

УДК 536.24 621.384.6

СТАЛЬНЫЕ НАГРЕВАТЕЛИ С ИМПЛАНТИРОВАННЫМ ТИТАНОМ**Катруха А.В.¹, Гончаров В.В.², Зажигалов В.А.³**¹*Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, Харьков, Украина*²*Институт химических технологий Восточноевропейского национального университета имени Владимира Даля (Рубежное), Рубежное, Украина.*³*Институт сорбции и проблем эндоэкологии НАНУ, Киев, Украина***АННОТАЦИЯ**

В статье рассмотрен вопрос применения в качестве нагревателей имплантатов, содержащих ионы титана и азота на поверхности нержавеющей стали. С помощью ионной имплантации синтезированы образцы на основе металлической фольги (сталь марки 12X18H10T) толщиной 0.1 мм. Образцы обрабатывались до дозы $5 \cdot 10^{17}$ ион/см².

Проведено сравнение коэффициентов теплоотдачи от полученных образцов и нихромовой спирали в зависимости от потребляемой мощности. Теплоотдачу конвективную изучали как теплоперенос от имплантата к воздуху в условиях свободной конвекции. Установлено, что коэффициент теплоотдачи от образцов, модифицированных ионами титана и азота, к воздуху выше, чем для необработанного носителя, хотя уступает нихрому. Радиационную теплоотдачу изучали по отношению к окружающим предметам. Показано, что образец, обработанный ионами титана, при рассмотрении теплопередачи излучением ведет себя как спираль из нихрома, значительно превышая

исходную сталь по коэффициенту радиационной теплоотдачи. Показано, что температуры поверхности обработанных образцов выше, чем у исходного и нихромового при одинаковой потребляемой мощности.

В результате исследований выявлено, что мощность нагревателя с имплантата превышает не только мощность необработанного материала, а и нихрома.

Поскольку публикации по использованию метода ионной имплантации в качестве способа создания нагревательных элементов практически отсутствуют, данное исследование представляет значительный научный интерес. Обработанные образцы оказались энергетически более выгодными, чем даже нихромовый нагреватель. К тому же, учитывая температуры и выделяемую мощность имплантаты с ионами титана можно уверенно рекомендовать для применения в гетерогенных каталитических горелках, которые более экологически чистые, чем гомогенные.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время вопрос энергосбережения является одним из самых актуальных в мировой экономике. Проблема создания экономичных и экологически безопасных нагревательных устройств волнует ученых всего мира. Исследователи заинтересованы делать открытия в области теплофизики, которые позволяют конструировать нагревательные устройства с наибольшим КПД при той же стоимости оборудования и материала.

Для достижения высоких теплофизических показателей производители используют различные материалы. Традиционно, нагревательные элементы, преобразующие электрическую энергию в тепловую, изготавливают из металлов и их сплавов. По сравнению с легированной сталью многие из них (медь, алюминий и т.д.) обладают лучшей

теплопроводностью, более высоким коэффициентом теплоотдачи и другими теплофизическими характеристиками. Но продукция из указанной стали может прослужить ее владельцу гораздо больший срок, так как этот сплав обладает высокой устойчивостью к коррозии, износостойкостью и прочностью. Кроме того, это сравнительно дешевый материал, что делает его очень распространенным сплавом в промышленности. Таким образом, актуальным на данный момент является поиск и разработка технологий, способных повысить теплофизические характеристики легированной стали, что, несомненно, приведет к более широкому её применению для изготовления нагревательных устройств и позволит потребителям покупать более дешевую, но не менее качественную продукцию.

АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Задача увеличения теплоотдачи материала нагревателя всегда интересовала ученых [1, 2]. Практический интерес представляет изучение процесса теплообмена между движущейся средой и поверхностью твердого тела (теплообмена конвекцией) и передачи тепла излучением.

