

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №2 (152). С.20-27.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №2 (152). P. 20-27.

Научная статья
УДК 621.785.5
doi: 10.30987/2223-4608-2024-20-31

Технология и результаты изучения взаимодействия поверхности с потоком заряженных частиц низкотемпературной плазмы

Борис Максович Бржозовский¹, д.т.н.

Елена Петровна Зинина², д.т.н.

Владимир Васильевич Мартынов³, д.т.н.

^{1, 2, 3} Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН
(ИМАШ РАН), Москва, Россия

¹ bmbasar85@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

² e-zinina@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

³ v-martynov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4177-0963>

Аннотация. Представлен анализ подходов к изучению взаимодействия поверхности с потоком заряженных частиц с целью повышения эффективности процесса низкотемпературной плазменной модификации поверхностного слоя. Результаты анализа показали, что изучать взаимодействие теоретически достаточно сложно, поэтому представляет интерес его экспериментальное изучение с использованием методов электрохимии, позволяющих исследовать явления смачивания и растекания помещенной на поверхность жидкости, которые вызваны процессами молекулярного взаимодействия. Разработана технология изучения процесса взаимодействия поверхности с потоком заряженных частиц низкотемпературной плазмы. В основу технологии положено взаимодействие поверхности с имитатором потока частиц, в качестве которого использован водный 3,0 %-ный раствор соли NaCl. В ходе изучения установлено, во-первых, что на результаты взаимодействия активное влияние оказывают химические процессы между поверхностью и ионами раствора, зависящие от значения подаваемого на поверхность потенциала электростатического поля, а также ее микрорельеф, во-вторых, что основным пограничным процессом, протекающим при взаимодействии поверхности с раствором, является процесс адсорбции. Представлены данные анализа последствий воздействия на поверхность плазмы, подтверждающие достоверность результатов изучения, поскольку протекание химических процессов и процессов адсорбции здесь также имеет место. В целом представленные в статье материалы позволили сделать вывод о том, что разработанная технология делает возможным определение условий, обеспечивающих повышение эффективности процесса низкотемпературной плазменной модификации в направлении улучшения показателей как поверхностных (электрохимических), так и объемных (физико-механических и электрофизических) свойств, если использовать ее как в исходном состоянии, поверхности, так и в состоянии, измененном под воздействием частиц плазмы.

Ключевые слова: поверхность, низкотемпературная плазма, заряженные частицы, взаимодействие, имитация, технология

Благодарности: материал подготовлен в рамках выполнения научного исследования по гранту Российского научного фонда №19-19-00101.

Для цитирования: Бржозовский Б.М., Зинина Е.П., Мартынов В.В. Технология и результаты изучения процесса взаимодействия поверхности с потоком заряженных частиц низкотемпературной плазмы // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 2 (152). С. 20–27. doi: 10.30987/2223-4608-2024-20-27

Technology and results of studying the surface interaction for charged particles flow in low-temperature plasma

Boris M. Brzhozovsky¹, D. Eng.

Elena P. Zinina², D. Eng.

Vladimir V. Martynov³, D. Eng.

^{1, 2, 3} A.A. Blagonravov Institute of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences
(IMASH RAS), Moscow, Russia

