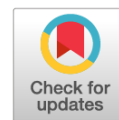


DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-637194>

Оригинальное исследование



Анализ влияния ионной имплантации на коррозионностойкость и загрязняемость поверхностей теплообмена

И.Л. Савельев, Л.А. Марюшин, Е.А. Чугаев, И.С. Сёмочкин

Московский политехнический университет, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. В статье рассматривается проблема повышения энергетической эффективности и долговечности теплообменного оборудования. Особое внимание уделяется улучшению характеристик поверхностей теплообмена теплообменных аппаратов, которые играют ключевую роль во многих отраслях промышленности. Обсуждаются проблематика загрязнения и коррозии поверхностей теплообмена и причины, приведшие к ним.

Цель — анализ влияния ионной имплантации на загрязняемость и коррозионностойкость поверхностей теплообмена теплообменного оборудования.

Методы. В рамках данного исследования применялись методы сравнительного анализа для фиксации изменения состава поверхностного слоя исследуемых образцов. Исследование микротвёрдости проводилось в направлении от поверхности в глубину испытуемого образца с помощью прибора Neophot-2 на поперечных металлографических шлифах, вырезанных перпендикулярно имплантации.

Результаты. В ходе исследования были получены данные о изменении микротвёрдости образцов алюминия после имплантации азотом, а также о изменениях структурного состава поверхностных слоёв и повышении устойчивости к коррозии, загрязняемости и длительному воздействию ПАВ.

Заключение. По итогу работы можно сказать, что падение энергетической эффективности в связи с загрязнением поверхностей теплообмена больше проявляется в теплообменных аппаратах, в которых изначально было заложено высокое значение коэффициента теплопередачи. Ионная имплантация не только повышает микротвёрдость и износостойкость материалов, но и препятствует появлению оксидной плёнки, что в свою очередь уменьшает загрязняемость поверхности теплообмена, а также делает поверхность теплообмена менее восприимчивой к длительному воздействию ПАВ.

Ключевые слова: ионная имплантация; теплообмен; энергоэффективность; долговечность; теплообменное оборудование.

Как цитировать:

Савельев И.Л., Марюшин Л.А., Чугаев Е.А., Сёмочкин И.С. Анализ влияния ионной имплантации на коррозионностойкость и загрязняемость поверхностей теплообмена // Известия МГТУ «МАМИ». 2024. Т. 18, № 4. С. 263–271. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-637194>

DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-637194>

Original Study Article

Analysis of the effect of ion implantation on corrosion resistance and contamination of heat transfer surfaces

Ilya L. Savelev, Leonid A. Marushin, Evgeniy A. Chugaev, Ilya S. Semochkin

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: The paper addresses the problem of improving the energy efficiency and durability of heat exchange equipment. Particular attention is paid to improving the characteristics of heat exchange surfaces of heat exchangers, which play an essential role in many industries. The range of issues of pollution and corrosion of heat exchange surfaces and the causes that led to them are discussed.

OBJECTIVE: Analysis of the effect of ion implantation on the contamination and corrosion resistance of heat exchange surfaces of the heat exchange equipment.

METHODS: Within the framework of this study, comparative analysis methods to record changes in the composition of the surface layer of the samples under study were used. Microhardness studies were carried out in the direction from the surface to the depth of the test sample using the Neophot-2 device on transverse metallographic sections, which were cut perpendicular to the implantation.

RESULTS: During the study, the data on changes in microhardness of aluminum samples after nitrogen implantation were obtained, as well as the data on changes in the structural composition of surface layers and increased resistance to corrosion, contamination, and prolonged exposure to surfactants.

CONCLUSIONS: As a result of the study, it can be said that a decrease in energy efficiency due to contamination of heat exchange surfaces is more pronounced in heat exchangers in which a high value of the heat transfer coefficient was initially designed. Ion implantation not only increases the microhardness and wear resistance of materials, but also prevents the appearance of an oxide film, which in turn reduces the contamination of the heat exchange surface, and also makes the heat exchange surface less susceptible to prolonged exposure to surfactants.

Keywords: ion implantation; heat transfer; energy efficiency; durability; heat exchange equipment.