Передача тепла конвекцией широко используется в бытовых отопительных и промышленных устройствах [3]. В наше время при конструировании теплообменных аппаратов главными факторами являются экономия электроэнергии и надежность работы. Требованиям надежности и экономичности в наибольшей степени соответствуют теплообменники, в которых используется механизм свободной конвекции или иначе, свободной циркуляции теплоносителя [4].

С другой стороны, конкурентоспособной является также передача тепла излучением, позволяющая передавать энергию непосредственно обогреваемому объекту, проникая через газовую или жидкую среду, почти без потерь [5, 6].

В последнее время набирает популярность применение каталитических горелок в качестве нагревателей. Такие устройства позволяют проводить процесс горения углеводородных топлив с выделением большого количества радиационной теплоты и минимальным количеством вредных компонентов. Данный факт позволяет создавать на их основе бытовое тепловое оборудование, мобильные нагреватели, реакторы и др. [7-10].

Несмотря на многообразие конструкций нагревателей, для них общим является нагревательный элемент, а предметом исследований – материал, из которого он сделан. Современные радиаторы отопления делают из металлов не случайно. Они имеют наилучшее сочетание физико-химических и механических характеристик, главная из которых - коэффициент теплопередачи.

Несмотря на то, что нержавеющая сталь применяется для создания нагревателей, она имеет невысокий коэффициент теплопередачи [3]. Однако она устойчива к коррозии и стоит значительно меньше цветных металлов (медь, алюминий и др.). Потому, улучшив её теплофизические свойства, можно получить относительно недорогой, но энергоэффективный материал для нагревательных элементов.

Чтобы определиться с технологией модификации материала необходимо учитывать, что теплообмен между телами зависит также от их формы и размеров. Другими важными факторами являются физические свойства тел и агрегатное состояние [11]. В результате перепад температур, геометрия и физические свойства тел, агрегатное состояние и

параметры теплоносителя, а также время процесса будут определять интенсивность теплообмена и количество теплоты, которое переносится.

От величины площади поверхности тепло - и массообмена зависят значения потоков теплоты и массы вещества [1]. Поэтому применение поверхности нагрева с искусственно созданной шероховатостью является одним из возможных путей интенсификации теплоотдачи [12].

В этом плане привлекательным является технология ионной имплантации. Данный метод позволяет вводить ионы целевого компонента непосредственно в поверхностный слой материала или осаждать их на поверхности [13-15]. При этом возможны любые комбинации ион-мишень. Энергия ионов может меняться от нескольких кило электрон-вольт до гигаэлектрон-вольт. Глубина внедрения ионов зависит не только от энергии, но и от массы ионов, а также от массы атомов твердого тела.

Ионная бомбардировка позволяет изменять электрофизические, механические, коррозионные, каталитические, оптические свойства приповерхностной зоны твердого тела [15, 16]. Облучение поверхности твердых тел ионными и плазменными потоками вызывает также изменения рельефа [17, 18].

В работах [19-21] проводились исследования теплофизических и каталитических свойств стали после обработки ионной имплантацией. Результаты свидетельствуют об улучшении теплофизических характеристик после внедрения ионов алюминия [19], что ожидаемо т.к. Al является примесью в легированных сталях, которая повышает жаростойкость сплава. Одновременно с теплофизическими проявляются положительные каталитические свойства у имплантатов с ионами алюминия и титана [20, 21]. Однако способности теплообмена для имплантатов с ионами титана исследованы недостаточно и требуют продолжения.

Учитывая вышесказанное, можно сделать вывод, что применение технологии ионной имплантации позволяет изменять текстуру поверхности, увеличивая среднюю шероховатость и, как следствие, увеличивает удельную площадь поверхности теплообмена. Кроме того, насыщение поверхности ионами примесного металла меняет электро - и теплопроводность поверхности обработанного элемента. Это позволяет рекомендовать ионную имплантацию для конструирования теплообменного оборудования, создания новых более эффективных поверхностей нагрева, а как целевой элемент для исследований целесообразно принять титан.