¹ bmbars85@yandex.ru

² e-zinina@bk.ru

³ v-martynov@mail.ru

Abstract. An analysis of approaches to studying the interaction of the surface with a stream of charged particles is presented in order to increase the efficiency of the process of low-temperature plasma modification of the surface layer. The results of the analysis showed that it is theoretically difficult to study the interaction, therefore, it is interesting to study it empirically using electrochemistry methods that allow us to investigate the phenomena of mixing and spreading of a liquid placed on the surface caused by molecular interaction processes. An off-the-shelf technology for studying surface interaction for charged particles flow in a low-temperature plasma has been found. The technology is based on the surface interaction for a particle flow simulator, using an aqueous 3,0 % NaCl salt solution. During the course of studying, it was found, firstly, that the results of interaction are actively influenced by chemical processes between the surface and the ions of the solution, depending on the value of the potential of the electric field applied to the surface, as well as due to its microrelief, and secondly, that the main boundary process running under surface interaction and solution is adsorption. The data of the analysis of the effects of exposure to the plasma surface are presented. They proved the reliability of study results, since the course of chemical and adsorption processes also take place. In general, the materials presented in the article allowed making conclusion that the developed technology makes it possible to determine the conditions that ensure an increase in the efficiency of the low-temperature plasma modification process contributing to the improvement of both surface (electrochemical) and volumetric (physical mechanical and electrophysical) properties if it is used either in the initial state or in the state changed by plasma particles.

Keywords: surface, low-temperature plasma, charged particles, interaction, simulation, technology

Acknowledgements: the material was prepared as part of the scientific research under the grant of the Russian Science Foundation No. 19-19-00101

For citation: Brzhozovsky B.M., Zinina E.P., Martynov V.V. Technology and results of studying the surface interaction for charged particles flow in low-temperature plasma / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 2 (152). P. 20–27. doi: 10.30987/2223-4608-2024-20-27

В числе проблем, имеющих прямое отношение к повышению эффективности процесса низкотемпературной плазменной модификации поверхностного слоя металлических изделий [1], относится и взаимодействие модифицируемой поверхности с потоком заряженных частиц плазмы. Анализ публикаций, посвященных изучению структуры и свойств поверхности твердого тела, а также ее взаимодействия с заряженными частицами [2 – 8], показал следующее:

– с позиций квантовой механики и материаловедения поверхностный слой рассматривается как дефектный не скомпенсированный слой. Это обусловлено тем, что между частицами твердого тела (атомами, молекулами, ионами) действуют силы притяжения и отталкивания. Под действием этих сил внутри

твердого тела частица удерживается силами связи со стороны окружающих частиц в том положении, в котором равнодействующая сил равна нулю. В поверхностном слое эти связи не скомпенсированы, и его структура вследствие асимметрии действия межатомных и межмолекулярных сил оказывается искаженной;

– объем металлического твердого тела представляется как двухкомпонентная система, состоящая из ионного остова и «электронного газа» коллективизированных электронов. Электроны в металлах подчиняются статистике Ферми-Дирака, а состояние электронного газа при обычных температурах является сильно вырожденным. Это означает, что электроны заполняют практически полностью все энергетические уровни от нулевого до самого верхнего, носящего название энергии

Ферми, которая является чрезвычайно большой – единицы и десятки электрон-вольт. Из-за большой величины этой энергии основной вклад в энергетические характеристики металлов вносят именно электроны. Электроны же определяют и поверхностные свойства металлов;

- распределение электронной плотности на поверхности металла не имеет резкой границы со стороны вакуума. Электроны «выходят» в область вакуума, формируя двойной электрический слой на поверхности;

- пространственный заряд вблизи металлической поверхности формируется за счет тепловой эмиссии электронов с поверхности, которые не «падают» на нее вследствие их теплового движения. Это облако экранирует поле поверхности металла, вместе с которым оно образует двойной электрический слой. В равновесии имеется равенство потоков электронов из металла в вакуум и из электронного облака на поверхность металла;

- внешнее электростатическое поле вызывает возмущение поверхностного заряда. В случае направления от поверхности даже бесконечно малое поле «вырывает» электроны из металла, а при направлении к поверхности оно деформирует распределение электронной плотности, сдвигает его границу к металлу и «вталкивает» электроны в пределы положительного фона остова металла. При больших полях влиянием внешнего экранирования можно пренебречь, поскольку поле деформирует поверхностный барьер настолько, что оно прокладывает себе «дорогу» к металлу.

