

Гончаров В.В.

Інститут хімічних технологій Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, Рубіжне, Луганська обл.

вул. Леніна, 31, 93009 Рубіжне, Луганська обл., Україна, e-mail: gonch_vit@rambler.ru

Дослідження тепловіддачі від металофольгового електронагрівача з імпантованими іонами Cr, Ti, Mo та Zr

Досліджено вплив деяких факторів на коефіцієнт конвективної тепловіддачі зразків на основі нержавіючої сталі, оброблених імпантацією іонів хрому, цирконію, титану та молібдену. З використанням метода відновлення одномірних залежностей проведено оцінку сили впливу та резерву. Показано, що тепловіддача конвекцією найбільше залежить від температури поверхні зразка та використовуваного імпантату. Застосування іонної імпантації для підвищення коефіцієнта конвективної тепловіддачі є перспективним для використання в промислових апаратах різного призначення, а саме: сушарок киплячого шару, каталітичних пальників, нагрівачів та ін. Результати досліджень можуть бути використані у таких галузях як енергетика та хімічна промисловість для інтенсифікації тепло- та масообмінних процесів. *Бібл. 12, рис. 2, табл. 3.*

Ключові слова: іонна імпантація, конвективна тепловіддача, метод відновлення одномірних залежностей.

Тепловіддача — важлива складова багатьох технологічних процесів хімічної промисловості, екології, енергетики та ін. Тому актуальним є питання ефективності теплообміну в різноманітних пристроях (газові турбіни, нейтралізатори шкідливих викидів та ін.). Зокрема, важливу роль відіграє тепловіддача у каталітичних процесах, в яких при нанесенні активних компонентів на поверхню змінюються її термомеханічні характеристики. Крім того, такі композити **повинні** задовольняти вимогам високої механічної міцності, теплопровідності, термостабільності, корозійного та ерозійного зносу. Отже, розробка технологій та дослідження факторів, які дозволяють підвищувати термомеханічні, фізико-хімічні та каталітичні характеристики елементів різноманітних енергетичних пристроїв (нагрівачів, пальників, печей та ін.), є актуальним питанням сьогодення.

Постановка проблеми

Однією з технологій модифікування матеріалів, які впливають на їх властивості є іонна імпантація [1–5]. Сутність даної технології полягає в бомбардуванні поверхні матеріалу іонами, внаслідок чого вони проникають у неї на певну глибину, дифундуючи з часом. Бомбардування відбувається за умов глибокого вакууму та без нагріву зразків лише завдяки енергії

високовольтного електромагнітного поля, яке спрямовує потік іонів металів-мішеней та робочого газу з джерела іонів на оброблювану поверхню. Завдяки контрольованій взаємодії імпант-іонів з атомами зразка одночасно з імпантацією або ступенево може додатково здійснюватися травлення та мікродеформування поверхні та синтез тонких плівок розміром кілька сотень нанометрів. Впроваджені за даною методикою частинки змінюють мікрогеометрію, елементний та фазовий склад поверхневого шару, що призводить до зміни його міцності, жорсткості, зносостійкості, електричного та термічного опору та ін.

Незважаючи на велику кількість літературних посилань, в яких показано застосування іонної імпантації як технології зміцнення, публікації, які досліджують її вплив на термічні властивості, мають епізодичний характер. Тому питання тепловіддачі від зразків, оброблених іонною імпантацією, має наукову та практичну цінність.

Аналіз досліджень та публікацій

Попередні дослідження [3, 5] свідчать про певні зміни термомеханічних характеристик металевих зразків, оброблених іонною імпантацією. Більш детальне вивчення [6–9] підтвердило вплив впровадження іонів алюмінію та