МЕТОДИКА СИНТЕЗА И ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ

Для образцов в качестве носителя использовали металлическую гофрированную фольгу (рис. 1) длиной 1.8 м и 5 мм в ширину из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т (по ГОСТ 4986-79), в которую методом ионной имплантации (ионного легирования) вводили ионы и нейтральные атомы титана.



Рис. 1 Внешний вид исходной стальной фольги (а) и гофрированного образца (б)

Для обработки образцов использовали установку ионной имплантации (рис. 2), расположенную на кафедре общей физики и технической механики Института химических технологий Восточноевропейского национального университета имени Владимира Даля (г. Рубежное).



Рис. 2 Внешний вид установки ионной имплантации

Процесс проводили на электронно-вакуумной оборудовании по режиму, при котором доза легирования составляла $5 \cdot 10^{17}$ ион / см^2 .

Основным аппаратом для проведения ионной имплантации является вертикальная вакуумная камера, которая коммуникативно связана со вспомогательным оборудованием: блоком питания и управления, высоковакуумным агрегатом (в состав которого входит диффузионный насос с вакуумным затвором). Вакуум в камере контролируется с

помощью электроклапанов, через которые среда откачивается по трубопроводу форвакуумным насосом. Для создания внутри камеры рабочей среды используют азот, который находится в отдельном баллоне.



Рис. 3 Внешний вид установки для исследования теплофизических свойств



Рис. 4 Внешний вид нагревателя с образцом и экраном

Основной составляющей установки является источник ионов и нейтральных атомов, который работает за счет электрического разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях, возникающего в парах легирующего элемента и вспомогательного газа. Для реализации высокой производительности нанесения покрытия используется катодное распыление мишени ионами вспомогательного газа (азота).

Таким образом, из источника ионов выходит поток ионов и нейтральных атомов вспомогательного газа (азота) и легирующего материала (титана). При этом ионы ускоряются отрицательным потенциалом до 30 кВ.

Теплофизические исследования образцов проводили с помощью самодельного стенда (рис. 3), в состав которого входил штатив 1 с закрепленным нагревателем с керамической основой 2, блок питания (выпрямитель тока) 3 и цифровой термометр 4 с термопарой 5.

Для предотвращения воздействия внешней среды на опыты образец закрывали стальным экраном (рис. 4). Температура воздуха измерялась

непосредственно у поверхности имплантата, а температура фольги - в центре полосы.

Керамический нагреватель - это основа стандартного нагревателя с нихромовой спиралью. Исследуемый образец укладывался в каналы керамического нагревателя и подключался к сети электрического тока. Регулируя входное напряжение, получали ряд мощности, потребляемой нагревателем. Получив опытные данные, проводили расчет необходимых величин.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛОТДАЧИ И МОЩНОСТИ НАГРЕВАТЕЛЯ

Поскольку исследования проводили для режима свободной конвекции, то алгоритм нахождения необходимых величин следующий.

Для определения мощности, потребляемой нагревателем, использовали формулу:

$$P \approx I \cdot U$$

где I - сила тока, А;

U - напряжение на входных контактах нагревателя, В;

P - потребляемая мощность нагревателя, Вт.

Расчет коэффициента конвективной α_k , радиационной α_p и общей α теплоотдачи проводим согласно методике [21].

Расчет полезной мощности нагревателя проводили по следующим зависимостям.

Мощность конвективного нагрева:

$$q_k = \alpha_k F \Delta t$$

где Δt - средняя разность температур, °С;

F - полная площадь поверхности образца, м²;

α_k - коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт / (м² · К).

