

УДК 53.043, 533.9.072
EDN: NLJLUBPACS: 33.20.Ni; 52.50.Dg; 52.77.-j;
61.30.Hn**Действие неравновесной атмосферной плазмы на гидрофильность
поверхности металлов**© Д. В. Белоплотов^{1,*}, В. С. Скакун¹, Д. А. Сорокин^{1,2}, Э. А. Соснин^{1,2}, В. А. Панарин¹,
Б. А. Зайцев²¹ Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, 634055 Россия

* E-mail: rff.qer.bdim@gmail.com

² Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, 634050 Россия

Статья поступила в редакцию 21.10.2025; после доработки 7.11.2025; принята к публикации 20.02.2026

Шифр научной специальности: 1.3.5

Определено сравнительное действие неравновесной плазмы атмосферного давления на краевой угол смачивания металлических поверхностей (Cu, нержавеющая сталь, сплав Al-Mg). При этом плазму формировали в апокампическом и наносекундном диффузном разрядах в воздухе и в плазменной струе аргона. Обработка в течение 15, 30, 60, 120 и 240 секунд выявила, что для получения максимальной гидрофильности во всех случаях достаточно 30–60 сек. Более простые в технической реализации апокампический разряд в воздухе и импульсный разряд в потоке аргона не уступают по способности к увеличению гидрофильности наносекундному атмосферному разряду. Отмечено частичное сохранение гидрофильных свойств в течение суток после всех трёх типов обработки.

Ключевые слова: апокампической разряд, вакуумное ультрафиолетовое излучение, наносекундный диффузный разряд, неравновесная низкотемпературная плазма, плазменная струя.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-1-39-47

Введение

Плазма атмосферного давления – перспективный агент для управления свойствами поверхности различных материалов (органических, неорганических, металлов). В частности, известно, что очистка и активация поверхности плазмой увеличивает адгезионные свойства на границах раздела «металл–металл» и «металл–полимер» примерно в 3,4 раза [1, 2]. Источниками такой плазмы традиционно являются дуговой, коронный и барьерный разряды, а также различные варианты т. н. плазменных струй атмосферного давления, в которых поток плазмы формируется в разрядном промежутке (возбуждение осуществляют радиочастотным, коронным, тлеющим или барьерным разрядом), после чего выталкивается через узкий капилляр или щель

за счет избыточного давления в зоне разряда, превышающего атмосферное [3–5].

В задаче управления краевым углом смачивания поверхности чаще всего изучаются полимерные и биологические материалы, применяемые в фотонике и микроэлектронике [6, 7]. Значительно меньше исследований посвящено управлению краевым углом смачивания металлов, хотя преимущества такой обработки по сравнению, например, с плазменной активацией при пониженных давлениях понятны: установки для получения плазменных струй мобильны и работают в нормальных условиях, позволяя воздействовать как на гладкие, так и профилированные поверхности.

В частности, получены данные о воздействии атмосферной плазмы на такие материалы, как Al, Cu, Cr, сталь (AISI 304L) и оцинкованная сталь (H300LAD) [8–12]. Во всех

этих случаях плазменная обработка уверенно увеличивала гидрофильность поверхностей.

В настоящем исследовании для придания гидрофильных свойств поверхности металлов мы будем использовать три источника атмосферной неравновесной плазмы, которые для этой цели ранее не применялись. Это – источники на основе апокампического разряда в воздухе [13, 14], наносекундного диффузного разряда в воздухе [15] и новый источник вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) излучения, формируемого в потоке аргона [16, 17]. Все три источника продуцируют активные частицы кислорода и азота на границе стримерного канала (плазменной струи) и окружающего воздуха или непосредственно в диффузном разряде. Кроме того, первый и второй источники преимущественно излучают ультрафиолет во второй положительной системе азота (переходы $C^3P_u-B^3P_g$), а третий – на переходах $3s^2P-2p^2P^\circ$ и $3s^2P-2p^2D^\circ$ атомарного азота на 174,3 и 149,3 нм, соответственно.

Цель работы – оценка способности указанных источников плазмы к достижению максимального и долговременного изменения гидрофильности металлических поверхностей (Cu, сталь, сплав Al-Mg) с учётом того, что ранее они для этой цели не применялись.

Экспериментальные установки и методики

Объекты и способы обработки. Объектом воздействия были металлические фольги меди, нержавеющей стали и сплава алюминия и магния (97 % Al, 3 % Mg), толщиной 20, 100 и 50 мкм, соответственно. Все эти материалы широко распространены в производстве. Прямоугольные образцы фольг (15×15 мм) размещались на пути распространения стримера апокампического разряда, аргоновой плазменной струи или в области действия диффузного разряда на различных расстояниях x от электродной системы (рис. 1).

