

УДК 669.15-194.56:539.4

doi: 10.32620/aktt.2021.3.09

Г. В. СНИЖНОЙ¹, В. Л. СНИЖНОЙ²¹ Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна² Запорізький національний університет, Запоріжжя, Україна

КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ ХРОМОНІКЕЛЕВИХ СТАЛЕЙ ЗА ПАРАМАГНІТНИМ СТАНОМ АУСТЕНІТУ

Предметом вивчення в статті є процеси контролю та оцінки якості аустенітних хромонікелевих сталей. Якість сталей і виробів з них залежить від сукупності фізичних, хімічних і технологічних властивостей, які утворюються внаслідок фазово-хімічного складу і різноманітних видів обробки (температурної, деформаційної, лазерної, випромінювання та ін.). Визначення методики, яка дозволить доповнити або замінити різноманітні випробування виявленням одного параметру є досить актуальним. **Метою** є визначення методики для комплексної оцінки механічних та корозійних властивостей за одним параметром, який є чутливим до впливу зовнішніх факторів. Запропоновано використовувати питому парамагнітну сприйнятливості χ_0 аустеніту, як інтегральну характеристику для визначення впливу різноманітних факторів (хімічний склад, умови виплавлення, деформація, температура тощо) на властивості сталі. Параметр χ_0 є характеристикою атомно-магнітного стану аустеніту і надчутливою величиною до впливу зовнішніх факторів. **Завдання:** формалізувати кореляційний зв'язок між питомою парамагнітною сприйнятливостю χ_0 аустеніту і механічними та корозійними властивостями (тимчасовий опір розриву σ_b , умовна границя текучості $\sigma_{0.2}$, відносне видовження δ , швидкість корозії K). Використовуваними **методами** є: високочутливий магнітометричний метод для визначення магнітної сприйнятливості та низького вмісту феромагнітної фази у зразках досліджуваних сталей у початковому стані (до механічних і корозійних випробувань). Механічні показники визначали відповідно до ГОСТ 1497-84, значення корозійних втрат у хлоридвмісних розчинах - відповідно до ГОСТ 9.912-89. Отримані такі **результати**. Експериментально встановлено, що тенденції зміни механічних і корозійних властивостей сталей типу AISI 321 і AISI 304 корелюють з магнітною природою парамагнітної аустенітної матриці, яка визначається сумою магнітних моментів атомів, що приходяться на одиницю маси (питома намагніченість). **Висновки.** За допомогою питомої парамагнітної сприйнятливості аустеніту можливо визначати тенденцію зміни (підвищення або послаблення) механічних і корозійних властивостей. Низький вміст δ -фериту також може бути мірою (індикатором) поведінки зазначених властивостей.

Ключові слова: хромонікелева сталь; якість; аустеніт; питома магнітна сприйнятливості; тимчасовий опір розриву; границя текучості; відносне видовження; показник опору деформації Мартена-Волеса; корозія.

Постановка проблеми та мета

Сукупність фізичних, хімічних і технологічних властивостей визначають якість сталей і виробів з них. Залежно від наявних властивостей визначається галузь застосування і відповідна марка чи класифікація. Майбутні властивості сталі багато в чому визначається кінцевим хімічним складом, фазово-структурним складом, методами обробки (термообробка, механічна і ін.). В [1] представлено алгоритм виконання оцінювання якості матеріалів, відповідно до якого відбувається вибір методи випробування, згідно з якою визначаються необхідні кваліметричні методи оцінювання якості.

Для оцінки якості сталі використовуються два підходи. У першому випадку експериментальним шляхом знаходиться конкретний механічний (твер-

дість, ударна в'язкість, зносостійкість, границя міцності та ін.) або службовий (наприклад, швидкість корозії) параметр, який потім ставлять у відповідність конкретному ДСТУ або технічному завданню (вимозі замовника). Визначення кожного такого параметру потребує час, кваліфікований персонал, специфічного обладнання тощо. Так, виготовлення зразків для визначення механічних властивостей трудомісткий процес, а корозійні випробування можуть тривати декілька тижнів. Ці експериментальні дослідження знаходять відображення у стандартах підприємств з вхідного (вихідного) контролю матеріалів (продукції), тобто є обов'язковим на начальному і кінцевому етапі виробництва. Проміжні випробування, як правило, не проводяться в зв'язку з їх трудомісткістю та витратами.

Другим підходом є визначення та використання

одного фізичного параметра, який був би інтегральною характеристикою впливу різноманітних факторів (хімічний склад, умови виплавлення, вплив деформації та температури, тощо). Необхідною умовою є визначений зв'язок (кореляція) цього параметру з механічними і службовими властивостями, які визначають якість сталі. Якісний та своєчасний контроль фізико-механічних властивостей речовин сприяє підвищенню конкурентоспроможності машинобудівних підприємств.

