгенограммы деформированной меди (рис. 3)

Decoding the radiograph of deformed copper (Fig. 3)

№ п/п	Табличные данные		Деформация			Плазма, 5 мин	Плазма, 10 мин
	<i>hkl</i>	<i>I</i> , %	2θ , град.	<i>d</i> , Å	<i>I</i> , %	<i>I</i> , %	<i>I</i> , %
1	111	100	43,27	2,089	100	100	100
2	200	46	50,35	1,811	46	82	88
3	220	20	74,05	1,279	34	41	46
4	311	17	89,80	1,091	19	23	25
5	222	5	95,16	1,043	4	3	4

Таблица 2

Углы дифракции и оценка вероятности образования дефектов упаковки

Diffraction angles and assessment of the probability of formation of packing defects

№ п/п	Вид обработки	Угол дифракции 2θ , град.		$\frac{\sin\theta_{(200)}}{\sin\theta_{(111)}}$
		(111)	(200)	
1	Деформация	43,27	50,35	1,151
2	Плазма, 5 мин	43,36	50,44	1,154
3	Плазма, 10 мин	43,50	50,57	1,151

Ранее было показано, что изменение интенсивности линий рентгенограммы не связано с действием микронапряжений, изменением размеров блоков когерентного рассеяния при воздействии холодной плазмы тлеющего разряда (аргон) [8]. Изменение интенсивности линий на рентгенограммах следует связывать с трансформацией текстуры деформации [20]. При воздействии плазмы характер текстуры сохраняется. Основным эффектом воздействия плазмы (табл. 3) является усиление полюсной плотности ориентировки $\langle 111 \rangle$ при некотором снижении полюсной плотности ориентировки $\langle 110 \rangle$ для $P_{\perp}$; усиление полюсной плотности ориентировки $\langle 200 \rangle$ и $\langle 220 \rangle$ для $P_{\parallel}$.

Изменение ориентировок текстуры деформации можно объяснить следующим образом. В [21] были развиты представления о том, что

в основе трансформации структуры металлов и сплавов при внешних воздействиях любой природы лежат «тепловой» и «деформационный» эффекты. Деформационный эффект ответственен за накопление дефектов кристаллического строения и повышение уровня напряжений, тепловой – обеспечивает развитие релаксационных процессов. Примером теплового эффекта, помимо собственно термической обработки, может служить тепловой эффект пластической деформации – динамический возврат. Вклад теплового или деформационного эффектов различен для разных воздействий. Соотношение тепловой и деформационной компонент в конечном итоге определяет вид сформировавшейся структуры.

Наклепанный металл термодинамически неустойчив при любой температуре [22]; его переход в более устойчивое состояние требует определенной энергии активации, которая передается металлу. При нагреве деформированных металлов и сплавов в процессе возврата искажения кристаллической решетки частично снимаются вследствие процессов релаксации [21]. Изменений структуры металла в процессе возврата на микроскопическом уровне еще не наблюдается, но изменения могут быть зафиксированы рентгенографически. Основным наблюдаемым эффектом при этом является усиление ориентировок текстуры деформации [23, 24]. На рентгенограммах также наблюдается сужение интерференционных линий, усиление их интенсивности и понижение фона, что является признаком снижения статических искажений кристаллической решетки. На этой стадии кристаллиты принимают исходную недеформированную форму за счет снятия упругих изгибов кристаллической решетки. Статические искажения связаны с отклонением атомов из положений равновесия, определяемых узлами кристаллической решетки, и возникают при наличии дефектов – дислокаций, внедренных атомов и вакансий.

Таблица 3

Полюсная плотность ориентировок текстуры

Pole density of texture orientations

Ориентировка <i>hkl</i>	Деформация		Плазма, обработка 5 мин		Плазма, обработка 10 мин	
	$P_{\parallel}$	$P_{\perp}$	$P_{\parallel}$	$P_{\perp}$	$P_{\parallel}$	$P_{\perp}$
$\langle 111 \rangle$	9,3	12,6	7,1	16,1	6,8	17,8
$\langle 200 \rangle$	6,7	6,1	8,2	6,2	8,6	6,3
$\langle 220 \rangle$	5,0	5,5	6,1	4,1	6,1	2,8
$\langle 311 \rangle$	6,7	5,1	5,2	4,5	5,0	4,9
$\langle 222 \rangle$	4,2	4,2	0	0	0	0

В исследуемом случае плазма воздуха может являться источником энергии, за счет которой реализуются изменения в текстуре деформации меди. При воздействии «теплового эффекта» плазмы реализуется начальный процесс релаксации напряжений, связанный с перемещением атомов на расстояния, меньшие межатомных, когда кристаллическая решетка металла совершенствуется. Это, предположительно, соответствует I стадии возврата при отжиге [23, 25], учитывая, что непосредственный нагрев в процессе обработки плазмой отсутствует [10]. В [23] рассматривались изменения в меди и латуни, вызываемые воздействием холодной плазмы, на различных структурных уровнях. Было показано, что холодная плазма не вызывает существенных изменений микро-, а также субструктуры (дислокационной структуры). Движущей силой процесса изменения интенсивности линий рентгенограммы под воздействием плазмы может быть смещение атомов из положений равновесия (или статических искажений кристаллической решетки), обуславливающих действие напряжений 3-го рода.