Таблиця 1. Параметри моделі та розраховані коефіцієнти конвективної тепловіддачі

№№ з/п	X_1 , Вт	X_2 , °C	X_3 , °C	X_4	Y , Вт/(м ² ·°C)
1	48	51	288	24	19,0
2	80	58	418	24	20,5
3	180	114	528	24	21,0
4	252	160	623	24	22,1
5	336	158	693	24	22,9
6	360	144	778	24	23,8
7	54	49	200	22	17,4
8	92,5	81	303	22	18,9
9	141	106	392	22	20,0
10	203	152	493	22	20,5
11	280	222	598	22	21,8
12	346,5	271	668	22	22,5
13	60	69	273	42	18,7
14	100	83	383	42	20,0
15	150	110	438	42	20,3
16	210	144	513	42	20,8
17	288	187	603	42	21,9
18	369	232	663	42	22,5
19	44	74	288	40	18,8
20	80	92	393	40	20,0
21	108	119	468	40	20,3
22	147	146	553	40	21,3
23	192	180	633	40	22,2
24	252	223	698	40	22,9
25	56	51	328	24	30,3
26	95	58	433	24	29,9
27	144	69	548	24	29,6
28	210	80	648	24	29,4
29	280	90	728	24	29,2
30	360	105	813	24	29,1
31	36	60	253	22	30,4
32	70	94	353	22	30,2
33	114	124	433	22	29,8
34	154	146	518	22	29,6
35	208	180	608	22	29,4
36	351	212	713	22	29,1
37	60	65	283	42	30,3
38	100	83	403	42	30,2
39	150	108	503	42	29,8
40	210	133	598	42	29,6
41	288	178	693	42	29,3
42	369	226	778	42	29,1
43	52	58	258	40	30,3
44	85	71	353	40	30,2
45	126	87	443	40	29,9
46	182	114	528	40	29,6
47	248	144	628	40	29,4
48	324	176	788	40	29,1

Примітка. X_1 — споживана потужність, X_2 — температура повітря, X_3 — температура зразка, X_4 — атомний номер елемента, Y — коефіцієнт конвективної тепловіддачі.



Рис.1. Зовнішній вигляд зразка в каналах керамічної основи електронагрівача.

нікелю на тепловіддачу та каталітичні властивості сталі 12X18H10T. У [6, 9] показано, що термічні показники фольгових сталевих зразків після іонної обробки при синтезі каталізатору з паладієм мають значні перспективи використання останнього у каталітичних пальниках, нагрівачах та ін. Проте оскільки теплопередача — це складний процес, який залежить від багатьох факторів, то питання керування ним за допомогою вихідних параметрів або режиму імплантації залишається відкритим. Для визначення залежності теплових властивостей імплантатів від параметрів, які безпосередньо не входять до складу розрахункових формул, можна використати метод відновлення одномірних залежностей (МВОЗ), запропонований академіком Кацом М. Д. [10, 11]. Вказана методика дозволяє будувати математичну модель, яка відтворює залежність цільового показника від вихідних параметрів. На основі такої моделі можливе прогнозоване підвищення показника за допомогою його оптимізації [12]. Отже, МВОЗ дозволяє керувати тепловіддачею від металевих зразків завдяки визначенню та корегуванню найвпливовіших факторів.

Мета даної роботи — побудова моделі за методом МВОЗ, визначення головних факторів та оптимізація тепловіддачі металофольгового електронагрівача, обробленого за допомогою іонної імплантації.

Методика проведення експерименту

Експеримент проводили на лабораторній установці (рис.1), головною частиною якої є керамічна основа звичайної електроплитки з просвердленими аксіальними отворами. Замість спіралі-нагрівача у канали плитки вкладали зразок у вигляді металевої стрічки, до якої прикладали постійну напругу.

У даній роботі досліджено вплив таких факторів: потужність на вході, температура повітря, температура зразка та номер елемента-іона у періодичній таблиці. Як функцію прийня-

Таблиця 2. Дані, необхідні для розрахунку параметрів моделі

Параметр моделі	X ₁ , Вт	X ₂ , °C	X ₃ , °C	X ₄
min	36	49	200	22,00
Гр1	104	85	426	24,00
Гр2	210	145	606	40,00
max	369	271	813	42,00
X _i сер. D1	69,5	66,3	323,1	22,5
X _i сер. D2	163,7	114,3	512,4	32,0
X _i сер. D3	307,1	190,6	697,1	41,5
Y сер. D1	24,7	25,2	24,1	23,9
Y сер. D2	25,2	25,8	25,4	25,6
Y сер. D3	25,9	24,8	26,4	26,3
Оцінка сили	1,20	1,00	2,33	2,40
Оцінка резерву	0,70	0,60	1,03	0,70

Таблиця 3. Оптимальні піддіапазони параметрів процесу

Параметр моделі	Оптимальний піддіапазон	
	мінімум	максимум
X ₁ – споживана потужність, Вт	210	369
X ₂ – температура повітря, °C	87	144
X ₃ – температура зразка, °C	608	813
X ₄ – атомний номер елемента	40	42

то коефіцієнт конвективної тепловіддачі від металевих зразків до повітря.

Для дослідження були взяті зразки, оброблені іонами Cr, Ti, Mo та Zr.

Для визначення коефіцієнту конвективної тепловіддачі прийнята емпірична формула:

$$\alpha = Nu \lambda / l,$$

де Nu – критерій Нусельта; λ – коефіцієнт теплопровідності повітря, Вт/(м·К); l – ширина стрічки фольгового зразка, $l = 0,005$ м.