To cite this article:

Savelev IL, Marushin LA, Chugaev AE, Semochkin IS. Analysis of the effect of ion implantation on corrosion resistance and contamination of heat transfer surfaces. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2024;18(4):263–271. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-637194>

Received: 18.10.2024

Accepted: 21.12.2024

Published online: 21.12.2024

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире, где технологии развиваются стремительно, вопросы повышения энергетической эффективности и долговечности теплообменного оборудования становятся всё более актуальными. Одним из ключевых аспектов в этой области является улучшение характеристик поверхностей теплообмена энергетического оборудования, которое играет важную роль во многих промышленных процессах. Традиционные методы модификации поверхностей теплообмена, такие как оребрение, лункование, установка турбулизаторов потока, искусственная шероховатость поверхности, закрутка потока спиральными рёбрами, использование спиральных труб, создание щелевых каналов, использование наклонных поверхностей, воздействие на рабочий агент акустических, пульсационных, магнитных и электрических полей, воздействие на поверхность теплообмена путём вибрации и вращения [1–2], имеют свои ограничения и не всегда обеспечивают желаемый результат.

Одним из перспективных направлений в сфере интенсификации теплообмена является использование ионной имплантации — процесса, позволяющего внедрять атомы или ионы в поверхностный слой материала, изменяя его свойства на микроуровне. Как показано в работе [5], ионная имплантация может привести к изменению поверхностной структуры материала, такой как создание микроканалов, лагун и наплавов. Это может увеличить площадь поверхности теплообмена, улучшить её смачиваемость и повысить эффективность теплоотдачи в режиме кипения жидкости. Ионная имплантация может усилить стойкость материала к высоким температурам, улучшить его жаростойкость. Это может способствовать также повышению интенсивности кипения, поскольку материал будет менее подвержен повреждению в условиях высоких температур и интенсивных тепловых потоков.

Однако вопрос о влиянии ионной имплантации на коррозионностойкость поверхностей теплообмена остаётся малоизученным.

ЦЕЛЬ

Целью данного исследования является анализ влияния ионной имплантации на загрязняемость и коррозионностойкость поверхностей теплообмена теплообменного оборудования.

МЕТОДЫ

В рамках данного исследования применялись методы сравнительного анализа для фиксации изменения состава поверхностного слоя исследуемых образцов. Исследования микротвёрдости проводились в направлении от поверхности в глубину испытуемого образца с помощью прибора Neophot-2 на поперечных металлографических шлифах, вырезанных перпендикулярно имплантации.

На первом этапе авторами был проведён анализ влияния коррозии и отложений теплообменных поверхностей на интенсивность процесса теплообмена. Современные теплообменные аппараты работают при высоких температурах и давлении, поэтому износ поверхностей теплообмена — распространённое явление. Теплообменное оборудование не всегда вырабатывает заложенный срок службы, и одна из причин — неудовлетворительное качество воды.

Вода — один из самых распространённых теплоносителей в энергетике и промышленности благодаря хорошим теплофизическим свойствам, безопасности и доступности.

Вода должна проходить процедуру химводоподготовки, чтобы снизить загрязняющие отложения в теплообменных аппаратах и энергооборудовании. Однако на практике не всегда используется вода надлежащего качества. Основные причины этого: отсутствие систем химводочистки, несоответствие системы водоподготовки качеству исходной воды, отключение системы химводочистки при отсутствии расходных материалов, халатное отношение персонала.

Использование воды ненадлежащего качества приводит к ускоренному загрязнению теплообменных поверхностей, особенно в испарительных аппаратах. Паровая фаза не способна унести с собой большое количество загрязняющих элементов, и они осаждаются на теплообменных поверхностях. Так, на рис. 1 и 2 показаны различные варианты загрязнений теплообменных поверхностей пластинчатых и кожухотрубных аппаратов.

Как видно из рис. 1 и 2, на поверхностях теплообмена образуется большое количество первичной накипи и продуктов коррозии металла. Согласно [6], основными компонентами отложений являются карбонат кальция, сульфат кальция, оксиды железа, фосфаты, сульфаты и др.

Как показано в работах [7–9], отложения на поверхности теплообмена отрицательно сказываются на величине коэффициента теплопередачи, что связано с низкой теплопроводностью веществ, входящих в состав отложений. Так, по данным [7], слой отложений толщиной в один миллиметр по термическому сопротивлению R_{λ} соответствует сорокамиллиметровой стальной стенке.

Чтобы наиболее полно показать влияние отложений на коэффициент теплоотдачи, рассмотрим взаимосвязь между толщиной слоя отложений и коэффициентом теплопередачи в совокупности с отношением расчётного коэффициента теплопередачи к изменённому $k_{\text{загр}}$ вследствие загрязнения теплообменной поверхности.