Мощность радиационного нагрева:

$$q_p = \alpha_p F \Delta t$$

где Δt - средняя разность температур, °С;

F - полная площадь поверхности образца, м²;

α_p - коэффициент радиационной теплоотдачи, Вт / (м² · К).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

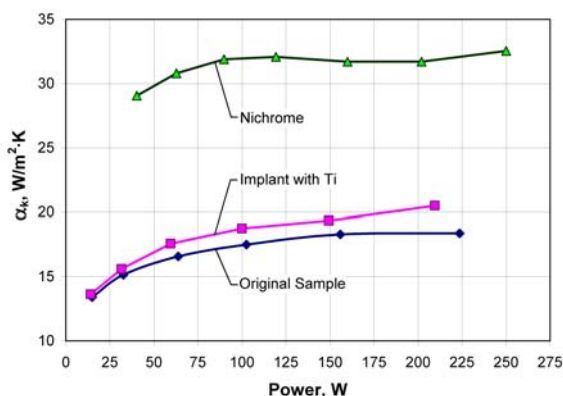


Рис. 5 Зависимость коэффициента конвективной теплоотдачи от мощности тока при свободной конвекции для различных образцов

Результаты определения коэффициентов конвективной теплоотдачи от необработанной (исходной) и обработанной фольги воздуху при свободной конвекции (отсутствии подачи воздуха)

приведены на рисунке 5. Для сравнения результатов также приведены данные для нихромовой спирали (традиционного нагревательного элемента).

Приведенные данные свидетельствуют о повышении коэффициента теплоотдачи после обработки ионами титана и не вступают в противоречие с известными результатами для стали [22]. То есть ионная имплантация в данном случае положительно влияет на образцы. Сравнение результатов для стали с результатами для нихрома демонстрируют значительные преимущества последнего, что вполне обоснованно, поскольку нихром предназначен специально для нагревателей.

Учитывая большой разогрев, целесообразно сравнить характеристики нагревателей, связанные с излучением энергии, то есть с радиационной теплоотдачей. На рис. 6 приведены графики, демонстрирующие перспективность применения образцов с имплантатами в качестве инфракрасных нагревателей.

Если рассматривать общую теплоотдачу (конвективным способом - воздуху, радиационным - окружающим предметам), вполне ожидаемым будут преимущества обработанных образцов над исходной фольгой (рис. 7). Тот факт, что образцы из стальной

фольги уступают нихрому, можно объяснить разницей формы нагревателей (пластина и спираль) и, как следствие, отличием теплопередачи.

Таким образом, показано, что при свободной конвекции коэффициенты конвективной и радиационной теплоотдачи для имплантатов имеют более высокие значения, чем для исходной стальной фольги, но при этом они меньше, чем для нихромовой спирали. Характерно, что образец, обработанный ионами титана, при рассмотрении радиационной теплоотдачи близок к спирали из нихрома, что позволяет рекомендовать имплантаты в качестве инфракрасных нагревателей.

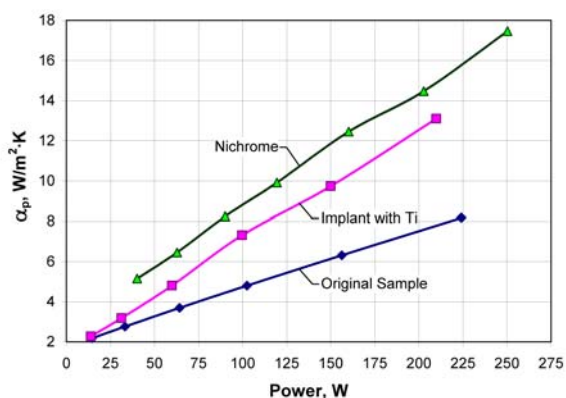


Рис. 6 Зависимость коэффициента радиационной теплоотдачи от мощности тока при свободной конвекции для различных образцов