Изложенное означает, что поверхность металла обладает индивидуальными свойствами и в различных условиях способна по-разному проявлять их. В случае низкотемпературной плазменной модификации свойства проявляются при взаимодействиях полей, создаваемых зарядом частиц в пристеночном слое плазмы, и зарядом поверхности, созданным подачей положительного потенциала смещения при участии электрической составляющей сверхвысокочастотной электромагнитной волны. Изучать взаимодействие частиц с поверхностью во всех его аспектах и проявлениях теоретически (например, с позиций квантовой механики в рамках метода функционалов плотности) в этих условиях достаточно сложно,

поэтому представляет интерес его экспериментальное изучение методами электрохимии, исследуя явления смачивания и растекания помещенной на поверхность жидкости, вызванные процессами молекулярного взаимодействия. При этом необходимо принять во внимание следующее [9 – 13]:

1. Молекулярные теории смачивания развиты для систем, в которых адгезия обусловлена преимущественно силами дисперсионного взаимодействия.

2. При смачивании с момента образования поверхности контакта твердой и жидкой фаз протекают процессы молекулярного взаимодействия, которые выравнивают химические потенциалы (растворение твердого материала в жидкости, диффузия вещества жидкости в подложку, структурные превращения, химические реакции и т. д.).

Интенсивность молекулярных взаимодействий можно охарактеризовать их полярностью. Макроскопической мерой полярности жидкостей с низким поверхностным натяжением (вода, органические вещества и т. п.) может служить, например, дипольный момент, диэлектрическая проницаемость. Из этого следует, что чем больше отличаются два вещества друг от друга по своей полярности, тем больше поверхностное натяжение на границе между ними и тем хуже смачивание в этой системе.

При контакте веществ с близкой полярностью (межфазное натяжение сравнительно невелико) достигается хорошее смачивание. Из этого вытекает признак уравнивания полярных фаз: вещество *C* может адсорбироваться на поверхности раздела фаз *A* и *B*, если присутствие вещества *C* в поверхностном слое уравнивает (уменьшает) разность полярностей на межфазной границе, т.е. твердое тело лучше смачивается той жидкостью, по отношению к которой разность полярностей оказывается наименьшей (признак уравнивания полярностей). В соответствии с этим признаком смачивание может иметь место при контакте твердой и жидкой фаз со сходным (подобным) типом межатомных взаимодействий (признак подобия природы жидкости и твердого тела: «подобное смачивает подобное»).

3. В неравновесных системах поверхностное натяжение на границе двух фаз не остается постоянным, а изменяется в зависимости от времени контакта и может сильно зависеть от интенсивности процессов химического и физико-химического взаимодействия.

4. При контакте капля воды и различных полярных органических жидкостей со стеклом и сталью силы молекулярного притяжения, действующие со стороны твердого тела на жидкость, вытягивают из нижней части капли тонкий слой жидкости. Вблизи линии смачивания происходят два противоположно направленных процесса переноса молекул жидкости по твердой поверхности. Прямой поток переносит молекулы жидкой фазы на поверхность раздела твердое тело – окружающая среда; здесь они адсорбируются на активных центрах твердой поверхности. Обратный поток состоит из десорбированных молекул, возвращаемых обратно в жидкую фазу. Интенсивность каждого потока определяется энергией активации соответствующего процесса, а средняя скорость перемещения линии смачивания v определяется разностью прямого и обратного потоков. Скорость растекания зависит от соотношения движущих сил и сил сопротивления.

5. Растекание происходит в том случае, если работа адгезии превышает работу когезии растекающейся жидкости, т. е. если в результате адсорбции атомов или ионов на поверхности раздела «жидкость – твердое тело» разрушаются ее межмолекулярные связи.

6. Химический состав и плотность упаковки молекул твердого тела влияют на смачивание. Это связано с тем, что число связей, образующихся между молекулами твердого тела и молекулами жидкости, зависит от числа молекул твердого тела на единицу площади. Поэтому можно ожидать, что с возрастанием плотности упаковки смачивание должно улучшаться, по крайней мере, при контакте фаз, сходных по природе связей между молекулами. Улучшение смачивания объясняется тем, что более «рыхлая» структура монослоя облегчает диффузионное проникновение молекул жидкой фазы, что в свою очередь способствует снижению межфазного поверхностного натяжения.