Принимая в качестве допущения, что истощаемость слоя материала поверхности теплообмена вследствие износа мала, можем записать отношение расчётного коэффициента теплопередачи к изменённому из-за загрязнения

выражением:

$$\frac{k_{\text{загр}}}{k_0}$$

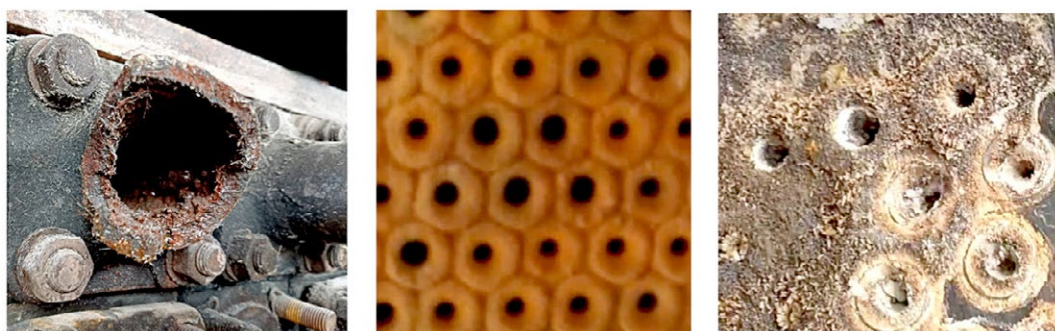


Рис. 1. Загрязнение кожухотрубного теплообменного аппарата.

Fig. 1. Contamination of a shell-and-tube heat exchange device.



Рис. 2. Загрязнение пластинчатых теплообменных аппаратов.

Fig. 2. Contamination of plate heat exchange devices.

$$\frac{k_{\text{загр}}}{k_0} = \frac{1}{1 + k_0 \cdot \frac{\delta_{\text{отл}}}{\lambda_{\text{отл}}}}, \quad (1)$$

где k_0 — расчётный коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К); $k_{\text{загр}}$ — изменённый вследствие загрязнения коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К); $\delta_{\text{отл}}$ — толщина слоя отложений, м; $\lambda_{\text{отл}}$ — коэффициент теплопроводности слоя отложений, Вт/(м·К).

Получив зависимость $k_{\text{загр}}/k_0$ от $\delta_{\text{отл}}$ в выражении (1),

построим график (рис. 3) для диапазона значений k_0 от 800 до 9000 Вт/(м²·К). Данный диапазон охватывает большую часть рабочих режимов теплообменных аппаратов.

Как видно из рис. 1, с увеличением толщины отложений отношение $k_{\text{загр}}/k_0$ стремительно убывает. Также

стоит отметить, что наиболее заметно влияние толщины отложения на такие теплообменные аппараты, в которых изначально было заложено высокое значение коэффициента теплопередачи. Говоря другими словами, чем больше начальное значение коэффициента теплопередачи, тем сильнее на него оказывает влияние загрязнение.

Согласно работам [10–12], заметное снижение коэффициента теплопередачи даже после одного года работы

теплообменного оборудования составляет 5%, после второго — 15%, после третьего и далее — 25%, а слой отложений толщиной от 5 до 10 мм приводит к перерасходу тепловой энергии от 30% до 200% в зависимости от состава отложений и вида используемого оборудования.

Учитывая вышесказанное, борьба с отложениями в теплообменном оборудовании является одной из наиболее важных задач, которая непосредственно связана с задачами продления срока службы, снижения аварийности при эксплуатации и повышения энергетической эффективности энергооборудования.

Одним из способов борьбы с загрязнениями поверхностей теплообмена может являться ионная имплантация. Исследования, проведённые авторами, показали, что существенную роль в структурных переходах при ионной имплантации играет возбуждение электронной подсистемы [13]. Это облегчает перестройку электронных конфигураций атомных остатков, и валентные состояния изменяются (что характерно в первую очередь для переходных металлов).

О глубоких изменениях структуры в процессе ионной имплантации свидетельствуют результаты исследований микротвёрдости и распределения элементов в поверхностном слое материалов.