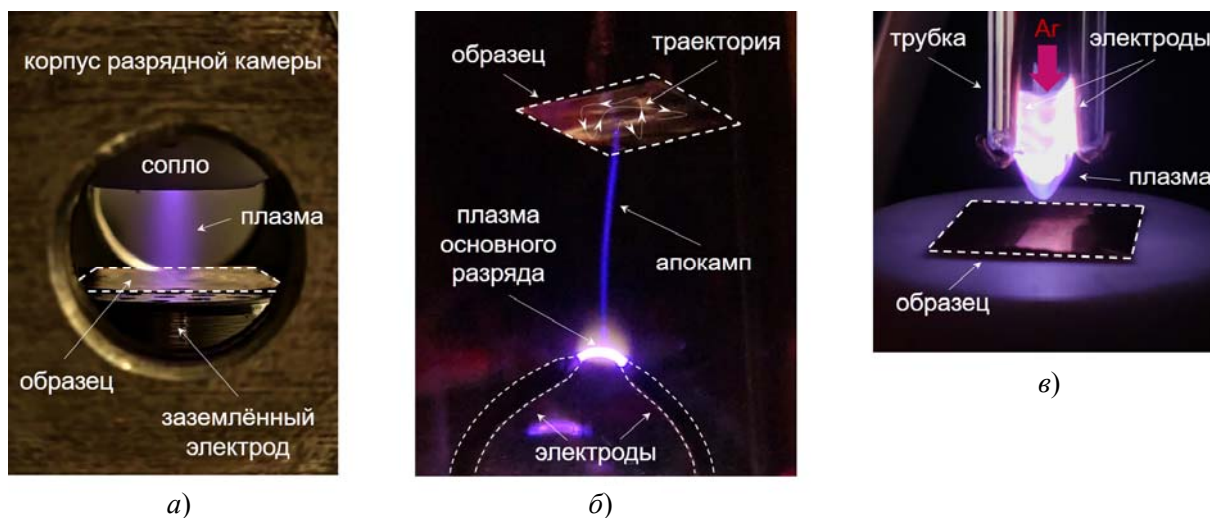


Рис. 1. Фотографии разрядных систем в процессе обработки образцов (15×15 мм) из меди:
 (а) наносекундный разряд в воздухе при атмосферном давлении при частоте следования импульсов 100 Гц, выдержка 1/90 сек, (б) апокамп в воздухе при атмосферном давлении, выдержка 1/30 сек, (в) импульсный разряд в потоке аргона с эмиссией ВУФ-излучения, выдержка 1/30 сек

Наносекундный разряд [15] формировался в промежутке острей–плоскость, расположенном внутри коаксиальной разрядной камеры (рис. 1а). На электрод диаметром 6 мм из нержавеющей стали, конец которого имел коническую форму с углом раствора 60 градусов, подавались импульсы напряжения отрицательной полярности с амплитудой –25 кВ и длительностью 4 нс. Частота следования

импульсов напряжения составляла 100 Гц. Ответный заземлённый электрод имел форму цилиндра диаметром 20 мм. Расстояние между электродами составляло 6 мм. Образцы металлических фольг, подвергавшиеся воздействию плазмы наносекундного разряда, помещались на торец заземлённого электрода. Вдоль оси разрядного промежутка осуществлялась прокачка воздуха с помощью мем-

бранного насоса и специального сопла, надеваемого на высоковольтный электрод. Скорость прокачки не превышала 5 л/мин.

Апокампический разряд формировался между заострёнными стержнями диаметром 2 мм из нержавеющей стали, которые были ориентированы навстречу друг другу (рис. 1б). Расстояние между ними составляло 4 мм. На один из электродов подавались импульсы напряжения положительной полярности амплитудой 10 кВ и длительностью 1 мкс, а частота следования импульсов составляла 27 кГц. Ответный электрод был соединён с обкладкой конденсатора ёмкостью 10 пФ, вторая обкладка которого была заземлена. Эта электрическая схема имеет принципиальное значение для формирования апокампического разряда [18]. На стадии роста напряжения (0,5 мкс) происходил пробой промежутка (за десятки нс) между стержнями, формируя разрядный канал с характерным тёмным пространством вблизи катода и протяжённым положительным столбом. По мере роста напряжения конденсатор заряжался почти до напряжения холостого хода генератора (с учётом падения напряжения в канале плазмы, как на активной нагрузке). От изгиба разрядного канала, имеющего положительный потенциал, стартовал положительный стример в направлении, перпендикулярном оси разрядного промежутка. Таким образом, формировался апокамп длиной 2–3 см, визуально напоминающий т. н. плазменную струю (рис. 1б). Образцы металлических фольг помещались на пути распространения апокампа на расстоянии 2 см от электродов. Воздействие плазмы апокампа осуществлялось при непосредственном контакте его вершины, хаотично перемещающейся по поверхности образцов.

Импульсный разряд в потоке аргона зажигался между параллельными проволочками внутри кварцевой трубки длиной 50 мм и внутренним диаметром 6 мм (рис. 1в). Через кварцевую трубку прокачивался аргон (99,99 % чистоты) со скоростью 2 л/мин. Одна из проволочек была заземлена. Вторая проволочка подключалась к высоковольтному выходу импульсного генератора (амплитуда 10 кВ, длительность 1 мкс, частота следования импульсов 27 кГц) через конденсатор ёмкостью 10 пФ. В результате между проволочками

формировался разрядный канал, скользящий вдоль проволочек в направлении потока аргона. На конечном этапе разрядный канал «выныривал» из торца трубки на расстояние 5–7 мм и обрывался, после чего процесс повторялся. Напомним, что ранее было показано, что в плазме такого разряда генерируется ВУФ-излучение (174,3 и 149,3 нм) на переходах атомарного азота ($3s^2P - 2p^2P^0$ и $3s^2P - 2p^2D^0$) [17], образующихся при диссоциации молекулярного азота, содержащегося в баллоне с аргонном в виде примеси, а также при выдавливании разрядного канала из торца кварцевой трубки в атмосферу. Образцы металлических фольг помещались на расстоянии 8–10 мм от торца трубки так, что плазменный канал не касался их поверхности (рис. 1в). Однако ВУФ-излучение могло достигать поверхности образцов за счёт вытеснения воздуха потоком аргона, прозрачного для ВУФ-излучения.