7. Растекание зависит:

– от размера и массы капли. Для капли одной и той же массы скорость растекания резко уменьшается с увеличением радиуса площади контакта. Химическое взаимодействие контактирующих партнеров снижает скорость растекания, что особенно заметно при относительно небольших радиусах контакта;

– от коэффициента шероховатости. На более шероховатой поверхности средняя скорость растекания будет больше, чем на гладкой поверхности. Под действием капиллярных сил течение жидкости по канавкам происходит значительно быстрее, чем при растекании по гладкой поверхности;

– от наличия на твердой поверхности участков с различными поверхностными свойствами (с малой степенью симметрии кристаллической решетки, различной ориентировкой кристаллических граней), когда анизотропия свойств кристалла проявляется особенно резко. Неоднородности структуры присущи поверхностям всех поликристаллов, композитных материалов, многофазных сплавов, пористых тел;

– от поляризации поверхности электрода на границе с раствором электролита (электрокапиллярный эффект). В большинстве систем максимум краевого угла достигается вблизи потенциала нулевого заряда металла – подложки. Максимальной движущей силой будет соответствовать минимум электрокапиллярной кривой твердого тела $\sigma_{жт} = f(\varphi)$. При существенном сдвиге потенциала жидкого металла относительно потенциала нулевого заряда φ_0 (в одном и том же электролите) можно значительно ускорить растекание жидкого металла по поверхности диэлектрика. Сдвиг потенциала $\varphi - \varphi_0$ целесообразен лишь до определенного предела, при котором в данной системе начинаются различные побочные процессы: анодное растворение жидкого металла при анодной поляризации, восстановление катиона электролита при катодной поляризации. В неравновесных системах, в которых смачивание носит химический (необратимый) характер, поляризация может влиять на смачивание более сложным образом.

С позиций представленных материалов была разработана технология изучения взаимодействия поверхности с потоком заряженных частиц низкотемпературной плазмы. В основу технологии положено взаимодействие

поверхности с имитатором потока частиц, в качестве которого использован водный 3,0 % раствор соли NaCl, поскольку он содержит положительные катионы Na^+ и отрицательные анионы Cl^- , которые являются аналогами ионов и электронов плазмы. Это дало возможность, во-первых, исключить из наблюдения влияние поля электрической составляющей сверхвысокочастотной электромагнитной волны, участвующего в формировании плазмы, во-вторых, нанося раствор в виде капель на поверхность и подавая на нее положительный потенциал, наблюдать за поведением капель, в-третьих, анализировать и оценивать его количественно.

В ходе выполнения работ по изучению взаимодействия на пластину из стали 20, имевшую участки с различным микрорельефом и химическим составом, были помещены 14 капель различного размера (рис. 1). После этого на пластину от источника постоянного тока последовательно подавался положительный потенциал в диапазоне 0...180 В с шагом 20 В и производилась видеосъемка реакции на него капель в течение фиксированного интервала времени. Обработка видеозаписей заключалась в измерении размеров каждой капли до начала и после окончания воздействия потенциала, а также при его изменении, вычислении площадей капель и скоростей их изменения.

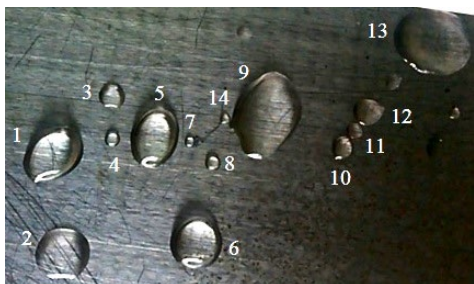


Рис. 1. Поверхность и схема расположения капель раствора NaCl в имитационном эксперименте

Fig.1. Surface and arrangement of NaCl solution droplets in a simulation experiment

Результаты обработки, представленные на рис. 2 – 4, а также их анализ (в том числе сравнительный с поведением плазмы) показали следующее:

- при отсутствии электростатического поля растекание капель в течение 180 с не наблюдалось;

- в максимальной степени на подачу потенциала отреагировали капли, имеющие наибольшие размеры, что представлено на рис. 2 (номера позиций графиков соответствуют номерам капель);



Рис. 2. Зависимости площадей капель от потенциала смещения

Fig. 2. Dependences of droplet areas on the displacement potential

- снижение скорости растекания капель при возрастании значения потенциала вызвано активным протеканием химического взаимодействия между поверхностью образца и ионами раствора NaCl. Об этом свидетельствуют следы коррозии, обнаруженные после окончания эксперимента. Наиболее интенсивно следы проявились у границ капель в областях, где в наибольшей степени действовали силы молекулярного притяжения со стороны твердого тела;

- на моменты изменения значений потенциала (рис. 3) от 0 В (белые столбики) до 180 В (черные столбики) реагировали не только крупные капли, но и капли, имевшие средние размеры;

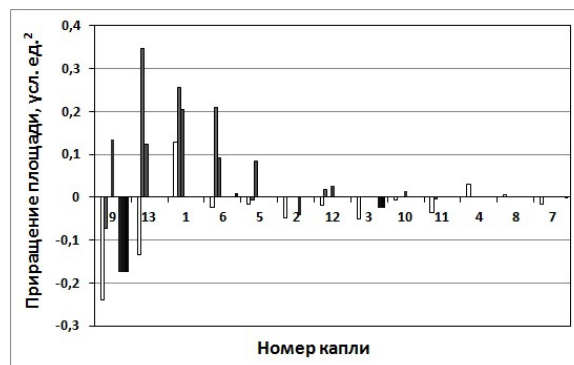
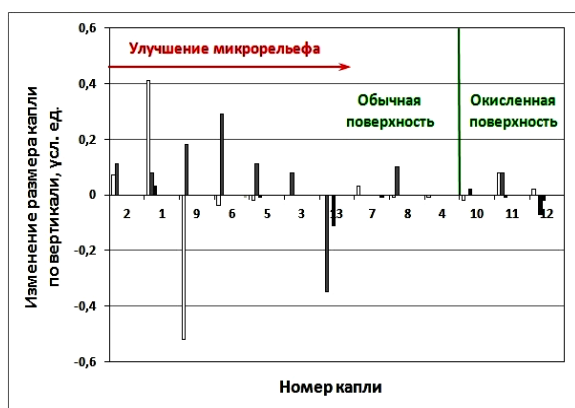


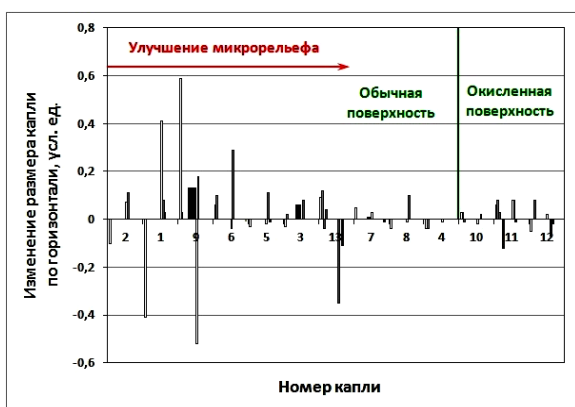
Рис. 3. Реакции площадей капель на изменение значения потенциала смещения

Fig. 3. Droplet areas response to changes in the value of the displacement potential

– чем ровнее микрорельеф поверхности, тем в большей степени изменялись размеры капель, особенно крупных (рис. 4). Изменения шли по следам от механической обработки пластины. Наиболее показательным стало изменение размеров капли № 9, которая, находясь под действием потенциала в 80 В, слилась с каплей № 14 и при последующих значениях потенциала ее размер в горизонтальном направлении начал изменяться более активно (см. рис. 4, б), влияя и на площадь, и на скорость ее изменения. В то же время на участке измененного химического состава (окисление) изменения размеров практически отсутствовали несмотря на то, что расположенные там капли № 10, 11 и 12 находились в непосредственной близости друг от друга (см. рис. 1);