Для анализа были взяты три сплава алюминия: 1160 (Д16), 1190 (Д19), 1420 (сплав системы *Al-Mg-Li* отличается от сплава 1160 пониженной на 11% плотностью

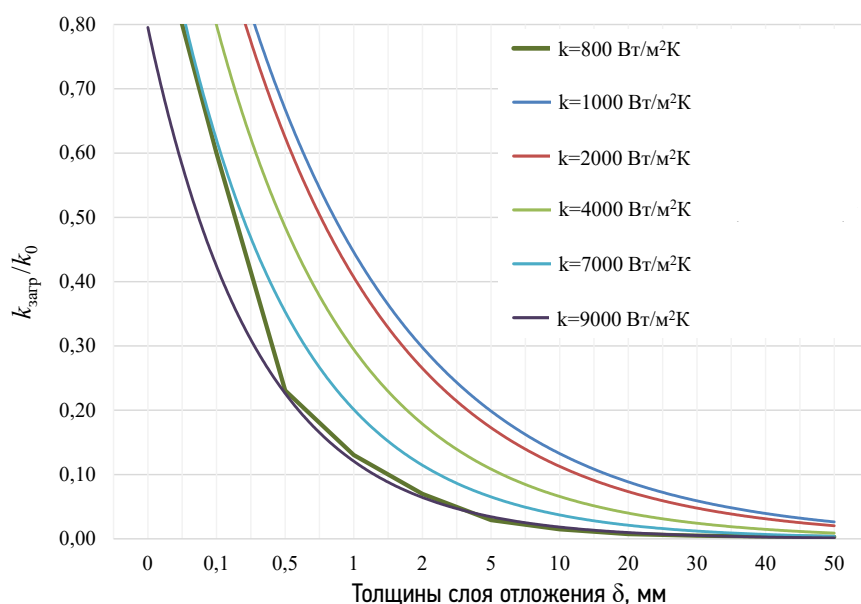


Рис. 3. Зависимость $k_{\text{загр}}/k_0$ от толщины слоя отложения δ .

Fig. 3. Dependence of $k_{\text{загр}}/k_0$ on deposit layer thickness δ .

и повышенным на 4% модулем упругости) подвергнутые имплантации ионами азота. Энергия имплантации $E=5$ КэВ, концентрация ионов $D=10^{18}$ ион-см², $t=200$ °С.

РЕЗУЛЬТАТЫ

По результатам анализа была построена зависимость микротвёрдости от расстояния до поверхности алюминиевых сплавов после ионной имплантации (рис. 4).

Как видно из рис. 4, для образца 1190 поверхность сплава упрочняется, а на расстоянии 30–70 мкм от поверхности образца алюминиевого сплава происходит постепенное разупрочнение и микротвёрдость сплава плавно снижается до значений твёрдости основы — 100 МПа.

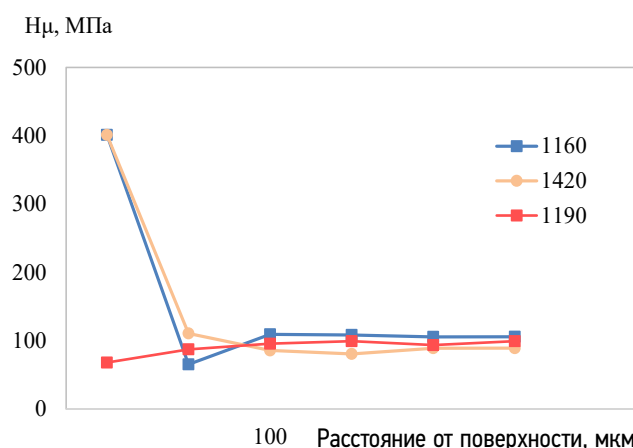


Рис. 4. Зависимость микротвёрдости от расстояния до поверхности алюминиевых сплавов после ионной имплантации азотом.

Fig. 4. Dependence of microhardness on the distance to the aluminum alloy surface after ion implantation with nitrogen.

Сплав 1420 в результате ионной имплантации упрочняется, при этом значения его микротвёрдости у поверхности составляют 410 МПа, после чего следует постепенное снижение данной характеристики на расстоянии 40–50 мкм от поверхности вплоть до значений микротвёрдости основы 110 МПа. Что же касается образца 1160, то в нём происходит разупрочнение сплава, при этом значения твёрдости у поверхности составляют около 65 МПа, что существенно ниже, чем твёрдость основы (110 МПа).

С помощью локального микрорентгеноспектрального анализа были определены локальный химический состав включений, фаз, зёрен, а также отдельных элементов между структурными составляющими. Результаты анализа приведены на рис. 5.

На рис. 5 представлено качественное распределение в глубь элементов *Cu*, *Mg*, *Al* в поверхностном слое сплавов 1420, 1190 и 1160.

На исследуемом образце сплава 1160 после имплантации на расстоянии ≈ 100 мкм наблюдается уменьшение содержания элементов алюминия, а на расстоянии ≈ 150 мкм — увеличение содержания элементов магния и меди.