Критерій Нусельта розраховано за методикою, описаною у [6].

Результати виміру вихідних параметрів занесені до табл.1.

Результати та обговорення

Обробка отриманих результатів проводилася за допомогою МВОЗ. Значення кожного аргумента були поділені на три діапазони за мірою зростання. Граничні точки діапазонів, середньоарифметичні значення аргументів X_i та відповідні для них значення функції Y_i (коефіцієнти конвективної тепловіддачі) кожного діапазону, а також сила їх впливу та резерву, тобто абсолютна величина зміни коефіцієнта конвективної теп-

ловіддачі, яка обумовлена зміною лише одного аргументу, зведені у табл.2.

Отримані у ході дослідження дані свідчать про те, що найбільшу силу впливу на коефіцієнт конвективної тепловіддачі має температура поверхні зразка (сила впливу 2,33) та порядковий номер елемента у періодичній таблиці (сила впливу 2,4). Вплив температури поверхні зразка на термічні властивості не викликає сумніву, натомість вплив атомного номеру імплантованих іонів встановлений вперше. Оскільки іонна імплантація – це технологія, яка безпосередньо визначається природою імплант-іонів, то таким чином вона може, безперечно, мати регуляторну функцію.

За результатами, наведеними у табл.2 та визначеними функціями Y, можна встановити

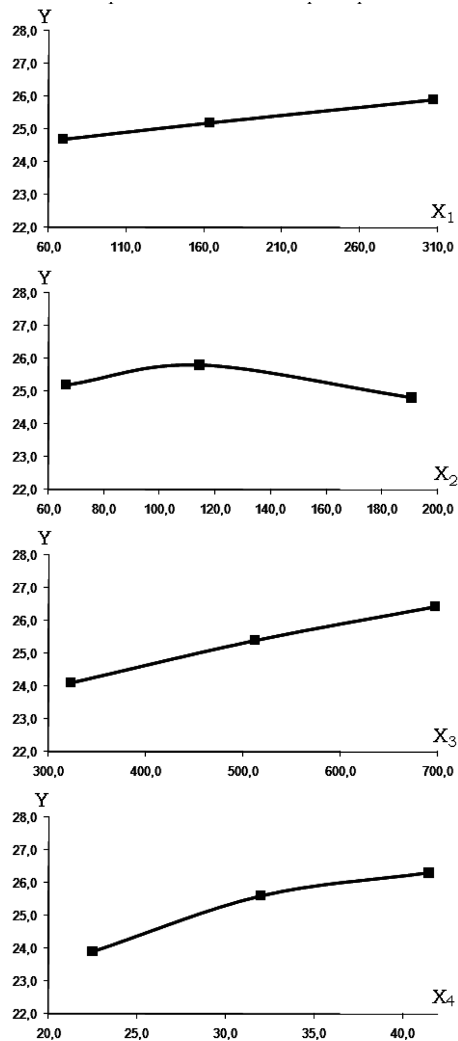


Рис.2. Залежність середньодіапазонних значень коефіцієнтів конвективної тепловіддачі від факторів X_i.

оптимальні піддіапазони значень параметрів (табл.3). Тобто для підвищення коефіцієнта конвективної тепловіддачі необхідно дотримуватися таких умов, за якими параметри X_i будуть у межах певних значень згідно з табл.3.

У результаті обробки експериментальних даних за методом відновлення одномірних залежностей можна скласти загальну модель субоптимального керування конвективної тепловіддачею: $Y > Y_{\max}$, якщо $X_1 D_3 \times X_2 D_2 \times X_3 D_3 \times X_4 D_4$.

Отже, оптимальні діапазони та визначені оцінки сили та резерву дають можливість прогнозувати досягнення певних змін у коефіцієнтах тепловіддачі від зразків, оброблених іонною імплантацією у залежності від зміни будь-якого вихідного параметру. Наочну ілюстрацію результатів розрахунків за моделлю у вигляді залежності функції Y від кожного аргументу X_i наведено на рис.2.

Приведені графіки (рис.2) вказують на те, що для керування конвективною тепловіддачею від сталевих зразків з імпантованими іонами необхідно використовувати такий підхід. Щоб підвищити коефіцієнт конвективної тепловіддачі, слід підвищувати потужність електроструму, температуру поверхні зразка та використовувати для імплантації матеріал мішені з елементом, який має найбільший номер у періодичній таблиці елементів. Для зниження коефіцієнту слід робити навпаки. Температуру повітря як параметр впливу слід використовувати обережно, оскільки графік залежності від неї не монотонний.

