

УДК 669.15:537.621.4:620.193.4

ИДЕНТИФИКАЦИЯ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ РАЗНЫХ ПЛАВОК, НО ОДНОЙ МАРКИ АУСТЕНИТНЫХ FE- CR-NI СПЛАВОВ

СНЕЖНОЙ Г.В.¹, к.ф-м.н., доц.,
СНЕЖНОЙ В.Л.², к.ф-м.н., доц.

¹ Кафедра микро - и нанoeлектроники, Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского 64, 69063, Запорожье, Украина, тел. +38 (061) 764-67-33, e-mail: snow@zntu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-1452-0544

² Кафедра прикладной физики, Запорожский национальный университет, ул. Жуковского 66, 69600, Запорожье, Украина, ORCID ID: 0000-0001-6901-9920

Аннотация. Цель. Экспериментально определить скорость коррозии разных плавок, но одной марки аустенитных Fe-Cr-Ni сплавов, не содержащих δ -феррит, по удельной магнитной восприимчивости аустенита, которая определяет магнитное состояние аустенита. **Методика.** Для нахождения удельной магнитной восприимчивости использовали весы с униполярной астатической системой и магнитным зацеплением призмы. Для выявления скорости коррозии использовали коэффициент интенсивности коррозии K , который определяли как относительную потерю массы $K=\Delta m/(S\cdot\tau)$. С целью ускорения химической коррозии исследуемые образцы помещали в агрессивный раствор "царская водка". **Результаты.** Установлено, что в пяти плавках сплава 06ХН28МДТ (ЭИ943) скорость коррозии определяется магнитным состоянием аустенита, т.е. удельной магнитной восприимчивостью: чем меньше удельная магнитная восприимчивость аустенита, тем меньше скорость коррозии и наоборот. **Научная новизна.** Выявлена корреляционная зависимость скорости коррозии от удельной магнитной восприимчивости, т.е. магнитного состояния аустенита разных плавок, но одной марки сплава ЭИ943. **Практическая значимость.** Полученные результаты могут быть использованы для идентификации скорости коррозии в аустенитных Fe-Cr-Ni сплавах.

Ключевые слова: аустенит, коррозия, магнитная восприимчивость, хромоникелевый сплав.

ИДЕНТИФІКАЦІЯ КОРОЗІЙНОЇ ТРИВКОСТІ РІЗНИХ ПЛАВОК АЛЕ ОДНІЄЇ МАРКИ АУСТЕНІТНИХ FE- CR-NI СПЛАВІВ

СНЕЖНОЙ Г.В.¹, к.ф-м.н., доц.,
СНЕЖНОЙ В.Л.², к.ф-м.н., доц.

¹ Кафедра мікро- і нанoeлектроніки, Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (061) 764-67-33, e-mail: snow@zntu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-1452-0544

² Кафедра прикладної фізики, Запорізький національний університет, вул. Жуковського 66, 69600, Запоріжжя, Україна, ORCID ID: 0000-0001-6901-9920

Анотація. Мета. Експериментально визначити швидкість корозії різних плавок, але однієї марки аустенітних Fe-Cr-Ni сплавів, що не містять δ -ферит, за питомою магнітної сприйнятливості аустеніту, яка визначає магнітний стан аустеніту. **Методика.** Для знаходження питомої магнітної сприйнятливості використовували терези з уніполярною астатичною системою і магнітним зчепленням призми. Для виявлення швидкості корозії використовували коефіцієнт інтенсивності корозії K , який визначали як відносну втрату маси $K=\Delta m/(S\cdot\tau)$. З метою прискорення хімічної корозії досліджувані зразки поміщали в агресивний розчин "царська горілка". **Результати.** Встановлено, що в п'яти плавках сплаву 06ХН28МДТ (ЭИ943) швидкість корозії визначається магнітним станом аустеніту, тобто питомої магнітної сприйнятливості: чим менше питома магнітна сприйнятливості аустеніту, тим менше швидкість корозії і навпаки. **Наукова новизна.** Виявлено кореляційну залежність швидкості корозії від питомої магнітної сприйнятливості, тобто магнітного стану аустеніту різних плавок, але однієї марки сплаву ЕІ943. **Практична значимість.** Отримані результати можуть бути використані для ідентифікації швидкості корозії в аустенітних Fe-Cr-Ni сплавах.