Образцы обрабатывались плазмой в течение 15, 30, 60, 120 и 240 секунд. Всего было 15 образцов каждого металла. Измерения краевого угла смачивания проводились сразу после обработки и через сутки.

Измерение краевого угла смачивания (θ) поверхности металлических образцов выполнялось с использованием статического метода лежащей капли [19] и дистиллированной водой в качестве тестовой жидкости.

Измерительный стенд был собран таким образом, чтобы обеспечить высокую точность регистрации профиля капли. Для этого исследуемый образец помещался на трёхкоординатный столик с микрометрическими винтами для точного позиционирования. Непосредственно над образцом фиксировался шприц с дистиллированной водой.

Процедура нанесения капли заключалась в формировании на кончике иглы капли дистиллированной воды диаметром 1,25 мм ($V \approx 1$ мкл), после чего столик плавно перемещался вверх до момента аккуратного контакта и переноса капли на обработанную (центрально) часть поверхности образца, что минимизировало динамические эффекты. Диаметр капли контролировался предварительно откалиброванной цифровой экранной линейкой.

Освещение осуществлялось рассеянным излучением полупроводникового лазерного диода ($\lambda = 652$ нм) без коллиматора, прошед-

шим через матовое стекло, что обеспечивало равномерный и контрастный фон для чёткого выделения профиля капли.

Профиль лежащей на поверхности образца капли фотографировался сбоку с помощью полнокадрового цифрового фотоаппарата EOR S (Canon Ltd, Япония) с длиннофокусным микроскопом K2 DistaMax с фокусом CentriTel и объективом CF-3 (Infinity Photo-Optical Company, США), имеющего высокое (до 1,7 мкм) пространственное разрешение. Это обеспечивало необходимую детализацию границ раздела «капля-воздух-образец». Изображение с фотоаппарата передавалось на компьютер в режиме реального времени по Wi-Fi каналу.

Краевой угол смачивания определялся на основе полученных изображений с использованием программного обеспечения ImageJ [20] с установленным плагином Contact Angle [<https://imagej.net/ij/plugins/contact-angle.html>]. Данный плагин позволял провести математическую аппроксимацию профиля капли и вычислить угол между касательной к профилю капли в точке контакта и базовой линией (поверхностью образца). Для повышения статистической достоверности и учёта возможной неоднородности поверхности, измерение θ проводилось 2–4 раза на различных участках каждого образца. Конечный результат представлялся в виде среднего значения по всем измерениям, а также рассчитывалась случайная ошибка при доверительной вероятности 0,95, что позволяло оценить точность и воспроизводимость полученных данных. В зависимости от способа и режима обработки образцов относительная случайная ошибка измерений краевого угла смачивания могла составлять от 10 до 40 %.

Результаты и их обсуждение

Вначале были измерены краевые углы смачивания исходных необработанных плазмой образцов меди, нержавеющей стали и сплава алюминия с магнием. Так, исходные значения θ_0 для меди, нержавеющей стали и сплава алюминия с магнием составили, соответственно, $97,0 \pm 3,6^\circ$, $75,5 \pm 3,3^\circ$, $72,9 \pm 3,4^\circ$. Полученные значения позволяют охарактеризовать исходную поверхность каждого образ-

ца. Так, поверхность образца из медной фольги можно считать слабо гидрофобной, поскольку среднее значение краевого угла превышает 90° . Как правило, для чистых металлов характерна гидрофильность. Гидрофобный же характер образца из меди, вероятно, обусловлен наличием адсорбированных органических загрязнений, что снижает поверхностную энергию. Поверхность образцов нержавеющей стали и из сплава Al-Mg можно охарактеризовать как гидрофильную (краевой угол смачивания значительно ниже 90°). Эти свойства, вероятно, определяются наличием оксидных плёнок, связи «металл – кислород» в которых полярны и могут взаимодействовать с диполями – молекулами воды.

На рисунке 2 представлены зависимости значений краевого угла смачивания исследуемых образцов сразу же после обработки всеми способами.

Анализ полученных зависимостей краевого угла смачивания, измеренного сразу после обработки, выявляет ключевую закономерность, общую для всех образцов и способов обработки, а именно – воздействие плазмы всех трёх видов разряда (апокампиский разряд в воздухе, наносекундный разряд в воздухе и импульсный разряд в Ar с ВУФ) приводит к значительному снижению краевого угла смачивания, что свидетельствует об увеличении гидрофильности поверхности образцов.