а)



б)

Рис. 4. Влияние микрорельефа и химического состояния поверхности на изменения размеров капель при различных значениях потенциала смещения:
а – вертикальное направление; б – горизонтальное направление

Fig. 4. The effect of microrelief and the chemical state of the surface on changes in droplet sizes at different values of the displacement potential:
а – vertical direction; б – horizontal direction

– основным пограничным процессом, протекающим при взаимодействии поверхности с раствором, является процесс адсорбции. Потенциал электростатического поля усиливает этот процесс и активизирует протекание химических реакций. При этом существует оптимальное (для состояния, в котором находится поверхность) значение потенциала (в данном случае оно составило 40 В), при котором реакции протекают наиболее интенсивно. В результате силы межмолекулярного взаимодействия на границе твердой и жидкой фаз ослабевают, что ведет к прекращению процесса растекания. Это означает, что существует конкуренция между процессами адсорбции и поверхностной диффузии, зависящая от интегральной величины комбинации потенциалов поверхности и электростатического поля.

Рассматривая полученные результаты в аспекте достоверности, можно отметить, что они обнаруживаются и/или регистрируются после воздействия на поверхность плазмы [1, 14, 15].

На участках ровной поверхности воздействие приводит к формированию сплошных равномерно распределенных одинаково прогретых зон размером примерно 50...70 нм (рис. 5, а), что указывает на однородность плазмы. На поверхностях же, имеющих различные дефекты (неровности в виде капельной фазы, микровыступы, царапины и др.), контакт с плазмой становится более интенсивным с образованием зон оплавления, локальный прогрев в которых вызывает неравномерный прогрев прилегающих областей и приводит к проседанию поверхности с образованием наноразмерных ступенек или замкнутых террас, которые внешне проявляются как набор вложенных замкнутых кривых (рис. 5, б). Это связано с тем, что на участках дефектов происходит искажение электростатического поля, приводящее к нарушению однородности плазмы, и проявляется в ее расслоении и концентрации в виде пучков вплоть до их шнуrowания. В этом случае на поверхности появляются глухие отверстия диаметром 0,7...1,0 мкм (рис. 5, в).

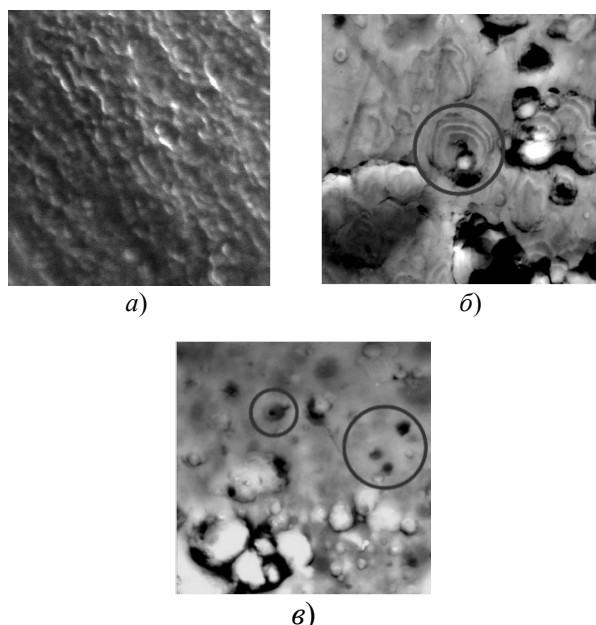


Рис. 5. Примеры электронно-микроскопического изображения результатов воздействия плазмы на бездефектную поверхность (а) и на поверхность в зоне наличия дефектов, вызвавших ее проседание (б) или появление глухих отверстий (в)

Fig. 5. Examples of electron microscopic images of plasma exposure results on a defect-free surface (a) also on a surface in the area of defects that cause its subsidence (b) or the appearance of blind bores (c)