Ключові слова: аустеніт, корозія, магнітна сприйнятливості, хромонікелевий сплав.

IDENTIFICATION OF CORROSION RESISTANCE DIFFERENT BATCHES OF THE SAME BRAND AUSTENITIC FE- CR-NI ALLOYS

SNIZHNOI G.V. ¹, Cand. Sc. (Phys. and Math.), Docent,

SNIZHNOI V.L.², *Cand. Sc. (Phys. and Math.), Docent.*

¹ Department of micro- and nanoelectronics, State Higher Education Establishment “Zaporizhzhya National Technical University”, 64, Zhukovskogo str., Zaporizhzhya, 69063, Ukraine, phone: +38 (061) 764-67-33, e-mail: snow@zntu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-1452-0544

² Department of Applied Physics, State Higher Education Establishment “Zaporizhzhya National University”, 66, Zhukovskogo str., Zaporizhzhya, 69600, ORCID ID: 0000-0001-6901-9920

Annotation. Purpose. Corrosion rate of different smelting of the one grade of austenite Fe-Cr-Ni alloy from the specific magnetic susceptibility of austenite experimentally determine. Austenitic Fe-Cr-Ni alloy of ferrite did not contain. The magnetic state of austenite specific magnetic susceptibility is determined. **Methodology.** Scales with unipolar astatic magnetic system and the prism engagement to locate the specific magnetic susceptibility used. The corrosion rate was determined of the relative weight loss $K=\Delta m/(S \cdot \tau)$. Aggressive solution "aqua regia" to accelerate the chemical corrosion of samples used. **Findings.** Corrosion rate alloys 06HN28MDT (EI943) by the magnetic state of the austenite (specific magnetic susceptibility) is defined. The corrosion rate is reduced if a specific magnetic susceptibility of austenite decreases, and vice versa. **Originality.** Correlation dependence of the corrosion rate and the specific magnetic susceptibility (magnetic state) austenite of different smelting of the one grade alloy EI943 revealed. **Practical value.** The results for identification of the corrosion rate in the austenitic Fe-Cr-Ni alloys can be used.

Keywords: austenite; corrosion; magnetic susceptibility; nickel-chromium alloy

Введение

Исследованию влияния различных факторов на процесс коррозии аустенитных хромоникелевых сталей уделено значительное внимание [1-6]. Так в [6] установлена зависимость скорости коррозии K аустенитных хромоникелевых сталей AISI304, 08X18H10, AISI321, 08X18H10T, содержащих δ -феррит, от атомно-магнитного состояния аустенита, т.е. от удельной магнитной восприимчивости χ_0 аустенита, которая является интегральной величиной, оценивающей суммарное воздействие многих факторов на коррозионное поведение. При этом выявлено: чем больше χ_0 , тем меньше скорость коррозии K и наоборот. Предполагается, что низкое содержание P_α δ -феррита (0,005...0,5%) косвенно влияет на коррозию, поскольку P_α зависит от χ_0 . Поэтому низкое содержание δ -феррита может быть мерой (индикатором) коррозионного процесса, а более важную роль играет атомно-магнитное состояние аустенита.

В связи с этим возникает необходимость исследовать коррозию аустенитных Fe-Cr-Ni сплавов, не содержащих α -фазу.

Цель

Целью данной работы является экспериментально выявить зависимость скорости коррозии от атомно-магнитного состояния аустенита, т.е. удельной магнитной восприимчивости аустенита (не содержащего δ -феррит) разных плавков, но одной марки сплава 06ХН28МДТ (ЭИ943).

Материал

В качестве материала для настоящего исследования был выбран сплав 06ХН28МДТ (ЭИ943), химический состав которого приведен в табл.1. Образцы подбирались из листовых промышленных поставок сплава 06ХН28МДТ. Толщина листов 1 мм. Так как числовые значения

удельной магнитной восприимчивости по ширине холоднокатаного листа были локально неравномерно распределены, то с целью усреднения с разных мест в шахматном порядке из каждой плавки вырезали по 10 образцов в виде параллелепипедов размером $\sim 6 \times 4 \times 1$ мм³.