Рассмотрим подробно результаты для каждого способа обработки поверхности образцов. При воздействии на образцы плазмой апокампа наиболее сильный эффект снижения краевого угла наблюдается для сплава Al-Mg. Так, исходное значения $\theta_0 \approx 73^\circ$ снизилось до примерно 20° уже после 30 секунд обработки. Даже после 15 секунд воздействия угол смачивания снижается до 28° . Для меди и нержавеющей стали снижение краевого угла смачивания также существенно. При этом медь демонстрирует наибольшую разницу между исходным углом (97°) и после воздействия (32°). Наиболее резкое снижение θ происходит при коротких временах обработки (15–60 с). Дальнейшее увеличение длительности обработки (до 240 с) приводит к более умеренному дополнительному снижению или стабилизации угла с учётом случайной ошибки измерений, что указывает на достижение некоего предела модификации поверхности.

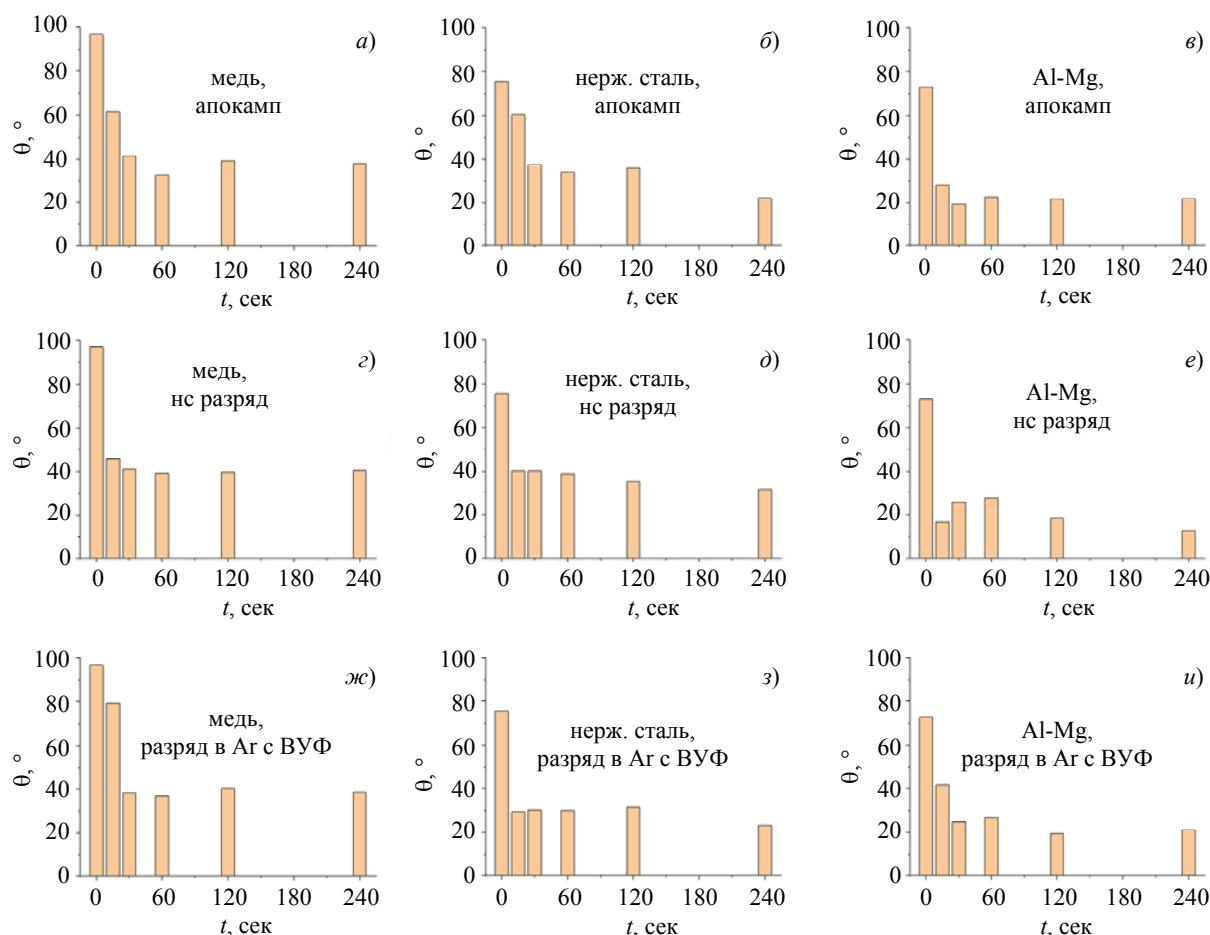


Рис. 2. Зависимости краевого угла смачивания поверхности образцов от длительности и способа обработки сразу после обработки: (а–в) апокамп в воздухе при атмосферном давлении, (г–е) наносекундный разряд в воздухе при атмосферном давлении, (ж–и) импульсный разряд в потоке аргона с эмиссией ВУФ-излучения. Материал образцов: (а, г, ж) медь, (б, д, з) нержавеющая сталь, (в, е, и) сплав Al-Mg

При обработке образцов плазмой наносекундного разряда также достигается максимальная (во всей проведенной серии опытов) гидрофилизация поверхности. Сплав Al-Mg вновь демонстрирует наименьшие значения θ вплоть до 13° . С учётом случайной ошибки (десятки %) абсолютное снижение θ при воздействии плазмы наносекундного разряда сопоставимо с результатами, получаемыми при воздействии плазмы апокампа. Для меди и нержавеющей стали конечные значения θ также сопоставимы с тем, что получилось при воздействии плазмы апокампа. Кроме того, как и в случае апокампа, основное снижение угла смачивания достигается за первые 30–60 с, после чего наблюдается стабилизация или незначительные изменения.