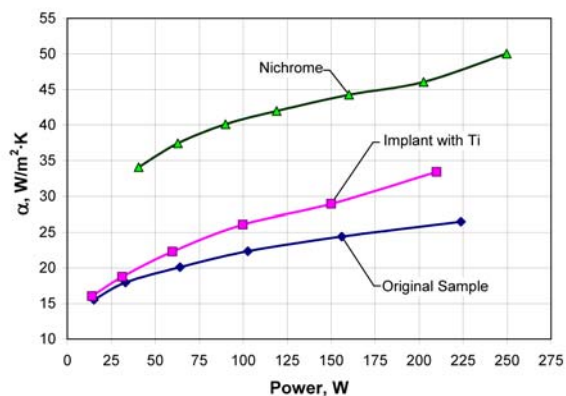


Рис. 7 Зависимость коэффициента общей теплоотдачи от мощности тока при свободной конвекции для различных образцов

Однако коэффициенты теплоотдачи - это удельные величины и зависят от многих факторов (форма и размеры образца, свойства материала и

среды). Поэтому при анализе возможности использования имплантатов в качестве нагревателей необходимо рассмотреть более общие характеристики - мощность и температуру.

Анализ мощности образцов при конвективной и радиационной теплоотдаче (рис. 8, 9) свидетельствует о значительных преимуществах имплантатов в качестве нагревателей воздуха по сравнению с исходными образцами и нихромовой спиралью.

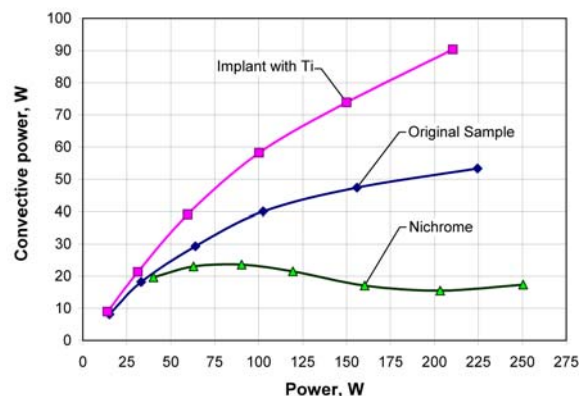


Рис. 8 Зависимость мощности конвективного нагрева от потребляемой мощности при свободной конвекции для различных образцов

Но даже у обработанного образца при этом довольно низкий КПД, не превышающий 50%. Поэтому более привлекательная перспектива использования имплантатов при высоких температурах, так как КПД образцов растет с температурой. Этот вывод наглядно подчеркивают графики на рисунке 9.

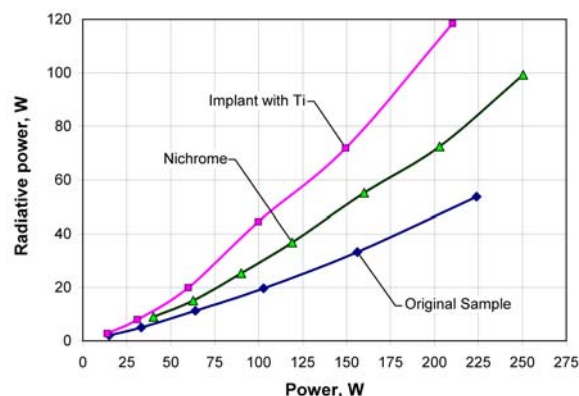


Рис. 9 Зависимость мощности радиационного нагрева от потребляемой мощности для различных образцов.

Такое отличие для образцов можно объяснить различной температурой поверхности, что, несомненно, является главным фактором при радиационной теплопередаче. Кроме того, температура нагревателя является важной характеристикой для многих химико-технологических процессов.

Зависимость температуры поверхности нагревателя от потребляемой мощности представлена на рисунке 10.

Из графиков видно, что температуры поверхности нагревателя из нихрома и необработанного стального образца близкие - разница не превышает 50 °С. Но температуры поверхности имплантата с ионами титана превышают температуры для нихрома почти на 100 °С. Учитывая, что поверхность, насыщенная ионами титана, обладает определенными химическими свойствами, можно рекомендовать имплантаты не просто как нагреватели, а, например, как инфракрасные (каталитические) горелки.