Висновки

За результатами моделювання за МВОЗ було виявлено, що тепловіддача конвекцією найбільше залежить від температури поверхні зразка та використовуваного імплантату. Крім того, саме ці параметри мають і найбільший резерв, що свідчить про можливе регулювання тепловіддачею у певному діапазоні. Технологія іонної імплантації, без сумнівів, може бути застосована з метою поліпшення термічних властивостей теплообмінних елементів у різних апаратах: сушарках киплячого шару, каталітичних пальниках, нагрівачах та ін. Адже саме оптимальний вибір матеріалу та режиму обробки гарантує досягнення ефективної тепловіддачі. Отриманий матеріал можна використовувати для вирішення питань енергетики, екології та у галузі хімічної промисловості, а саме: для інтенсифікації тепло-, масообмінних, а також каталітичних процесів.

Список літератури

1. Модифицирование и легирование лазерными, ионными и электронными пучками / Под ред. Дж. М. Поута, Г. Фоти, Д. К. Джекобсона. — М.: Машиностроение, 1987. — 424 с.
2. Хирвонен Дж. К. Ионная имплантация. — М.: Металлургия, 1985. — 285 с.
3. Тонкие пленки — взаимная диффузия и реакции / Под. ред. Дж. Поута, К. Ту, Дж. Мейера. — М.: Мир, 1982. — 576 с.
4. Беграмбеков Л.Б. Модификация поверхности твердых тел при ионном и плазменном воздействии. — М.: МИФИ, 2001. — 34 с.
5. Никитин А.А., Травина Н. Г. Ионная имплантация — эффективный метод изменения свойств поверхности металлов и сплавов // Бюл. Центр. науч.-исслед. ин-та черной металлургии. — 1986. — № 23 — С. 9–18.
6. Гончаров В.В., Климаш А.О., Зажигалов В.О., Орлик В.М. Теплофизичні дослідження каталітичних елементів з внутрішнім нагрівом // Фізика і хімія твердого тіла. — 2011. — Т. 12, № 3. — С. 762–767.
7. Гончаров В.В., Зажигалов В.А. Свойства нанокompозитов на основе стали 12X18H10T // Ученые записки Таврического национального университета им. В.И.Вернадского. — 2011. — Том 24, № 3. — С. 76–82.
8. Гончаров В.В., Зажигалов В.А. Синтез и характеристика композита с Ni и Al, имплантированными в нержавеющую сталь // Бутлеровские сообщения. — 2012. — Т. 32, № 10–12. — С. 68–74.
9. Гончаров В.В., Зажигалов В.А. Синтез и теплофизические свойства образцов из стали 12X18H10T после ионной имплантации алюминия // Современная наука : исследования, идеи, результаты, технологии. — 2011. — № 2. — С. 178–182.
10. Давиденко А.М., Кац М.Д. Новые методы изучения действующих производств и их возможности // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2004. — № 6. — С. 189–193.
11. Биленко Д.А., Давиденко А.М., Лютой А.В. Доказательство корректности метода восстановления одномерных зависимостей для изучения и совершенствования действующих производств с помощью имитационного моделирования // Вестник Восточнoукраинского национального университета им. В. Даля. — 2007. — № 5. — С. 18–24.
12. Новакова А.В., Давиденко А.М., Кац М.Д. Метод компромиссной субоптимизации для решения многокритериальных задач // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2009. — № 5/4. — С. 39–44.

Гончаров В.В.

*Институт химических технологий Восточноукраинского национального университета им. В. Даля, Рубежное, Луганская обл.
ул. Ленина, 31, 93009 Рубежное, Луганская обл., Украина, e-mail: gonch_vit@rambler.ru*

Исследование теплоотдачи от металлофольгового электронагревателя с имплантированными ионами Cr, Ti, Mo и Zr

Исследовано влияние некоторых факторов на коэффициент конвективной теплоотдачи образцов на основе нержавеющей стали, обработанных имплантацией ионов хрома, циркония, титана и молибдена. С использованием метода восстановления одномерных зависимостей проведена оценка силы влияния и резерва. Показано, что теплоотдача конвекцией в большей степени зависит от температуры поверхности образца и используемого имплантата. Применение ионной имплантации для повышения коэффициента конвективной теплоотдачи перспективно для использования в промышленных аппаратах разного назначения: сушилок кипящего слоя, каталитических горелок, нагревателей и др. Результаты исследований могут быть использованы в таких отраслях как энергетика и химическая промышленность для интенсификации тепло- и массообменных процессов. *Библ. 12, рис. 2, табл. 3.*

Ключевые слова: ионная имплантация, конвективная теплоотдача, метод восстановления одномерных зависимостей.