При обработке образцов плазмой импульсного разряда в потоке аргона, сочетающего в себе также воздействие ВУФ-излучения, все три металла также быстро достигают

низких значений θ (≈ 20 – 30°) при времени обработки 30 с и более. При этом нержавеющая сталь демонстрирует наиболее быстрый отклик на воздействие по сравнению с другими металлами и разрядами: при длительности обработки 15 с θ достигает $\approx 30^\circ$. Это может указывать на особую чувствительность оксидной плёнки нержавеющей стали к ВУФ-излучению или активным частицам из потока аргона. Для сравнения медь за 15 с воздействия показывает снижение краевого угла смачивания всего до $\approx 80^\circ$. Однако при 30 с и более происходит резкое уменьшение θ до 36 – 40° с последующей стабилизацией. Сплав Al-Mg показывает лучшие результаты. Эффективное снижение θ до ≈ 20 – 25° достигается после 30 с воздействия.

На рисунке 3 представлены значения краевого угла смачивания исследуемых образцов, полученные через сутки после обработки.

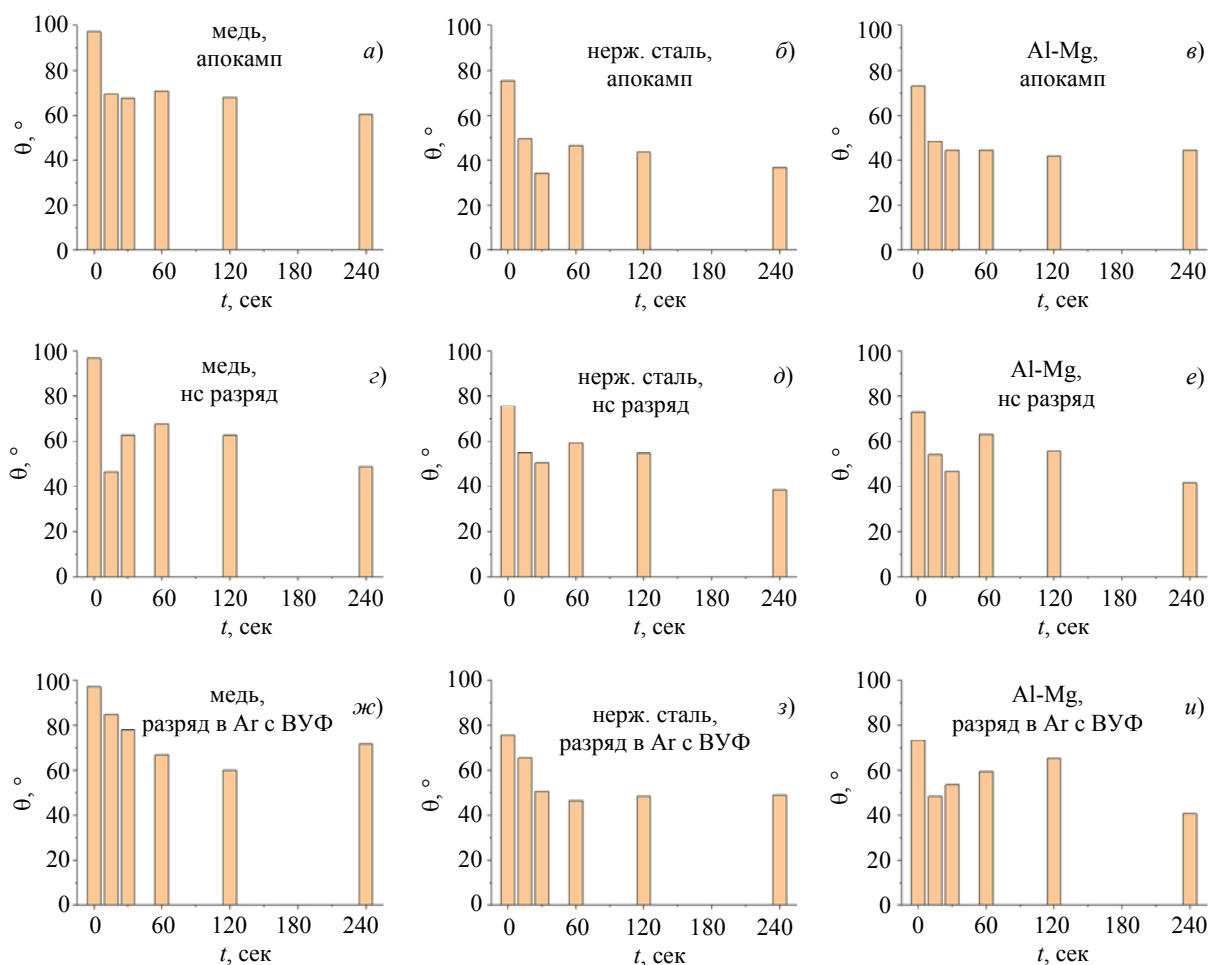


Рис. 3. Краевые углы смачивания поверхности образцов при различных длительности и способах обработки через сутки после обработки: (а–в) апокамп в воздухе при атмосферном давлении, (г–е) наносекундный разряд в воздухе при атмосферном давлении, (ж–и) импульсный разряд в потоке аргона с эмиссией ВУФ-излучения. Материал образцов: (а, г, ж) медь, (б, д, з) нержавеющая сталь, (в, е, и) сплав Al-Mg

Измерения, проведённые через сутки после обработки, показывают общее для всех образцов и всех способов обработки частичное восстановление краевого угла смачивания, специфичное по отношению к применяемым материалам.