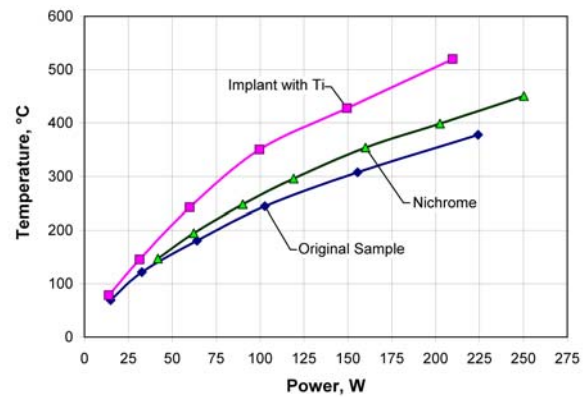


Рис. 10 Зависимость температуры поверхности от потребляемой мощности

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

- Установлено, что коэффициент конвективной теплоотдачи обработанной стали больше, чем исходной, хотя уступает нихрому.
- Показано, что образец, обработанный ионами титана, при рассмотрении теплопередачи излучением ведет себя как спираль из нихрома, значительно превышая исходную сталь по коэффициенту радиационной теплоотдачи.
- Выявлено, что мощность нагревателя с имплантатом превышает не только мощность необработанного материала, а и нихрома.
- Обнаружено, что при одной и той же потребляемой мощности, имплантаты обладают

большой температурой поверхности, чем нихромовая спираль или исходная сталь.

Таким образом, результаты исследований показали практическую обоснованность использования ионной имплантации, как технологии модификации поверхностей металлов. В результате ионной обработки имплантаты значительно повысили свои теплофизические характеристики по сравнению с необработанным материалом. Обработанные образцы оказались энергетически более выгодными, чем даже нихромовый нагреватель. К тому же, учитывая температуры и выделяемую мощность имплантаты с ионами титана можно уверенно рекомендовать для применения в гетерогенных каталитических горелках, которые более экологически чистые, чем гомогенные.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Тепломассообмен: Учеб. пособ. М.: Издательство МЭИ, 2005. 550 С.
Tsvetkov F.F., Grigoryev B.A. Teplomassoobmen: Ucheb. posob [Heat and Mass Transfer: Textbook]. M.: Izdatelstvo MEI, 2005. 550 S.
2. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках. М.: Наука, 1982. 472 С.
Zhukauskas A.A. Konvektivnyy perenos v teploobmennikakh [Convective transfer in heat exchangers]. M.: Nauka, 1982. 472 S.
3. Мастер отопления: отопление своими руками [Электронный ресурс] // Web-сайт Teplowood.ru - Режим доступа: http://teplowood.ru/teplootdacha-radiatorov-otopleniya.html#h2_4

4. Сerezькин Л. Н. Исследование устойчивости естественной циркуляции в горизонтальном теплообменнике с вытяжной шахтой: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. технических наук : спец. 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника» / Л. Н. Сerezькин. – Калуга, 2006. – 24 С.
Serezьkin L. N. Issledovanie ustoychivosti estestvennoy tsirkulyatsii v gorizontalom teploobmennike s