На образце 1190 наблюдается увеличение содержания элементов меди на расстоянии ≈ 150 мкм и элементов магния на расстоянии ≈ 50 мкм. Содержание элементов алюминия в поверхностном слое уменьшилось на расстоянии ≈ 100 мкм.

На образце 1420 наблюдается перераспределение элементов основы, при этом наиболее активно участвовали с образованием нитридов магния и алюминия, которые имеют меньшую энергию образования нитридов по сравнению с медью.

Принимая во внимание изменение микротвёрдости материала, а также структурные изменения состава

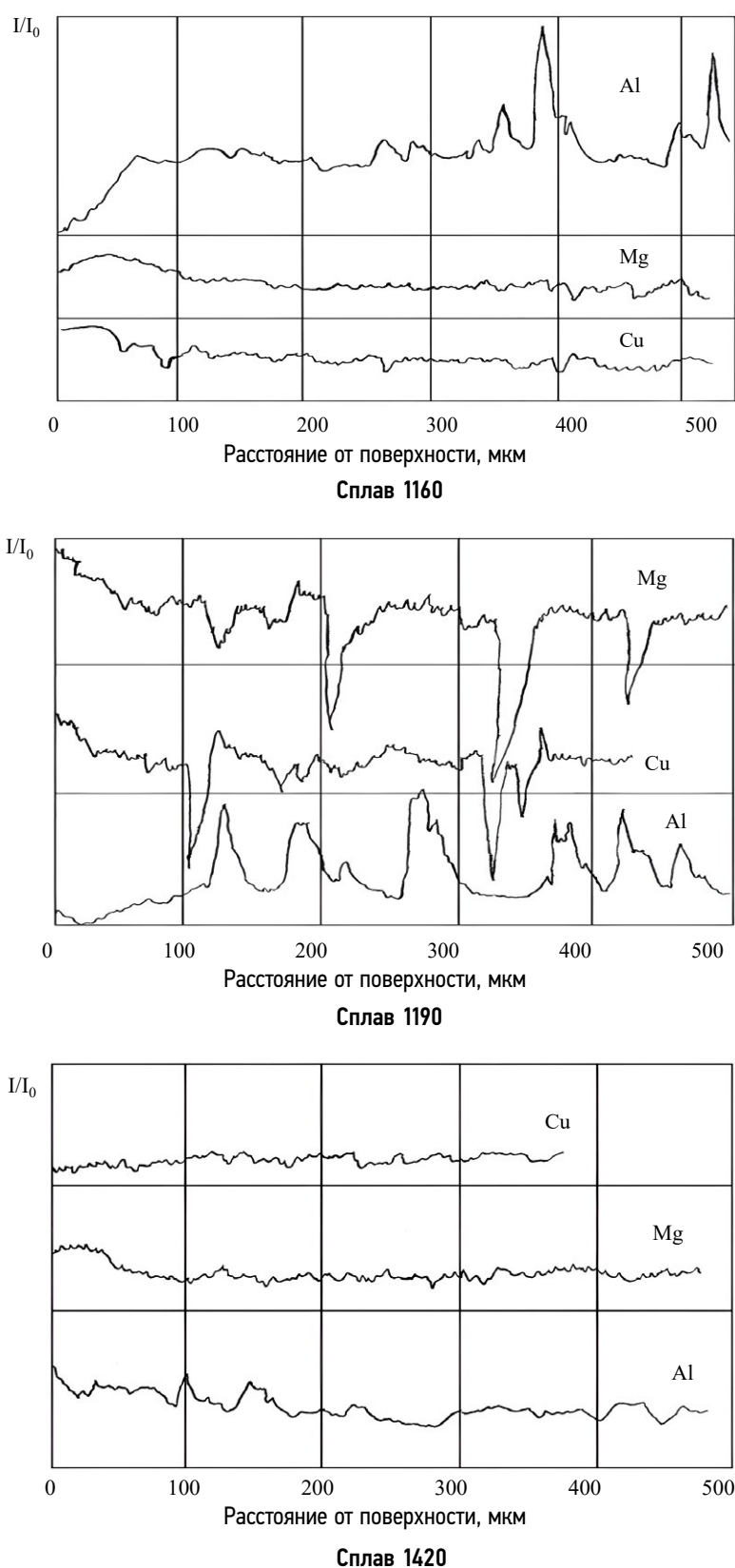


Рис. 5. Распределение элементов в поверхностном слое сплавов алюминия.

Fig. 5. Distribution of elements in a surface layer of aluminum alloys.