Honcharov V.V.

*Institute of Chemical Technology V. Dahl' East Ukrainian National University, Rubizhne, Lugansk Region
31, Lenina Str., 93009 Rubezhnoye, Lugansk Reg., Ukraine, e-mail: gonch_vit@rambler.ru*

The Influence of Various Factors on Heat Transfer of Electric Heater from Metal Foil's with Implanted Ions Cr, Ti, Mo and Zr

The influence of some factors on convective heat transfer coefficient of samples on the basis of stainless steel treated by implanting of ions of chromium, zirconium, titanium and molybdenum is studied. Using the method of recovery of one-dimensional dependencies is evaluated the force of influence and reserve. It's shown that heat transfer by convection is dependent mostly from the surface temperature and used implant. The use of ion implantation for increase of the heat transfer coefficient is promising for application in industrial apparatus for different purposes: dryers with fluidized bed, catalytic burners, heaters, etc. The results of researches can be used in such branches as power engineering and chemical industry for heat- and mass transfer processes intensification. *Bibl. 13, Fig. 4, Table 2.*

Key words: ionic implantation, convective heat transfer, method of recovery of one-dimensional dependencies.

References

1. Modificirovanie i legirovanie lazernymi, ionnymi i jelektronnymi puchkami / Ed. Dzh. M. Pouta, G.Foti, D.K.Dzhekbosona. Moscow : Mashinostroenie, 1987, 424 p. (Rus.)
2. Hirvonen Dzh. K. Ionnaja implantacija. Moscow : Metallurgija, 1985, 285 p. (Rus.)
3. Tonkie plenki – vzaimnaja diffuzija i reakcii / Ed. Dzh. Pouta, K. Tu, Dzh. Mejera. Moscow : Mir, 1982, 576 p. (Rus.)
4. Begrambekov L.B. Modifikacija poverhnosti tverdih tel pri ionnom i plazmennom vozdejstvii. Moscow : Moskovskij Inzhenerno-Fizicheskij Institut, 2001, 34 p.
5. Nikitin A.A., Travina N. G. Ionnaja implantacija – jeffektivnyj metod izmenenija svojstv poverhnosti metallov i splavov. Bjulleten' Central'nogo Nauchno-Issledovatel'skogo Instituta Chernoj Metallurgii, 1986, (23), pp. 9–18. (Rus.)
6. Goncharov V.V., Klymash A.O., Zazhigalov V.O., Orlyk V.M. Teplofizychni doslidzhennja katalitychnyh elementiv z vnutrishnim nagrivo. Fizyka i himija tverdogo tila, 2011, 12 (3), pp. 762–767. (Ukr.)
7. Goncharov V.V., Zazhigalov V.A. Svojstva nanokompozitov na osnove stali 12H18N10T. Uchenye zapiski Tavricheskogo nacional'nogo universiteta im. V.I.Vernadskogo, 2011, 24 (3), pp. 76–82. (Rus.)
8. Goncharov V.V., Zazhigalov V.A. Sintez i harakteristika kompozita s Ni i Al, implantirovannymi v nerzhavejushhuju stal' // Butlerovskie soobshhenija, 2012, 32 (10–12), pp. 68–74. (Rus.)
9. Goncharov V.V., Zazhigalov V.A. Sintez i teplofizicheskie svojstva obrazcov iz stali 12H18N10T posle ionnoj implantacii aljuminija. Sovremennaja nauka : issledovanija, idei, rezul'taty, tehnologii, 2011, (2), pp. 178–182. (Rus.)
10. Davidenko A.M., Kac M.D. Novye metody izuchenija dejstvujushhijh proizvodstv i ih vozmozhnosti. Vostochno-Evropskij zhurnal peredovyh tehnologij, 2004, (6), pp. 189–193. (Rus.)
11. Bilenko D.A., Davidenko A.M., Ljutoj A.V. Dokazatel'stvo korrektnosti metoda vosstanovlenija odnomernyh zavisimostej dlja izuchenija i sovershenstvovanija dejstvujushhijh proizvodstv s pomoshh'ju imitacionnogo modelirovanija. Vestnik Vostochno-ukrainskogo nacional'nogo universiteta im. V.Dalja, 2007, (5), pp. 18–24. (Rus.)
12. Novakova A.V., Davidenko A.M., Kac M.D. Metod kompromissnoj suboptimizacii dlja reshenija mnogokriterial'nyh zadach. Vostochno-Evropskij zhurnal peredovyh tehnologij, 2009, (5/4), pp. 39–44. (Rus.)

Received July 4, 2014