- vytyazhnoy shakhtoy [The study of natural circulation stability in a horizontal heat exchanger with the exhaust shaft]: avtoref. dis.. na soiskanie nauch. stepeni kand. tekhnicheskikh nauk : spets. 01.04.14 «Теплофизика i teoreticheskaya teplotekhnika» / L. N. Serezhkin. - Kaluga, 2006. - 24 S.
5. Evren M.F. Experimental investigation of energy-optimum radiant-convective heat transfer split for hybrid heating systems / M.F. Evren, A. Özsunar, B. Kılıç // *Energy and Buildings*. - 2016. - Vol. 127. - N 1. - P. 66 – 74.
 6. Lina B. Evaluation and comparison of thermal comfort of convective and radiant heating terminals in office buildings / B. Lina, Z. Wang, H. Sun, Y. Zhu, Q. Ouyang // *Building and Environment*. - 2016. - Vol. 106. - P. 91 – 102.
 7. Inui T. Recent advance in catalysis for solving energy and environmental problems / T. Inui. // *Catalysis Today*. – 1999. – N 51 – P. 361-368.
 8. Струтинская Л.Т. Термоэлектрические микрогенераторы. Современное состояние и перспективы использования / Л.Т. Струтинская // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. – 2008. – N 4. – с. 5-13.
Strutinskaya L.T. Termoelektricheskie mikrogeneratory. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy ispolzovaniya [Thermoelectric Microgenerators. Current status and prospects] / L.T. Strutinskaya // *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*. - 2008. - N 4. -SS. 5-13.
 9. Giornelli T. Preparation and characterization of VO_x/TiO₂ catalytic coatings on stainless steel plates for structured catalytic reactors / T. Giornelli, A. Lofberg, E. Bordes-Richard // *Applied Catalysis A: General*. – 2006. – N 305. – P. 197-203.
 10. Giornelli T. Catalytic wall reactor. Catalytic coatings of stainless steel by VO_x/TiO₂ and Co/SiO₂ catalysts / T. Giornelli, A. Lofberg, L. Guillou, S. Paul, V. Le Courtois, E. Bordes-Richard // *Catalysis Today*. – 2007. – №128 – С. 201-207.
 11. Теплотехника / под. ред. В. Н. Луканина [Учеб. для вузов]. – М. : Высш. шк., Том 34. – 2000. – 671 С.
Teplotekhnika [Heat engineering] / pod. red. V. N. Lukanina [Ucheb. dlya vuzov]. - M. : Vyssh. shk., Tom 34. - 2000. - 671 S.
 12. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. – 344 С.
Mikheev M.A., Mikheeva I.M. Osnovy teploperedachi [Basics of heat transfer]. - M.: Energiya, 1977. - 344 S.
 13. Модифицирование и легирование лазерными, ионными и электронными пучками / [під ред. Дж. М. Поута, Г. Фоти, Д.К. Джекобсона]. – М. : Машиностроение, 1987. – 424 С.
Modifitsirovaniye i legirovaniye lazernymi, ionnymi i elektronnyimi puchkami [Modification of the surface of solids at ion and plasma exposure] / [pod. red. Dzh. M. Pouta, G. Foti, D.K. Dzhekobsona]. - M. : Mashinostroeniye, 1987. - 424 S.
 14. Беграмбеков Л.Б. Модификация поверхности твердых тел при ионном и плазменном воздействии. М.: МИФИ. - 2001. – 34 С.
Begrambekov L.B. Modifikatsiya poverkhnosti tverdykh tel pri ionnom i plazmennom vozdeystvii [Modification of the surface of solids at ion and plasma exposure]. M.: MIFI. - 2001. - 34 S.
 15. Калин Б.А. Радиационно-пучковые технологии обработки конструкционных материалов / Б. А. Калин // *Физика и химия обработки материалов*. – 2001. – N 4 – С. 5 – 16.
Kalin B.A. Radiatsionno-puchkovyye tekhnologii obrabotki konstruktсионnykh materialov [Radiation-beam technologies of construction materials processing] / B. A. Kalin // *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. - 2001. - N 4 - SS. 5 - 16.
 16. Абдрашитов В. Г. Оптимальные режимы активации поверхности методом ионной имплантации / В.Г. Абдрашитов, В.В. Рыжов // *Поверхность. Физика, химия, механика*. – 1989. – N 7 – С. 148 – 149.
Abdrashitov V. G. Optimalnye rezhimy aktivatsii poverkhnosti metodom ionnoy implantatsii [Optimal modes of surface activation by ionic implantation method] / V.G. Abdrashitov, V.V. Ryzhov // *Poverkhnost. Fizika, khimiya, mekhanika*. - 1989. - N 7 - SS. 148 - 149.
 17. Богданов Н. Ю. Наноструктурирование металлических материалов интенсивными ионными пучками : автореф. дис.. на соискание науч. степени канд. физико-математических наук : спец. 01.04.07 «Физика конденсированного состояния» / Н. Ю. Богданов. – Обнинск, 2008. – 20 С.
Bogdanov N. Yu. Nanostrukturirovaniye metallicheskih materialov intensivnymi ionnymi puchkami [The nanostructuring of metal materials by intense ion beams] : avtoref. dis.. na soiskanie nauch. stepeni kand. fiziko-matematicheskikh nauk : spets. 01.04.07 «Fizika kondensirovannogo sostoyaniya» / N. Yu. Bogdanov. - Obninsk, 2008. - 20 S.
 18. Wang H. Surface modification of (Tb,Dy)Fe₂ alloy by nitrogen ion implantation / H. Wang, S. Zhang , D. Yu, K. Li, Y. Luo // *Journal of Rare Earths* – 2011. – Vol. 29, Issue 9 – P. 878 – 882.
 19. Гончаров В.В. Синтез и теплофизические свойства образцов из стали 12X18H10T после ионной имплантации алюминия / В.В. Гончаров, В.А. Зажигалов // *Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии*. -