Так, для случая обработки плазмой апокампа быстрее всего восстановление краевого угла смачивания наблюдается у образцов из меди. Значения θ восстанавливаются до $60\text{--}70^\circ$ при всех длительностях обработки. Для нержавеющей стали и сплава Al-Mg восстановление более умеренное. Углы находятся в диапазоне $40\text{--}50^\circ$. Следует отметить, что чёткой зависимости конечного угла от длительности обработки не наблюдается. Возможно такая зависимость может проявиться при измерениях краевого угла смачивания через минуты–часы после воздействия.

В случае обработки образцов плазмой наносекундного разряда степень восстановле-

ния θ для меди и нержавеющей стали сопоставима с апокампом, с конечными значениями θ в диапазоне $50\text{--}70^\circ$ для меди и $40\text{--}60^\circ$ для нержавеющей стали. Сплав Al-Mg показывает чуть менее выраженное восстановление, значения θ остаются в диапазоне $40\text{--}55^\circ$.

Наиболее сильное восстановление значений θ (до $70\text{--}80^\circ$) наблюдается для меди спустя сутки после воздействия продуктами импульсного разряда в потоке аргона, сочетающего в себе также испускание ВУФ-излучения. Это может свидетельствовать о том, что увеличение гидрофильности поверхности достигается именно за счёт ВУФ-модификации, эффект от которой менее устойчив. Для нержавеющей стали и сплава Al-Mg восстановление θ также наблюдается, но конечные значения θ остаются относительно низкими ($\approx 50\text{--}60^\circ$).

Полученные данные свидетельствуют, что в наших экспериментах изменение смачи-

ваемости металлических образцов – это результат комплексного воздействия (продуктов плазмы и ВУФ-излучения). Их вклад зависит от типа разряда и материала. В случае прямого воздействия на поверхность образцов плазмой апокампа и наносекундного разряда в воздухе высокоактивные частицы плазмы (активные формы азота и кислорода, радикалы и ионы), вероятно, эффективно разрушают и удаляют с поверхности образцов слабосвязанные загрязнения. Затем длительное пребывание на открытом воздухе приводит к реадсорбции загрязнений/пыли высокоэнергетичной поверхностью. Кроме того, при прямом контакте воздушной плазмы с поверхностью может происходить химическая модификация в результате взаимодействия с теми же активными формами азота и кислорода. Происходит образование новых полярных кислородсодержащих функциональных групп (например, оксидов) на поверхности металла, значительно повышая поверхностную энергию и, следовательно, гидрофильность.

В случае же воздействия на образцы продуктами импульсного разряда в потоке аргона, включающего в себя также действие ВУФ-излучения, могут происходить как фотохимические реакции на поверхности, вызывающие разрушение загрязнений и образование радикалов, так и реакции с метастабильными частицами аргона и молекул азота. Эти факторы могут модифицировать структуру или химический состав имеющихся оксидных и других плёнок.

Заключение

Три источника неравновесной плазмы атмосферного давления с различным спектральным составом и предположительно различным содержанием количественным составом активных компонент, впервые использованы для увеличения гидрофильности металлических поверхностей (Cu, нержавеющая сталь, сплав Al-Mg). Показано, что краевой угол смачивания падает до минимума за 30–60 секунд, не изменяясь при больших экспозициях с учётом ошибки измерений.

Измерения, проведённые через сутки после обработки, показывают общее для всех образцов и всех способов обработки частич-

ное восстановление краевого угла смачивания, специфичное по отношению к применяемым материалам. Полученные данные являются первичными для последующего выявления физических факторов, влияющих на гидрофильность поверхности металлов.

С точки зрения выбора источника (из взятых для исследования), обеспечивающего максимальное и долговременное изменение гидрофильности можно заключить следующее:

- по сравнению с наносекундным разрядом, апокампический разряд обеспечивает сопоставимое долговременное изменение гидрофильности поверхностей металлов и его технически проще реализовать (не нужна техника формирования наносекундных импульсов и не требуется согласование импедансов выхода генератора, передающей линии и нагрузки);

- источник ВУФ-излучения, формируемого в потоке аргона позволяет точно локализовать место воздействия по сравнению с апокампическим разрядом.

Поэтому в дальнейшем для обработки иных металлических поверхностей, в частности, применяемых в медицине, следует сделать выбор в пользу сравнительно простых в эксплуатации источников – апокампического разряда и источника ВУФ-излучения, формируемого в потоке аргона.

*Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 25-79-31008,
<https://rscf.ru/project/25-79-31008/>*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Massines F., Rabehi A., Decomps P., Gadri R. B., Segur P., Mayoux C. / J. Appl. Phys. 1998. Vol. 83. P. 2950.
2. Klages C.-P., Hopfner K., Klake N., Thyen R. / Proc. Int. Symp. on High Pressure Low Temperature Chemistry, Hakone VII. 2000. P. 429.
3. Tendero C., Tixier Ch., Tristant P., Desmaison J., Leprince P. / Spectrochimica Acta Part B. 2006. Vol. 61. P. 2.
4. Schutze A., Jeong J. Y., Babayan S. E., Park J. Y., Selwyn G. S., Hicks R. F. / IEEE Trans. Plasma Sci. 1998. Vol. 26. P. 1685.
5. Shao T., Zhang C., Wang R., Zhou Y., Xie Q., Fang Z. / IEEE Trans. Plasma Sci. 2015. Vol. 43. P. 726.
6. Penkov O. V., Khadem M., Lim W.-S., Kim D.-E. / J. Coat. Technol. Res. 2015. Vol. 12. P. 225.

7. Сидорова С. В., Моисеев К. М., Васильев Д. Д., Назаренко М. В., Михайлова И. В. / Фотоника. 2022. Т. 16. С. 288.
8. Kim M. C., Yang S. H., Boo J. H., Han J. G. / Surf. Coat. Technol. 2003. Vol. 174–175. P. 839.
9. Tang S., Kwon O. J., Lu N., Choi H. S. / Korean J. Chem. Eng. 2004. Vol. 21. P. 1218.
10. Prysiazhnyi V. / J. Surf. Eng. Mat. Adv. Technol. 2013. Vol. 3. P. 138.
11. Liu X., Chen F., Huang Sh.-A., Yang X.-L., Lu Y., Zhou W. L., Xu W.-J. / IEEE Trans. Plasma Sci. 2015. Vol. 43. P. 1959.
12. Kanbir Ö., Ayas K., Çavdar K. / Materials Testing. 2025. Vol. 67. P. 875.
13. Соснин Э. А., Скакун В. С., Панарин В. А., Печеницин Д. С., Тарасенко В. Ф., Бакут Е. Х. / Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 103. С. 857.
14. Андреев М. В., Кузнецов В. С., Скакун В. С., Соснин Э. А., Панарин В. А., Тарасенко В. Ф. / Прикладная физика. 2016. № 6. С. 32.
15. Сорокин Д. А., Белоплотов Д. В., Гришков А. А., Шкляев В. А., Тарасенко В. Ф., Беломытцев С. Я., Ломаев М. И. Высоковольтный наносекундный разряд в неоднородном электрическом поле и его свойства. – Томск: STT, 2020.
16. Соснин Э. А., Панарин В. А., Панченко А. Н., Скакун В. С., Сорокин Д. А. Способ получения вакуумного ультрафиолетового излучения. Патент RU 2844454 С1. Заявка № 2024119294. Приоритет: 10.07.2024. Оpubл.: 30.07.2025. Бюл. № 22.
17. Панченко А. Н., Белоплотов Д. В., Панарин В. А., Скакун В. С., Сорокин Д. А. / Оптика и спектроскопия. 2025. Т. 133. С. 719.
18. Соснин Э. А., Бабаева Н. Ю., Кожевников В. Ю., Козырев А. В., Найдис Г. В., Панарин В. А., Скакун В. С., Тарасенко В. Ф. / УФН. 2021. Т. 191. С. 199.
19. Сумм Б. Д., Горюнов Ю. В. Физико-химические основы смачивания и растекания. – М.: Химия, 1976.
20. Schneider C. A., Rasband W. S., Eliceiri K. W. / Nat. Methods. 2012. Vol. 9. P. 671.

PACS: 33.20.Ni; 52.50.Dg; 52.77.-j; 61.30.Hn

Effect of non-equilibrium atmospheric plasma on the hydrophilicity of metal surfaces

D. V. Beloplotov^{1,*}, V. S. Skakun¹, D. A. Sorokin^{1,2}, E. A. Sosnin^{1,2}, V. A. Panarin¹,
and B. A. Zaitsev²

¹ Institute of High Current Electronics, SB RAS
2/3 Akademicheskii Ave., Tomsk, 634055 Russia

*E-mail: rff.qep.bdim@gmail.com

² Tomsk State University, Tomsk, 634050 Russia

Received 21.10.2025; revised 7.11.2025; accepted 20.02.2026

The comparative effect of non-equilibrium atmospheric pressure plasma on the contact angle of metal surfaces (Cu, stainless steel, Al-Mg alloy) was determined. The plasma was generated using apokampic and nanosecond diffuse discharges in air and in an argon jet. Treatment for 15, 30, 60, 120 and 240 sec revealed that a 30–60 sec treatment is sufficient in all cases to achieve maximum hydrophilicity. The apokampic discharge in air and the pulsed discharge in an argon flow, which are simpler in technical implementation, are not inferior to the nanosecond atmospheric discharge in their ability to increase hydrophilicity. Partial preservation of the hydrophilic properties was noted for 24 hours after all three types of treatment.

Keywords: apokampic discharge, vacuum ultraviolet radiation VUV, nanosecond diffuse discharge, non-equilibrium low-temperature plasma, plasma jet.