В настоящее время вопрос о напряжениях 3-го рода рассматривается, преимущественно, применительно к формированию твердых растворов, влиянию примесей на структуру и свойства материалов, а также фазовых превращений [26, 27]. Представления об атомных смещениях используются для описания механизмов мартенситного превращения [28, 29]. Статические атомные смещения связываются с наличием возбужденных состояний в сплавах; расчетным путем установлены наличие и величина атомных смещений, и обсуждается их возможное влияние на свойства сплавов. По величине статические смещения атомов в катодном никеле, вызванные воздействием плазмы, составляют порядка $0,03...0,09 \text{ \AA}$ [30], что по порядку величины согласуется с результатами, полученными для твердых растворов ($0,04 \text{ \AA}$) [31]. В [18] для отожженной меди, обработанной плазмой воздуха, были получены значения $\sim 0,075 \text{ \AA}$.

ВЫВОДЫ

1. Исследовано влияние холодной воздушной плазмы на трансформацию микроструктуры и текстуры меди, деформированной холодной прокаткой на 75 %. Установлено, что изменений микроструктуры не наблюдается. После обработки несколько улучшается визуа-

лизация границ зерен, что может считаться признаком стабилизации структуры.

2. Показано, что эффект воздействия плазмы проявляется, преимущественно, в усилении ориентировок текстуры деформации. При этом исключается формирование дефектов упаковки и измельчение областей когерентного рассеяния.

3. Наблюдаемый эффект следует связывать с развитием процессов, аналогичных возврату в деформированных металлах при их отжиге. Ответственными механизмами при этом являются напряжения 3-го рода, возникающие за счет изменения статических смещений атомов из положений равновесия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Review of the Cold Atmospheric Plasma Technology Application in Food, Disinfection, and Textiles: A Way Forward for Achieving Circular Economy / R. R. Reema [et al.] // *Frontiers in Physics*. 2022. Vol. 10. <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.942952>.
2. Cold Atmospheric Plasma: A Powerful Tool for Modern Medicine / D. Braný [et al.] // *International Journal of Molecular Sciences*. 2020. Vol. 21, No 8. P. 2932. <https://doi.org/10.3390/ijms21082932>.
3. Влияние режимов воздействия плазмы высокочастотного емкостного разряда на стимуляцию всхожести и фитосанитарное состояние семян / И. И. Филатова, В. В. Ажаронко, С. В. Гончарик [и др.] // *Журнал прикладной спектроскопии*. 2014. Т. 81, № 2. С. 256–262.
4. Zendeenam, A. 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 / A. Zendeenam, J. Ghasemi, A. Zendeenam // *International Nano Letters*. 2018. No 8. P. 157–164. <https://doi.org/10.1007/s40089-018-0240-8>.
5. Amini, A. Changes of the TiO_2 thin Film Electro-Optical Properties in the Ar and N_2 Glow Discharge Plasma due to Effects of the Electric Field in Plasma's Sheath / A. Amini, M. S. Zakerhamidi, S. Khorram // *Physica B: Condensed Matter*. 2021. Vol. 612. P. 41282. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2021.412820>.
6. Surface Modification of ZnMgAl-Coated Steel by Dielectric-Barrier Discharge Plasma / S. Knust, [et al.] // *RSC Advances*. 2019. Vol. 9, No 60. P. 35077–35088. <https://doi.org/10.1039/c9ra07378g>.
7. The Effect of Low Temperature Nonequilibrium Air Plasma on the Structure and Properties of Copper and Chromium Electrodeposited Coatings / A. G. Anisovich, [et al.] // *International Journal of Research Studies in Science, Engineering and Technology*. 2016. No 2. P. 42–49.
8. Трансформация структуры гальванического покрытия меди после воздействия плазмы тлеющего разряда / А. Г. Анисович [и др.] // *Электронная обработка материалов*. 2019. Т. 55. № 5. С. 31–37. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3522287>.
9. Григорьев, А. Я. Физика и микрогеометрия технических поверхностей / А. Я. Григорьев. Минск: Беларуская навука, 2016. 247 с.