Днепропетровск: НПБК "Триакон". - 2011. - Вып. 2(7). - С. 178 - 182. doi: 10.23877/MS.TS.8.032.

Goncharov V.V. A synthesis and thermophysical properties of samples from 12H18N10T steel after ionic implantation of aluminum / V.V. Goncharov, V.A. Zazhigalov // Modern Science: Researches, Ideas, Results, Technologies. - Dnepropetrovsk: SPIC "Triakon". - 2011. - Iss. #2(7). - PP. 178 - 182. doi: 10.23877/MS.TS.8.032.

20. Гончаров В.В. Катализаторы сжигания метана, синтезированные методом ионной имплантации на стали 12Х18Н10Т / В.В. Гончаров // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. - Днепропетровск: НПБК "Триакон". - 2013. - Вып. 0(ТТРТ). - С. 60 - 66. doi: 10.23877/MS.TS.13.008.

Goncharov V.V. Methane combustion catalysts synthesized by the method of ionic implantation on steel 12x18h10t / V.V. Goncharov // Modern Science: Researches, Ideas, Results, Technologies. - Dnepropetrovsk: SPIC "Triakon". - 2013. - Iss. #0(ТТРТ). - PP. 60 - 66. doi: 10.23877/MS.TS.13.008

21. Гончаров В. В. Фізико-хімічні властивості покриття, одержаного методом іонної імплантації на поверхні нержавіючої сталі:

автореф. дис. на здобуття вченого ступеню кандидата хімічних наук : спец. 01.04.18 «Фізика і хімія поверхні» / В. В. Гончаров. – Київ, 2012. – 23 с.

Honcharov V. V. Fizyko-khimichni vlastyivosti pokryttya, oderzhanoho metodom ionnoyi implantatsiyi na poverkhni nerzhaviyuchoyi stali [Physical-chemical properties of the coating obtained by the method of ionic implantation on the surface of stainless steel]: avtoref. dys. na zdobuttya vchenoho stupenyu kandydata khimichnykh nauk : spets. 01.04.18 «Fizyka i khimiya poverkhni» / V. V. Honcharov. - Kyiv, 2012. - 23 s.

22. Способи перенесення теплоти [Електронний ресурс] // Web-сайт Енергетика. Історія, сучасність і майбутнє - Режим доступу: <http://energetika.in.ua/ua/books/book-2/part-2/section-3/3-1>

Sposoby perenesennya teploty [Methods of heat transfer] // Web-site Enerhetyka. Istoriya, suchasnist i maybutnye - Available: <http://energetika.in.ua/ua/books/book-2/part-2/section-3/3-1>