Таблица 1

Химический состав сплава 06ХН28МДТ (ЭИ943), масс% / Chemical composition of the alloy 06ХН28МДТ (ЭИ943), mass%

Элемент	Плавка				
	№1	№2	№3	№4	№5
C	0,050	0,067	0,068	0,048	0,050
Mn	0,34	0,43	0,50	0,55	0,29
Si	0,49	0,56	0,55	0,71	0,57
Cr	24,29	22,69	21,82	22,69	23,44
Ni	27,40	27,62	27,47	27,7	27,48
Ti	0,80	0,60	0,57	0,67	0,90
S	0,006	0,005	0,004	0,006	0,004
P	0,028	0,029	0,032	0,028	0,032
Mo	2,88	2,77	2,56	2,56	2,53
Cu	2,73	2,68	2,62	2,54	2,76

Методика и результаты

Удельную магнитную восприимчивость определяли на магнитометрических весах [7] по методике [8, 9, 10]. Полученные значения удельной магнитной восприимчивости χ_0 приведены в табл.2. Таким образом, для плавков 1...5 сплава 06ХН28МДТ соответственно получены средние значения χ_0 : 2,95; 2,86; 3,58; 3,09; $2,96 \cdot 10^{-8}$ м³/кг.

С целью ускорения химической коррозии использовали модельную агрессивную среду “царская водка” (соотношение конц. кислот HCl:HNO₃ 3:1) и выдерживали образцы непрерывно в течении 0,5 часа при $t=30^\circ\text{C}$. После извлечения образцов из раствора, промывали в проточной

дистиллированной воде и взвешивали на аналитических весах АДВ-200 с точностью до 0,2 мг.

Таблица 2

Значения удельной магнитной восприимчивости вырезанных образцов сплава 06ХН28МДТ / The values of the specific magnetic susceptibility of the alloy samples cut 06HN28MDT

№	$\chi_0, 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$				
	№1	№2	№3	№4	№5
1	2,99	2,85	3,37	3,05	2,94
2	2,94	2,83	3,42	3,05	2,92
3	3,06	2,86	3,32	2,92	3,03
4	3,01	2,88	3,33	3,11	2,96
5	2,96	2,85	3,44	3,12	2,93
6	2,95	2,89	3,35	3,09	2,95
7	2,91	2,88	3,40	3,10	3,00
8	2,89	2,81	3,38	3,13	3,04
9	2,92	2,90	3,41	3,16	2,91
10	2,90	2,87	3,43	3,12	2,94
Среднее	2,95	2,86	3,38	3,09	2,96

Скорость коррозии K определяли по формуле $K=\Delta m/(S\cdot\tau)$, где Δm – потеря масс до и после коррозии, S – площадь поверхности образца, τ – время выдержки в агрессивной среде.

В таблице 3 приведены полученные значения K исследуемого сплава.

Таблица 3

Значения K вырезанных образцов сплава 06ХН28МДТ / Values of K cut alloy samples 06HN28MDT

№	$K, \text{ г}/(\text{м}^2\cdot\text{час})$				
	№1	№2	№3	№4	№5
1	1385	1385	1541	1545	1486
2	1420	1439	1508	1510	1467
3	1355	1366	1510	1555	1451
4	1388	1365	1498	1560	1485
5	1313	1359	1494	1570	1464
6	1398	1466	1528	1569	1447
7	1385	1432	1507	1525	1485
8	1378	1388	1527	1505	1453
9	1402	1369	1529	1549	1485
10	1388	1399	1546	1510	1479
Среднее	1381	1397	1519	1540	1470

Таким образом, получены такие средние значения скорости коррозии K соответственно для плавов 1...5: 1381, 1397, 1519, 1540, 1470 г/(м²·час).

Анализ экспериментальных зависимостей скорости коррозии K от удельной магнитной восприимчивости χ_0 аустенита сплава 06ХН28МДТ, не содержащей δ -феррит (рис.1) показывает: чем меньше χ_0 , тем выше скорость коррозии K .