10. Изменение структуры поверхности гальванических покрытий при воздействии холодной плазмы воздуха / А. Г. Анисович [и др.] // *Литье и металлургия*. 2019. № 2. С. 85–91. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-2-85-91>.
11. Липский, А. Э. Оптимальные режимы упрочняющей обработки рабочих поверхностей инструментов из быстрорежущих сталей на основе способа их модифицирования потоком низкоэнергетической плазмы / А. Э. Липский // *Вестник Белорусско-Российского университета*. 2007. № 4. С. 64–71.
12. Барвинок, В. А. Влияние низкоэнергетической плазменной обработки на физико-механические свойства и структуру алюминия и его сплавов / В. А. Барвинок, А. В. Рясный // *Вестник Самарского государственного технического университета*. Сер. Физико-математические науки. 2009. Т. 19, № 2. С. 193–199.
13. Plasma defect – engineering of bulk oxygen – deficient zirconia / B. Dashbozorg [et al.] // *Acta Materialia*. 2024. Vol. 262. P. 119457. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2023.119457>.
14. Plasmas and Acoustic Waves to Pattern the Nanostructure and Chemistry of thin Films / V. Rico [et al.] // *Acta Materialia*. 2023. Vol. 255. Art. 119058. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2023.119058>.
15. Bukharov, S. N. Tribotechnical Characteristics of Friction Polymer Composites / S. N. Bukharov, A. G. Anisovich, I. I. Filatova // *Journal of Friction and Wear*. 2021. Vol. 42, No 3. P. 139–145. <https://doi.org/10.3103/s106836662103003x>.
16. Лайнер, Д. И. Способ построения нормированных обратных полюсных фигур / Д. И. Лайнер, А. И. Радишевский, И. А. Комарова // *Кристаллография*. 1974. Т. 19, № 5. С. 942–945.
17. Трансформация структуры меди под воздействием неравновесной низкотемпературной плазмы воздуха / В. В. Ажаронков [и др.] // *Инженерно-физический журнал*. 2013. Т. 86, № 4. С. 731–738.
18. Вассерман, Г. Текстуры металлических материалов / Г. Вассерман, И. Гревен. М.: Металлургия, 1969. 654 с.
19. Русаков, А. А. Рентгенография металлов / А. А. Русаков. М.: Атомиздат, 1977. 480 с.
20. Изменение ориентировок текстуры электролитического никеля при обработке холодной плазмой воздуха / А. Г. Анисович [и др.] // *Литье и металлургия*. 2019. № 4. С. 107–114. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-4-107-114>.
21. Анисович, А. Г. Закономерности процессов структурообразования и термодинамический аспект организации структуры металлов при нестационарных энергетических воздействиях: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.07; 01.04.14 / Анисович А. Г. Минск, 2005.
22. Ван Бюрен, К. Х. Дефекты в кристаллах / К. Х. Ван Бюрен. М.: Изд-во иностранной лит., 1962. 610 с.
23. Тофпенек, Р. Л. Разупрочняющие процессы в стареющих сплавах / Р. Л. Тофпенек. Минск: Наука и техника, 1979. 183 с.
24. Анисович, А. Г. Особенности релаксационного процесса в металлах при импульсных воздействиях / А. Г. Анисович // *Вестн. НАН Беларуси*. Сер. физ.-техн. наук. 2015. № 1. С. 16–21.
25. Анисович, А. Г. Изменение напряженного состояния медных сплавов под воздействием холодной плазмы воздуха / А. Г. Анисович, И. И. Филатова, С. В. Гончарик // *Инженерно-физический журнал*. 2020. Т. 93, № 6. С. 1637–1644.
26. Жернов, А. П. Влияние композиции изотопов на фоновые моды. Статические атомные смещения в кристаллах / А. П. Жернов, А. В. Инюшкин // *Успехи физических наук*. 2001. Т. 171, № 8. С. 827–854. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0171.200108b.0827>.
27. Peng, F. Modulated Fluctuation of atomic Displacement in a Crystal with a Single Impurity / F. Peng // *Physica B: Condensed Matter*. 2006. Vol. 373, No 2. P. 194–197. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2005.11.166>.
28. Cayron, C. Continuous Atomic Displacements and Lattice Distortion During fcc–bcc Martensitic Transformation / C. Cayron // *Acta Materialia*. 2015. Vol. 96. P. 189–202. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.06.010>.
29. Михайлов, Ю. Н. Длинноволновые статические смещения атомов в сплавах γ – FeNi / Ю. Н. Михайлов, С. Ф. Дубинин // *Физика твердого тела*. 2004. Т. 46, вып. 12. С. 2113–2118.
30. Анисович, А. Г. Изменение напряженного состояния электролитического никеля при воздействии плазмы / А. Г. Анисович // *Журнал Белорусского государственного университета*. Физика. 2021. № 1. С. 82–89. <https://doi.org/10.33581/2520-2243-2021-1-82-89>.
31. Хадиров, И. Г. Температура Дебая и статические смещения атомов в нестехиометрическом карбиде титана $\text{TiC}_{0.70}$ / И. Г. Хадиров, А. С. Парпиев // *Альтернативная энергетика и экология*. 2010. Т. 85, № 5. С. 31–34.