поверхностных слоёв после ионной имплантации, можно сделать вывод о том, что будут изменяться и свойства материала. Для подтверждения данной гипотезы были проведены исследования влияния ионной имплантации на краевой угол смачивания и загрязняемости поверхности теплообмена.

Для проведения измерения краевого угла смачивания образец помещался на предметный столик и с помощью перемещающегося механизма устанавливался под объективом. Формирование капли на исследуемой поверхности производилось путём подачи жидкости с помощью шприца объёмом 1 мл иглой, внутренний диаметр которой равен 0,23 мм, а внешний — 0,4 мм. Результаты определения краевого угла смачивания представлены на рис. 6.

На рис. 6. наглядно видно изменение краевого угла смачивания после имплантации с 20° до 50° , что свидетельствует о гидрофобизации поверхности рабочей ячейки. Изменение свойств поверхности теплообмена может оказывать прямое влияние на плотность работающих центров парообразования, как показано в работе [14].

Следующим этапом работы стала экспериментальная проверка влияния ионной имплантации на загрязняемость поверхностей теплообмена. На рис. 7 и 8 показаны результаты серии опытов с кипячением загрязнённых жидкостей,

воздействия ПАВ и имитацией неправильной консервации промышленного теплообменного оборудования.

Как видно из рис. 7, *a*, при воздействии на стандартную поверхность ПАВ образуется плотный нерастворимый осадок, имеющий пористую структуру. Появление осадка обусловлено взаимодействием ПАВ с оксидной плёнкой алюминия. Данный эффект происходит из-за наличия в составе ПАВ октадециламин (ОДА). На рис. 7, *b* показана имплантированная поверхность. Под воздействием ионной имплантации изменяется структура поверхностных слоёв, и, как следствие, полностью пропадает оксидная плёнка алюминия, что в свою очередь устраняет проблему нежелательного взаимодействия с ОДА и даёт возможность применения ПАВ для алюминиевых поверхностей теплообмена.

На рис. 8 показаны результаты кипячения загрязнённой жидкости. В качестве загрязнителя использовались битумный герметик, высокоминерализованная вода и сырая вода с высоким содержанием железа. Как видно из рис. 8, на стандартной поверхности наблюдается большое количество отложений даже после промывания проточной водой (промывание проводилось как для стандартной, так и для имплантированной поверхности).

Для поверхности с ионно-плазменной имплантацией (см. рис. 8, *b*) нерастворимого осадка не наблюдается.

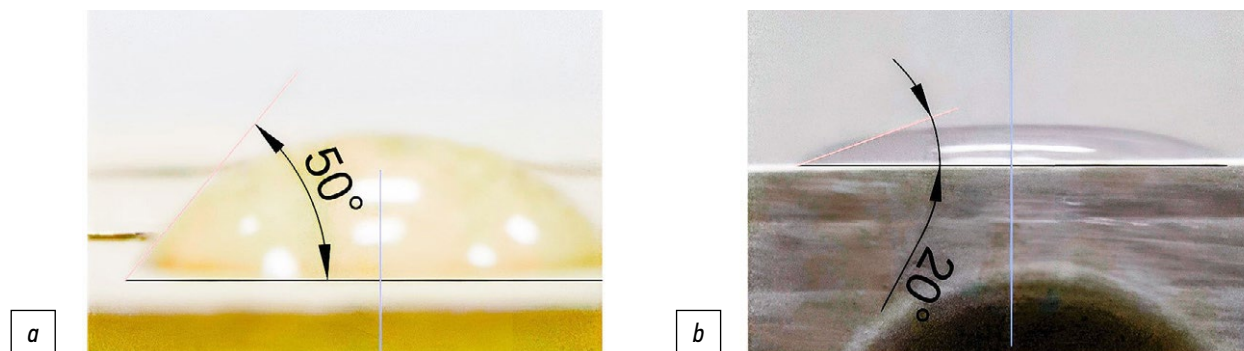


Рис. 6. Определение краевого угла смачивания на (а) имплантированной поверхности, (b) стандартной поверхности.
Fig. 6. Definition of wetting angle at (a) the implanted surface and (b) at the basic surface.