Подача на поверхность оптимального положительного потенциала смещения (или его целенаправленное изменение в условиях изменения состояния поверхности) в ходе воздействия заряженных частиц плазмы (ионов и электронов), позволяет интенсифицировать (или поддерживать на максимально возможном уровне) процессы адсорбции, обеспечивающей (рис. 6):

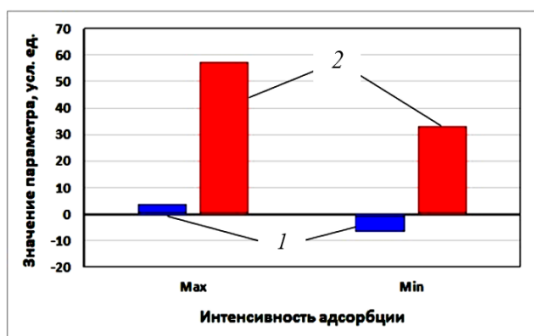


Рис. 6. Вариации среднего суммарного изменения химического состава (1) и средней микротвердости (2) поверхностного слоя в зависимости от интенсивности процессов адсорбции

Fig. 6. Variations of the average total change in the chemical composition also (1) average microhardness (2) of the surface layer depending on the driving rate of the adsorption processes.

– изменение химического состава поверхности в направлении формирования новых связей, что проявляется, в повышении показателей ее электрохимических свойств (стационарный потенциал, поверхностное сопротивление);

– выделение энергии, которая становится дополнительным источником тепла, обеспечивающим повышение степени структурных изменений в поверхностном слое, что проявляется в повышении показателей его физико-механических (микротвердость, степень уплотнения) и электрофизических (сопротивление материала) свойств.

Выводы

1. Условия, обеспечивающие повышение эффективности процесса низкотемпературной плазменной модификации, можно определять по результатам изучения взаимодействия модифицируемой поверхности с потоком заряженных частиц плазмы.

2. Предложенная технология позволяет определять условия целенаправленно, если проводить изучение как в исходном состоянии поверхности, так и в состоянии, измененном под воздействием частиц плазмы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бржозовский Б.М., Зинина Е.П., Мартынов В.В. Основные результаты и направления дальнейших исследований по низкотемпературному плазменному формированию композитных структур на рабочих поверхностях геометрически сложных металлических изделий // Научно-технические технологии в машиностроении. 2022. № 8 (134). С. 20–26.
2. Ролдугин В.И. Физикохимия поверхности: учебник-монография. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2011. 568 с.
3. Глушков В.Л., Ерквич О.С. Характеристики поверхности щелочных металлов с учетом дискретности кристаллической решетки и фриделевских осцилляций электронной плотности // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2017. № 4. С. 75–89.
4. Партенский М.В. Самосогласованная электронная теория металлической поверхности // Успехи физических наук. 1979. Т. 128. Вып. 1., № 5. С. 69–106.
5. Вольф Г.В., Федоров Д.В. Самосогласованный отклик электронной плотности кристаллической пленки меди на внешнее электростатическое поле // Физика твердого тела. 2001. Т. 43. Вып. 3. С. 385–390.
6. Инженерия поверхности деталей: под ред. А.Г. Сулова. М.: Машиностроение, 2008. 320 с.
7. Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В. Физико-химические основы смачивания и растекания. М.: Химия, 1976. 232 с.
8. Никитенков Н.Н. Основы анализа поверхности твердых тел методами атомной физики: учеб. пособие.

Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. 203 с.

9. **Зимон А.Д.** Адгезия жидкости и смачивание. М.: Химия, 1974. 416 с.

10. **Дамаскин Б.Б., Петрий О.А.** Введение в электрохимическую кинетику. М.: Высшая школа, 1983. 400 с.

11. **Салем Р.Р.** Теория двойного слоя. М.: Физматлит, 2003. 104 с.