Поступила 10.04.2025

Подписана к печати 23.06.2025

Опубликована онлайн 31.07.2025

REFERENCES

1. Reema, Khanikar R. R., Bailung H., Sankaranarayanan K. (2022) Review of the Cold Atmospheric Plasma Technology Application in Food, Disinfection, and Textiles: A Way Forward for Achieving Circular Economy. *Frontiers in Physics*, 10. <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.942952>.
2. Braný D., Dvorská D., Halašová E., Škovierová H. (2020) Cold Atmospheric Plasma: A Powerful Tool for Modern Medicine. *International Journal of Molecular Sciences*, 21 (8), 2932. <https://doi.org/10.3390/ijms21082932>.
3. Filatova I. I., Azharonok V. V., Goncharik S. V., Lushkevich V. A., Zhukovsky A. G., Gadzhieva G. I. (2014) Effect of RF Plasma Treatment on the Germination and Phytosanitary State of Seeds. *Journal of Applied Spectroscopy*, 81 (2), 250–256. <https://doi.org/10.1007/s10812-014-9918-5>.
4. Zendehtnam A., Ghasemi J., Zendehtnam A. (2018) 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*, 8 (3), 157–164. <https://doi.org/10.1007/s40089-018-0240-8>.
5. Amini A., Zakerhamidi M. S., Khorram S. (2021) Changes of the TiO_2 thin Film Electro-Optical Properties in the Ar and N_2 Glow Discharge Plasma due to Effects of the Electric Field in Plasma's Sheath. *Physica B: Condensed Matter*, 612, 412820. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2021.412820>.
6. Knust S., Kuhlmann A., Arcos T. de los, Grundmeier G. (2019) Surface Modification of ZnMgAl-Coated Steel by Dielectric-Barrier Discharge Plasma. *RSC Advances*, 9 (60), 35077–35088. <https://doi.org/10.1039/c9ra07378g>.