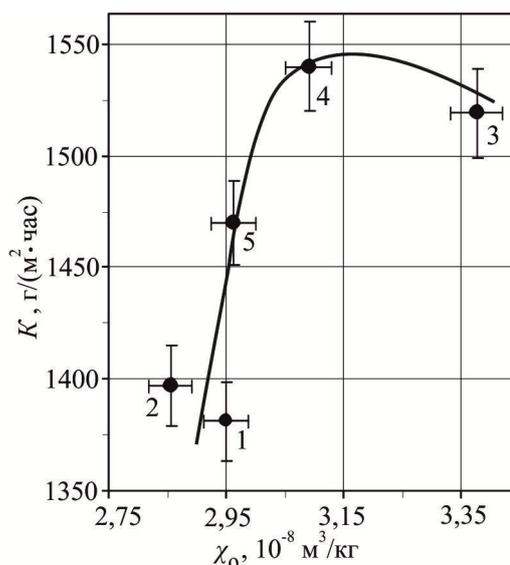


Рис. 1. Зависимость скорости коррозии K от удельной магнитной восприимчивости χ_0 аустенита исследуемого сплава 06ХН28МДТ (№ плавов 1...5) / Dependences of the corrosion rate K on the specific magnetic susceptibility χ_0 austenite of the investigated alloy 06HN28MDT (number of heats 1...5)

Следовательно, найден чувствительный параметр χ_0 , который способен различать скорость коррозии близких по химическому составу разных плавов, но одной марки сплава 06ХН28МДТ. Отсюда поведение коррозии можно оценивать не только с точки зрения атомно-кристаллического, но и атомно-магнитной структур, т.е. аустенитный сплав можно рассматривать с параллельной позиции как парамагнетик (а не только как кристалл). Для существования парамагнитного эффекта необходимо, чтобы электронные оболочки вещества обладали нескомпенсированными орбитальными и спиновыми магнитными моментами, которые и ориентируются в магнитном поле H [11]. Отсюда, путем изучения магнитных свойств аустенита можно получить ценную информацию о поведении аустенита под влиянием внешних факторов, например о его коррозионной стойкости.

Поскольку χ_0 определяет атомно-магнитную структуру аустенита, то можно предположить, что коррозионное поведение исследуемого аустенитного сплава зависит от атомно-магнитного (парамагнитного) состояния аустенита, предварительно сформированного еще до взаимодействия с агрессивной средой.

Данные результаты не противоречат полученным скоростям коррозии K для этих 1...5 плавов сплава 06ХН28МДТ соответственно: 0,095; 0,095; 0,143; 0,190 и 0,143 г/(м²·час) в нейтральной хлоросодержащей среде [5].

Из рис.2 следует, что скорость коррозии для двух пар плавов 1, 2 и 3, 5 одинаковые и соответственно равны 0,095 и 0,143 г/(м²·час) [5], а согласно нашим исследованиям скорости коррозии всех этих же пяти плавов разные (что соответствует разным χ_0), хотя

общий характер кривых рис.1 и рис.2 примерно совпадает.

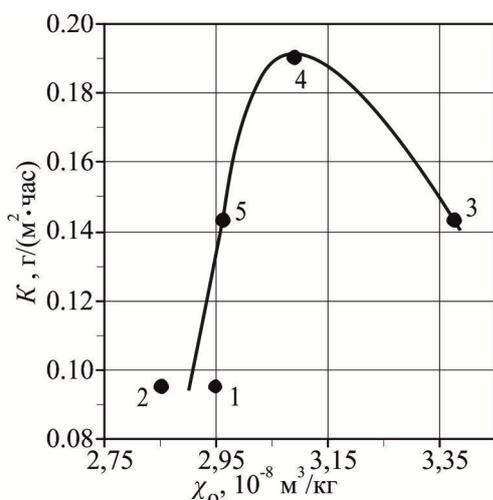


Рис. 2. Зависимость скорости коррозии K [5] от удельной магнитной восприимчивости χ_0 аустенита исследуемого сплава 06ХН28МДТ (№ плавки 1...5) / Dependences of the corrosion rate K [5] on the specific magnetic susceptibility χ_0 austenite of the investigated alloy 06HN28MDT (number of heats 1 ... 5)

Результаты

Следовательно, на основании проведенных экспериментальных попыток, можно предположить,

что выбранный нами параметр χ_0 является интегральным, который определяет суммарное до коррозии воздействие многих факторов.

Научная новизна и практическая ценность

Экспериментально установлено, что коррозионная стойкость (меньшая скорость коррозии) аустенитных Fe-Cr-Ni сплавов зависит от атомно-магнитного состояния аустенита – парамагнетика, которое определяется удельной магнитной восприимчивостью χ_0 : чем меньше χ_0 , тем больше коррозионная стойкость (меньшая скорость коррозии K) и наоборот.

Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования локальной коррозионной стойкости аустенитных Fe-Cr-Ni сплавов.