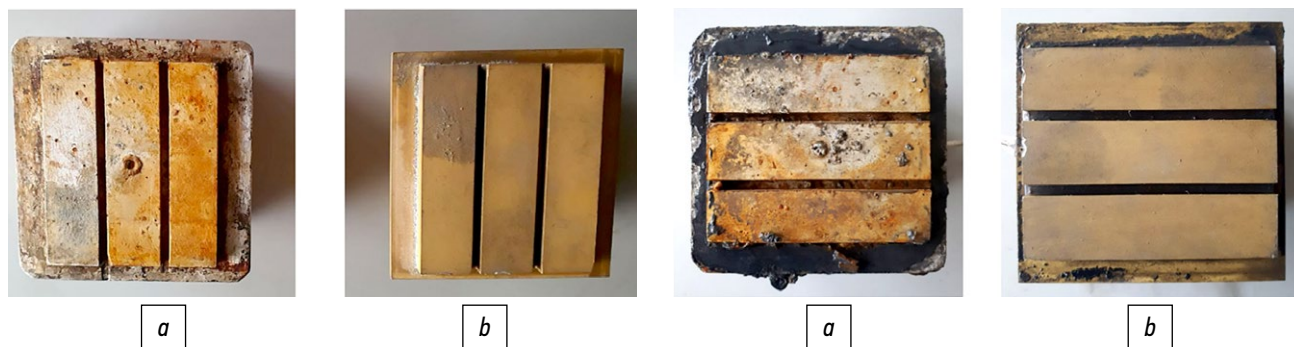


Рис. 7. Воздействие на теплопередающую ячейку ПАВ и неправильной консервации: *a* — неимплантированная ячейка; *b* — имплантированная ячейка.

Fig. 7. Impact on the heat-transfer cell with surfactants and incorrect conservation: *a* — the non-implanted cell; *b* — the implanted cell.

Рис. 8. Результаты кипячения загрязнённых жидкостей: *a* — неимплантированная ячейка; *b* — имплантированная ячейка.

Fig. 8. Results of boiling of contaminated liquids: *a* — the non-implanted cell; *b* — the implanted cell.

Это объясняется тем, что после имплантации на поверхности вообще отсутствует видимая оксидная плёнка. На рис. 8, *b* видно, что после имплантации осаждение на поверхность происходит в гораздо меньшей степени, загрязняющие вещества легко «отрываются» при перемешивании объёмов жидкости во время развитого пузырькового кипения, а остатки веществ легко удаляются во время промывки.

ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование влияния ионной имплантации на алюминиевые сплавы показало, что имплантация может приводить не только к упрочнению, но и к разупрочнению поверхностного слоя. Изменения в содержании элементов *Si*, *Mg*, *Al* на разных глубинах для каждого из исследованных сплавов указывают на то, что и химические свойства поверхности будут изменяться вслед за химическим составом.

Результаты исследования краевого угла смачивания и загрязняемости поверхностей теплообмена демонстрируют потенциальное практическое применение полученных знаний. Увеличение краевого угла смачивания после имплантации указывает на улучшение гидрофобных свойств поверхности, что может быть полезно в различных областях, таких как создание самоочищающихся покрытий или защита от коррозии. Снижение загрязняемости имплантированных поверхностей также подчёркивает их преимущества перед традиционными методами обработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Падение энергетической эффективности в связи с загрязнением поверхностей теплообмена больше проявляется в теплообменных аппаратах, в которых изначально было заложено высокое значение коэффициента теплопередачи.
2. Ионная имплантация не только повышает микротвёрдость и износостойкость материалов, но и препятствует появлению оксидной плёнки, что в свою очередь уменьшает загрязняемость поверхности теплообмена, а также делает поверхность теплообмена менее восприимчивой к длительному воздействию ПАВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Velichko VI, Pronin VA. *Intensification of heat transfer and increase of energy efficiency of convective heat transfer surfaces*. Moscow: MEI; 1999. (In Russ.)
2. Guhman AA. Intensification of convective heat transfer and the problem of comparative evaluation of heat exchangers. *Heat power engineering*. 1977;4:5–8. (In Russ.)
3. Bergles AE, Fuller WD, Hynek SJ. Dispersed flow film boiling of nitrogen with swirl flow. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1971;14(4):1343–1354. doi: 10.1007/978-1-4757-0244-6_53

3. Данные результаты могут быть испробованы в качестве рекомендаций при проектировании промышленного испарительного и теплообменного оборудования, особенно при использовании в качестве теплоносителя агрессивных сред.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. И.Л. Савельев — написание текста рукописи, редактирование текста рукописи; Л.А. Марюшин — экспертная оценка, утверждение финальной версии; Е.А. Чугаев — создание изображений, подбор ПАВ; И.С. Сёмочкин — поиск публикаций по теме статьи. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с проведённым исследованием и публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования и подготовке публикации.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. I.L. Savelev — writing the text of the manuscript, editing the text of the manuscript; L.A. Marushin — expert opinion, approval of the final version; E.A. Chugaev — creating images, selection of surfactants; I.S. Semochkin — search for publications on the topic of the article. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding

4. Subbotin VI, Kaznovskiy SP, Salenkevich AP. Experimental study of ways to increase the critical power of steam generating pipes. *Izv. AN SSSR. Energy and transport*. 1974;2:162–170. (In Russ.)
5. Anishchika VM, Poliaka NI, Ponaryadova VV, et al. Effect of High Energy Ion Implantation on the Structure and Mechanical Properties of Aluminium Alloys. *Acta Physica Polonica Series a*. 2017;132(2):291–294. doi: 10.12693/APhysPolA.132.291

6. Chauhan K, Sharma Gh, Chauhan S. Chapter 29: Removal/ Dissolution of Mineral Scale Deposits. In: *Mineral Scales and Deposits*. 2015:701–720. doi: 10.1016/B978-0-444-63228-9.00029-2
7. Miheev MA, Miheeva IM. Basics of heat transfer. Moscow: Energy; 1973. (In Russ.)
8. Baron VG. Legends and myths of modern heat engineering or plate and shell-and-tube heat exchangers. *Heat supply news*. 2004;8:38–42. (In Russ.)
9. Draecer GA. About some problems of creating highly efficient tubular heat exchangers. *Heat supply news*. 2004;5:37–43. (In Russ.)
10. Tarasuk VM. *Boiler operation*. Kuev: Base; 2000. (In Russ.)
11. Andreev AG. About the prevention of additional heat losses caused by the formation of scale. *Energy*

- saving and water treatment*. 2003;1:92–94. (In Russ.) doi: 10.1069/ESW.2003.1.92–94
12. Slepchenok VS, Bistrov VD, Zak ML, Pakey EL. Low-power heating boilers. *Heat supply news*. 2004;9:24–33. (In Russ.)
13. Valiev RZ, Aleksandrov IV. *Nanostructured materials obtained by intensive plastic deformation*. Moscow: Logos; 2000. (In Russ.)
14. Wang CH, Dhir VK. Effect of surface wettability on active nucleation site density during pool boiling of water on a vertical surface. *J. Heat Transfer*. 1993;115(3):659–669. doi: 10.1115/1.2910737
15. Usanova OYu, Ryazantseva AV, Savelev IL, Timohin VS. Effect of ion implantation on the properties of implantable aluminum alloys. *J. Phys. Conf. Ser.* 2020;1515. doi: 10.1088/1742-6596/1515/2/022074

ОБ АВТОРАХ

* Савельев Илья Леонидович,

аспирант кафедры «Промышленная теплоэнергетика»;
адрес: Россия, 107023, Москва,
ул. Большая Семёновская, д. 38;
ORCID: 0000-0003-0865-3826;
eLibrary SPIN: 7043-6439;
e-mail: totoroboy@mail.ru

Марюшин Леонид Александрович,

канд. техн. наук,
доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика»;
ORCID: 0009-0000-5240-0186;
eLibrary SPIN: 3812-2917;
e-mail: katzbalger@ya.ru

Чугаев Евгений Анатольевич,

аспирант кафедры «Промышленная теплоэнергетика»;
ORCID: 0009-0008-5799-2166;
eLibrary SPIN: 9726-3492;
e-mail: kafedrapte@gmail.com

Сёмочкин Илья Сергеевич,

аспирант кафедры «Промышленная теплоэнергетика»;
ORCID: 0009-0001-6057-6138;
e-mail: ipc77@mail.ru

AUTHORS' INFO

* Ilya L. Savelev,

Postgraduate of the of the Industrial Heat Power Engineering Department;
address: 38 Bolshaya Semenovskaya st, Moscow, Russia, 107023;
ORCID: 0000-0003-0865-3826;
eLibrary SPIN: 7043-6439;
e-mail: totoroboy@mail.ru

Leonid A. Marushin,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Industrial Heat Power Engineering Department;
ORCID: 0009-0000-5240-0186;
eLibrary SPIN: 3812-2917;
e-mail: katzbalger@ya.ru

Evgeniy A. Chugaev,

Postgraduate of the Industrial Heat Power Engineering Department;
ORCID: 0009-0008-5799-2166;
eLibrary SPIN: 9726-3492;
e-mail: kafedrapte@gmail.com

Ilya S. Semochkin,

Postgraduate of the Industrial Heat Power Engineering Department;
ORCID: 0009-0001-6057-6138;
e-mail: ipc77@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author