7. Anisovich A. G., Azharonok V. V., Gologan V. F., Bobanova Zh. I. (2016) The Effect of Low Temperature Nonequilibrium Air Plasma on the Structure and Properties of Copper and Chromium Electrodeposited Coatings. *International Journal of Research Studies in Science, Engineering and Technology*, (2), 42–49.
8. Anisovich A. G., Urban T. P., Tereshko I. V., Logvin V. A., Gologan V. F., Bobanova Zh. I. (2019) Transformation of the Structure of the Galvanic Coating of Copper after Exposure to Glow Discharge Plasma. *Elektronnaya Obrabotka Materialov = Electronic Processing of Materials*, 55 (5), 31–37 (in Russian).
9. Grigoriev A. Ya. (2016) *Physics and Microgeometry of Technical Surfaces*. Minsk, Belarusskaya Navuka Publ. 247 (in Russian).
10. Anisovich A. G., Filatova I. I., Goncharik S. V., Gologan V. F., Bobanova Zh. I. (2019) Change of the Structure of the Surface of Galvanic Coatings under Exposure to Cold Air Plasma. *Litiya i Metallurgiya = Foundry Production and Metallurgy*, (2), 85–91 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-2-85-91>.
11. Lipsky A. E. (2007) Optimal Modes of Hardening Treatment of Working Surfaces of Tools Made of High-Speed Steels Based on the Method of their Modification by a Low-Energy Plasma Flow. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo Universiteta = Belarusian-Russian University Bulletin*, (4), 64–71.
12. Barvinok V. A., Rysany A. V. (2009) The Influence of Low-Energy Plasma Treatment on the Physical and Mechanical Properties and Structure of Aluminum and Its Alloys. *Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Fiziko-Matematicheskie Nauki = Journal of Samara State Technical University, Ser. Physical and Mathematical Sciences*, 19 (2), 193–199 (in Russian).
13. Dashtbozorg B., Shi F., Tagliaferro A., Abela S., Falticeanu L., Dong H. (2024) Plasma Defect-Engineering of Bulk Oxygen-Deficient Zirconia. *Acta Materialia*, 262, 119457. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2023.119457>.
14. Rico V., Regodón G. F., García-Valenzuela A., Alcaide A. M., Oliva-Ramírez M., Rojas T. C., Álvarez R., Palomares F. J., Palmero A., González-Elise A. R. (2023) Plasmas and Acoustic Waves to Pattern the Nanostructure and Chemistry of thin Films. *Acta Materialia*, 255, 119058. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2023.119058>.
15. Bukharov S. N., Anisovich A. G., Filatova I. I., Akhmetov T. A., Sergienko V. P., Grigoriev A. Ya. (2021). Influence of Treatment with Non-Equilibrium Low-Temperature Plasma on Dynamic Mechanical and Tribotechnical Characteristics of Friction Polymer Composites. *Journal of Friction and Wear*, 42 (3), 139–145. <https://doi.org/10.3103/s106836662103003x>.
16. Layner D. I., Radishevsky A. I., Komarova I. A. (1974) Method for Constructing Normalized Inverse Pole Figures. *Kristallografiya = Soviet Physics. Crystallography*, 19 (5), 942–945 (in Russian).
17. Azharonok V. V., Anisovich A. G., Basalai A. V., Goncharik S. V., Filatova I. I., Chubrik N. I. (2013). Transformation of Copper Structure on Exposure to a Nonequilibrium Low-Temperature Air Plasma. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 86 (4), 781–788. <https://doi.org/10.1007/s10891-013-0895-y>.
18. Wassermann G., Grewen I. (1969) *Textures of Metal Materials*. Moscow, Metallurgiya Publ. 654 (in Russian).
19. Rusakov, A.A. X-ray diffraction of metals. M.: Atomizdat, 1977. 480 (in Russian).
20. Anisovich A. G., Urban T. P., Filatova I. I., Buynitskaya A. S., Goncharik S. V. (2020) Changer in the Texture Orientation of Electrolytic Nickel by Cold Air Plasma. *Litiya i Metallurgiya = Foundry Production and Metallurgy*, (4), 107–114. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-4-107-114> (in Russian).
21. Anisovich A. G. (2005) *Regularities of Structure Formation Processes and Thermodynamic Aspect of Metal Structure Organization under Non-Stationary Energy Effects* [Dissertation]. Minsk (in Russian).
22. Van Bueren H. G. (1960) *Imperfections in Crystals*. Amsterdam, North-Holland publ.
23. Tofpenets R. L. (1979) *Weakening Processes in Aging Alloys*. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ. 183 (in Russian).
24. Anisovich A. G. (2015) Particularities of Relaxation Process in Metals Subjected to Pulses. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, (1), 16–21 (in Russian).
25. Anisovich A. G., Filatova I. I., Goncharik S. V. (2020) Variation in the Stress State of Copper Alloys Under the Action of Cold Air Plasma. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 93 (6), 1583–1590. <https://doi.org/10.1007/s10891-020-02263-9>.
26. Zhernov A. P., Inyushkin A. V. (2001) Effect of Isotopic Composition on Phonon Modes. Static Atomic Displacements in Crystals. *Physics-Uspekhi*, 44 (8), 785–811. <https://doi.org/10.1070/pu2001v044n08abeh000965>.
27. Peng F. (2006) Modulated Fluctuation of Atomic Displacement in a Crystal with a Single Impurity. *Physica B: Condensed Matter*, 373 (2), 194–197. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2005.11.166>.
28. Cayron C. (2015) Continuous Atomic Displacements and Lattice Distortion During fcc–bcc Martensitic Transformation. *Acta Materialia*, 96, 189–202. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.06.010>.
29. Mikhailov Yu. N., Dubinin S. F. (2004) Long-Wavelength Static Atomic Displacements in γ -FeNi Alloys. *Physics of the Solid State*, 46 (12), 2185–2190. <https://doi.org/10.1134/1.1841377>.
30. Anisovich A. G. (2021) Change of Tension State of Electrolytic Nickel Under Exposure to Plasma. *Journal of the Belarusian State University. Physics*, (1), 82–89. <https://doi.org/10.33581/2520-2243-2021-1-82-89> (in Russian).
31. Khadirov I. G., Parpiev A. S. (2010) Debye Temperature and Static Displacements of Atoms in Non-Stoichiometric Titanium Carbide $\text{TiC}_{0.70}$. *Alternativnaya Energetika i Ekologiya = Alternative Energy and Ecology*, 85 (5), 31–34 (in Russian).

Received: 10.04.2025

Accepted: 23.06.2025

Published online: 31.07.2025