Выводы

1. Предполагается, что существенной причиной коррозионной стойкости аустенитных Fe-Cr-Ni сплавов, не содержащих δ -феррит, может быть атомно-магнитное состояние аустенита, определяемое парамагнитной удельной магнитной восприимчивостью.

2. Выявлена зависимость скорости K коррозии от удельной магнитной восприимчивости χ_0 сплава 06ХН28МДТ (ЭИ943): чем меньше χ_0 , тем меньше скорость коррозии K и наоборот.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Реформатская И. И. Влияние структурообразующих факторов на коррозионно-электрохимическое поведение железа и нержавеющей сталей / И. И. Реформатская // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. Хим. об-ва им. Д.И.Менделеева). – 2008. – Т. LII. – № 5. – С. 16-24. – Режим доступа: <http://www.chem.msu.ru/rus/jvho/2008-5/16.pdf>
2. Колотыркин Я. М. Металл и коррозия / Я. М. Колотыркин. – Москва : Металлургия, 1985. – 88 с.
3. Вахрушева В. С. О повышении надежности трубопроводов АЭС диаметром 325 мм из стали 08Х18Н10Т / В. С. Вахрушева, Т. Н. Буряк, Е. Я. Лезинская // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение». – 2005. – № 3. – С. 104-107. – Режим доступа: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/80396>
4. Вахрушева В. С. О современных требованиях к коррозионной стойкости труб из особо низкоуглеродистых нержавеющей сталей для атомной энергетики / В. С. Вахрушева, Т. А. Дергач, Г. Д. Сухомлин // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение». – 2008. – № 2. – С. 73-77. – Режим доступа: http://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2008_2/article_2008_2_73.pdf
5. Нарівський О. Е. Корозійно-електрохімічна поведінка конструкційних матеріалів для пластинчатих теплообмінників у модельних оборотних водах: дис. на здоб. наук. ступ. кандидата тех. наук: 05.17.14 / Нарівський Олександр Едуардович ; Фізико – механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. – Львів, 2009. – 200 с. Режим доступа: <http://dissertation.com.ua/node/679317>
6. Snizhnoi G. V. Dependence of the corrosion behavior of austenitic chromium-nickel steels on the paramagnetic state of austenite / G. V. Snizhnoi // Materials Science. – 2013. – V. 49. – № 3. – P. 341-346. – Режим доступа: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11003-013-9620-4>
7. Мирошниченко Ф. Д. Магнитометрические весы с униполярно-астигматической системой и механико-магнитным зацеплением призмы / Ф. Д. Мирошниченко, В. Л. Снежной // Приборостроение. – Киев : Техника. – 1966. – № 2. – С. 48-52.
8. Снежной В. Л. Влияние магнитного момента парамагнитной матрицы на определение низких содержаний α -фазы в аустенитных сталях / В. Л. Снежной, Ф. Д. Мирошниченко, В. Г. Каниболоцкий, Г. А. Охромий // ФММ. – 1970. – Т. 30. – № 2. – С. 363-366. – Режим доступа: http://impo.imp.uran.ru/fmm/Electron/vol30_2

9. Золотаревский И. В. О возможности определения магнитной восприимчивости парамагнитной матрицы содержащей ферромагнитные включения // И. В. Золотаревский, В. Л. Снежной // Заводская лаборатория. – 1978. – № 7. – С. 822-824.
10. Снежной Г. В. Интегральный физический метод идентификации α -фазы в аустенитных хромоникелевых сталях [Текст] / Г. В. Снежной, В. Г. Мищенко, В. Л. Снежной // Литье и металлургия. – 2009. – № 3(52). – С. 241-244. – Режим доступа: <http://rep.bntu.by/handle/data/16129>
11. Вонсовский С. В. Природа магнетизма / С. В. Вонсовский. – Москва : Знание, 1964. – 40 с.