12. **Chevalliot S., Kuiper S., Heikenfeld J.** Experimental Validation of the Invariance of Electrowetting Contact Angle Saturation // J. Adhesion Sci. Technol. 2011. DOI:10.1163/156856111X599580.

13. **Klarman D., Andelman D., Urbakh M.** A Model of Electrowetting, Reversed Electrowetting, Contact Angle Saturation // arXiv:1102.0791v3[cond-mat.soft] 18 Apr 2011.

14. **Формирование** композитных структур на поверхностях сложного профиля воздействием низкотемпературной плазмы комбинированного разряда: монография / Б.М. Бржозовский, Е.П. Зинина, В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова. Старый Оскол: ТНТ, 2017. 140 с.

15. **Brzhozovskii B., Zinina E., Martynov V., Zakharevich A.** The effect of pressure in the working chamber of a processing unit on the quality indicators of the composite structure formed in the metal product surface layer at low-temperature plasma modification // Vacuum, 2022, 205. 111403.

REFERENCES

1. Brzhozovsky B.M., Zinina E.P., Martynov V.V. The main results and directions of further research on low-temperature plasma formation of composite structures on functional surfaces of geometrically complicated metal products// Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2022, no. 8 (134), pp. 20–26.

2. Roldugin V.I. Physicochemistry of the surface: textbook-monograph. Dolgo-prudniy: Publishing house «Intellect», 2011, 568 p.

3. Glushkov V.L., Yerkovich O.S. Characteristics of the surface of alkali metals taking into account the discreteness of the crystal lattice and Friedel oscillations of electron density // Bulletin of the Bauman Moscow State

Technical University. Ser. Natural sciences, 2017, no. 4, pp. 75–89.

4. Partensky M.V. Self-consistent electron theory of a metallic surface // Successes of physical sciences, 1979, vol. 128, issue 1, no. 5, pp. 69–106.

5. Wolf G.V., Fedorov D.V. Self-consistent response of the electron density of a crystalline copper film to an external electrostatic field // Solid State Physics, 2001. vol. 43, issue 3, pp. 385–390.

6. Surface engineering of parts: edited by A.G. Suslov. Moscow: Mashinostroenie, 2008, 320 p.

7. Summa B.D., Goryunov Yu.V. Physico-chemical bases of wetting and spreading. Moscow: Chemistry, 1976, 232 p.

8. Nikitenkov N.N. Fundamentals of the analysis of the surface of solids by methods of atomic physics: textbook. Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2012, 203 p.

9. Zimon A.D. Adhesion of liquid and wetting. Moscow: Chemistry, 1974, 416 p.

10. Damaskin B.B., Petri O.A. Introduction to electrochemical kinetics. Moscow: Higher School, 1983, 400 p.

11. Salem R.R. The theory of the double layer. Moscow: Fizmatlit, 2003, 104 p.

12. Chevalliot S., Kuiper S., Heikenfeld J. Experimental Validation of the Invariance of Electrowetting Contact Angle Saturation // J. Adhesion Sci. Technol. 2011. DOI:10.1163/156856111X599580.

13. Klarman D., Andelman D., Urbakh M. A Model of Electrowetting, Reversed Electrowetting, Contact Angle Saturation // arXiv:1102.0791v3[cond-mat.soft] 18 Apr 2011.

14. Formation of composite structures on surfaces of a complex profile by exposure to low-temperature plasma of a combined discharge: monograph / B.M. Brzhozovsky, E.P. Zinina, V.V. Martynov, E.S. Ple-shakova. Stary Oskol: TNT, 2017, 140 p.

15. Brzhozovskii B., Zinina E., Martynov V., Zakharevich A. The effect of pressure in the working chamber of a processing unit on the quality indicators of the composite structure formed in the metal product surface layer at low-temperature plasma modification // Vacuum, 2022, 205. 111403.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 04.12.2023; одобрена после рецензирования 15.12.2023; принята к публикации 21.12.2023.

The article was submitted 04.12.2023; approved after reviewing 15.12.2023; accepted for publication 21.12.2023.