REFERENCES

1. Massines F., Rabehi A., Decomps P., Gadri R. B., Segur P., and Mayoux C., J. Appl. Phys. **83**, 2950 (1998).
2. Klages C.-P., Hopfner K., Klake N., and Thyen R. Proc. Int. Symp. on High Pressure Low Temperature Chemistry, Hakone VII. 2000, p. 429.
3. Tendero C, Tixier Ch., Tristant P., Desmaison J., and Leprince P., Spectrochimica Acta Part B **61**, 2 (2006).

4. Schutze A., Jeong J. Y., Babayan S. E., Park J. Y., Selwyn G. S., and Hicks R. F., *IEEE Trans. Plasma Sci.* **26**, 1685 (1998).
5. Shao T., Zhang C., Wang R., Zhou Y., Xie Q., and Fang Z., *IEEE Trans. Plasma Sci.* **43**, 726 (2015).
6. Penkov O. V., Khadem M., Lim W.-S., and Kim D.-E., *J. Coat. Technol. Res.* **12**, 225 (2015).
7. Sidorova S. V., Moiseev K. M., Vasilev D. D., Nazarenko M. V., and Mikhailova I. V., *Photonics* **16**, 288 (2022).
8. Kim M. C., Yang S. H., Boo J. H., and Han J. G., *Surf. Coat. Technol.* **174–175**, 839 (2003).
9. Tang S., Kwon O. J., Lu N., and Choi H. S., *Korean J. Chem. Eng.* **21**, 1218 (2004).
10. Prysiaznyi V., *J. Surf. Eng. Mat. Adv. Technol.* **3**, 138 (2013).
11. Liu X., Chen F., Huang Sh.-A., Yang X.-L., Lu Y., Zhou W. L., and Xu W.-J., *IEEE Trans. Plasma Sci.* **43**, 1959 (2015).
12. Kanbir Ö., Ayas K., and Çavdar K., *Materials Testing*. **67**, 875 (2025).
13. Sosnin E. A., Skakun V. S., Panarin V. A., Pechenitsin D. S., Tarasenko V. F., and Baksht E. Kh., *JETF Letters*. **103**, 761 (2016).
14. Andreev M. V., Kuznetsov V. S., Skakun V. S., Sosnin E. A., Panarin V. A., and Tarasenko V. F., *Applied Physics*, № 6, 32 (2016) [in Russian].
15. Sorokin D. A., Beloplotov D. V., Grishkov A. A., Shklyayev V. A., Tarasenko V. F., Belomyttsev S. Ya., and Lomaev M. I. High-voltage nanosecond discharge in an inhomogeneous electric field and its properties. Tomsk, STT, 2020 [in Russian].
16. Sosnin E. A., Panarin V. A., Panchenko A. N., Skakun V. S., and Sorokin D. A. Sposob polucheniya vakuumnogo ul'trafiol'tovogo izlucheniya. Patent RU 2844454 C1. Application № 2024119294. Priority: 10.07.2024. Published: 30.07.2025. Bull. 22.
17. Panchenko A. N., Beloplotov D. V., Panarin V. A., Skakun V. S., and Sorokin D. A., *Optics and Spectroscopy* **133**, 719 (2025) [in Russian].
18. Sosnin E. A., Babaeva N. Yu., Kozyrev A. V., Kozhevnikov V. Yu., Naidis G. V., Skakun V. S., Panarin V. A., and Tarasenko V. F., *Phys. Usp.* **64**, 191 (2021).
19. Summ B. D. and Goryunov Yu. V. *Physico-chemical bases of wetting and spreading*. Moscow, Khimiya, 1976 [in Russian].
20. Schneider C. A., Rasband W. S., and Eliceiri K. W., *Nat. Methods*. **9**, 671 (2012).

Об авторах

Белоппотов Дмитрий Викторович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН (634055, Россия, г. Томск, просп. Академический, 2/3). E-mail: dv.beloplotov@hcei.ru SPIN-код: 1677-3530, AuthorID: 688871

Скакун Виктор Семенович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН (634055, Россия, г. Томск, просп. Академический, 2/3). E-mail: vs.skakun@hcei.ru SPIN-код: 8772-3430, AuthorID: 40357

Сорокин Дмитрий Алексеевич, к.ф.-м.н., заведующий лабораторией, Институт сильноточной электроники СО РАН (634055, Россия, г. Томск, просп. Академический, 2/3); Национальный исследовательский Томский государственный университет (634050, Россия, г. Томск, просп. Ленина, 36). E-mail: da.sorokin@hcei.ru SPIN-код: 6447-6366, AuthorID: 614296

Соснин Эдуард Анатольевич, д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН (634055, Россия, г. Томск, просп. Академический, 2/3); Национальный исследовательский Томский государственный университет (634050, Россия, г. Томск, просп. Ленина, 36). E-mail: ea.sosnin@hcei.ru SPIN-код: 1546-9106, AuthorID: 40356

Панарин Виктор Александрович, к.ф.-м.н., научный сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН (634055, Россия, г. Томск, просп. Академический, 2/3). E-mail: va.panarin@hcei.ru SPIN-код: 4482-5747, AuthorID: 505811

Зайцев Богдан Александрович, магистрант, Национальный исследовательский Томский государственный университет (634050, Россия, г. Томск, просп. Ленина, 36). E-mail: bogdanzaitsev683@gmail.com