REFERENCES

1. Reformatskaya I.I. *Vliyanie strukturoobrazuyuschih faktorov na korrozionno-elektrokhimicheskoe povedenie zheleza i nerzhavayuschih staley* [Influence of the structure defining factors on the corrosion-electrochemical behavior of iron and stainless steel]. *Rossiyskiy himicheskiy zhurnal* – [Russian journal of general chemistry]. 2009, V. 79, no. 9, pp. 1955-1964. (in Russian). Available at: <http://www.chem.msu.ru/rus/jvho/2008-5/16.pdf>
2. Kolotyркиn J.M. *Metall i korrozij* [Metal and corrosion]. Moscow: Metallurgy, 1985. 88p. (in Russian).
3. Vakhrusheva V.S., Buryak T.N., Lezinskaya E.Ya. *O povyishenii nadezhnosti truboprovodov AES diametrom 325 mm iz stali 08H18Ni10T* [On increase of reliability of NPS tubing with diameter 326 mm manufactured from steel 08X18Ni10Ti]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya «Fizika radiatsionnykh povrezhdeniy i radiatsionnoe materialovedenie»* [Problems of atomic science and technology. Series "Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science"]. 2005, no. 3, pp. 104-107. (in Ukrainian).
4. Vakhrusheva V.S., Dergach T.A., Sukhomlin G.D. *O sovremennykh trebovaniyakh k korrozionnoy stoykosti trub iz osobo nizkouglerodistykh nerzhavayuschih staley dlya atomnoy energetiki* [Present-day requirements to corrosion resistance of stainless tubes for nuclear power engineering]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya «Fizika radiatsionnykh povrezhdeniy i radiatsionnoe materialovedenie»* [Problems of atomic science and technology. Series "Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science"]. 2008, no. 2, pp. 73-77. (in Ukrainian). Available at: http://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2008_2/article_2008_2_73.pdf
5. Narivskiy O.E. *Korozivno-elektrokhimichna povedinka konstruktivnykh materialiv dlya plastinchatikh teploobminnikov u modelnih oborotnih vodakh. Kand. dissertation* [Corrosion-electrochemical behavior of structural materials for plate heat exchangers working in model waters. Ph. D. dissertation]. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the National Academy of Sciences. Lviv, 2009, 200 p. (in Ukrainian).
6. Snizhnoi G.V. *Dependence of the Corrosion Behavior of Austenitic Chromium-Nickel Steels on the Paramagnetic State of Austenite. Materials Science*. 2013, vol. 49. no. 3, pp. 341-346.
7. Miroshnichenko F.D., Snezhnoy V.L. *Magnitometricheskie vesyi s unipolyarno-astaticheskoy sistemoy i mekhaniko-magnitnyim zatsepleniem prizmi* [Magnetometer scales with unipolar-astatic system and mechanical-magnetic gearing prism]. *Priborostroenie* [Instrumentation]. 1966, no 2. – pp. 48-52. (in Ukrainian).
8. Snezhnoi V.L., Miroshnichenko F.D., Kanibolotsky V.G., Okhromy G.A. *Vliyanie magnitnogo momenta paramagnitnoy matritsy na opredelenie nizkikh soderzhaniy α -fazy v austenitnykh stalyakh* [Effect of magnetic moment of a paramagnetic matrix on the determination of low concentrations of α -phase in austenitic steels]. *Fizika metallov i metallovedenie* [Phys. Met. and Metallogr.]. 1970, vol. 2 no. 30, pp. 363-366. (in Russian).
9. Zolotarevskiy I.V. and Snezhnoy V.L. *O vozmozhnosti opredeleniya magnitnoy vospriimchivosti para-magnitnoy matritsy soderzhashey ferromagnitnyie vklyucheniya* [On the possibility of determining the magnetic susceptibility of a paramagnetic matrix containing ferromagnetic inclusions]. *Zavodskaya laboratoriya* [Works laboratory]. 1978, no. 7. – pp. 822-824. (in Russian).
10. Snizhnoi G.V., Mishchenko V.G., Snezhnoi V.L. *Integralnyi fizicheskiy metod identifikatsii α -fazy v austenitnykh hromonikelevykh stalyakh* [Integral physical method of α -phase identification in austenitic chrome-nickel steels]. *Lite i metallurgiya* [Minsk, Foundry Prod. and metall.]. 2009. no. 3/52. pp. 241-244. (in Belarus). Available at: <http://rep.bntu.by/handle/data/16129>
11. Vonsovskiy S.V. *Priroda magnetizma* [Nature of magnetism]. Moscow : Znanie, 1964, 40 p. (in Russian).

Стаття рекомендована до публікації д-ром. фіз.-мат. наук, проф. В.В. Погосовим (Україна), д-ром. фіз.-мат. наук, проф. В.М. Матюшиним (Україна)