Основною фазою аустенітних хромонікелевих сталей є аустеніт (деякі марки містять до 0,5% α -фази), то цілком природно розглянути одну з характеристик саме аустеніту. Поширеним засобом вивчення аустенітних матеріалів є розгляд гратки, форми зерен, дефектів, легуючих елементів. Однак кожний з цих параметрів не є інтегрованим, тобто не є відображенням всіх складових сформованої аустенітної матриці. Атомно-магнітний стан аустеніту характеризується питомою парамагнітною сприйнятливістю χ_0 , яка визначається сумарним магнітним моментом одиниці маси аустеніту за умови одиничного значення магнітного поля. Параметр χ_0 є комплексною характеристикою аустеніту, стан якого сформувався внаслідок наявних хімічних елементів, механічних та температурних дій, тобто χ_0 є чутливим до зовнішніх факторів [2].

Мета дослідження є оцінювання якості (зміна механічних та корозійних властивосте) сталей AISI 321 і AISI 304 за магнітним станом аустеніту (шляхом визначення питомої парамагнітної сприйнятливості аустеніту).

1. Матеріали та методика дослідження

Промислова аустенітна хромонікелева сталь може містити досить низьку ($0 \div 0,5\%$) кількість P_δ феромагнітного δ -фериту. Слід зауважити, що різниця між парамагнітною сприйнятливістю χ_0 аустеніту (γ -фаза) і магнітною сприйнятливістю χ зразка ($\gamma + \delta$), може бути досить значною. Експериментальні дослідження підтверджують пряму кореляцію між χ_0 аустеніту і якістю (корозійні [3] та механічні [4] властивості) аустенітних хромонікелевих сталей.

Кожна марка сталі, згідно вимогам і стандартам, повинна мати відповідні показники. Дотримання технологічного процесу однозначно дозволяє металургійним підприємствам отримувати сталь, яка задовольняє технічним умовам. Але в процесі виготовлення конструкцій або експлуатації, внаслідок виникнення деформації, впливу температури та виникнення нових фаз ці показники (вже конструкції) можуть погіршитися. Тому при відповідальному машинобудуванні бажано визначати реальну якість

(властивості) різноманітних плавок сталі, які належить до однієї марки. Тобто для відповідальних конструкцій потрібно застосовувати сталь з найкращими параметрами. Найбільш прийнятно, якщо рівень якості сталі визначати за одним параметром, тобто без трудомістких випробувань.

Для встановлення зв'язку між властивостями (механічними та корозійними) аустенітних хромонікелевих сталей і магнітним станом аустенітної матриці та виявлення впливу низького вмісту δ -фериту P_δ було обрано по п'ять промислових плавок (табл. 1) листової сталі AISI 321, AISI 304 («Тиссен-Крупп»).

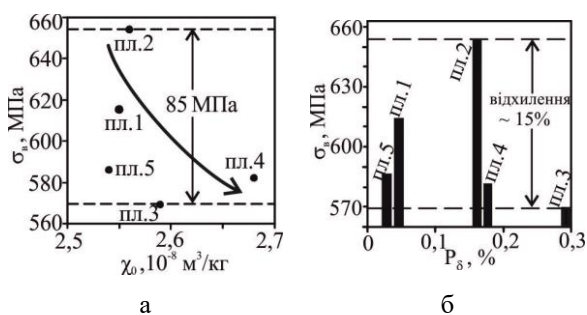
Таблиця 1
Хімічний склад досліджуваних сталей, мас. %

AISI 304					
	пл.1	пл.2	пл.3	пл.4	пл.5
C	0,071	0,067	0,075	0,050	0,030
N	0,048	0,046	0,055	0,044	0,039
Mn	1,23	1,74	1,65	1,70	1,81
Si	0,22	0,50	0,43	0,41	0,39
P	0,027	0,028	0,024	0,028	0,034
S	0,001	0,001	0,004	0,002	0,001
Cr	17,96	18,22	18,25	18,30	18,10
Ni	9,34	8,09	8,09	8,10	8,20
AISI 321					
	пл.1	пл.2	пл.3	пл.4	пл.5
C	0,035	0,060	0,064	0,030	0,040
N	0,012	0,011	0,012	0,013	0,013
Mn	1,66	1,59	1,22	1,62	1,70
Si	0,54	0,66	0,52	0,41	0,49
P	0,026	0,027	0,026	0,028	0,026
Cr	17,10	16,43	17,43	17,41	17,70
S	0,001	0,002	0,001	0,002	0,001
Ni	9,10	9,14	9,70	9,24	9,10
Ti	0,32	0,34	0,41	0,31	0,35

Плавки AISI 321 містили δ -ферит у межах $P_\delta \approx (0,04 \div 0,29) \%$, а парамагнітна сприйнятливість аустеніту $\chi_0 \approx (2,54 \div 2,68) \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$. Для AISI 304 – $P_\delta \approx (0,014 \div 0,11) \%$ і $\chi_0 \approx (2,23 \div 2,31) \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$. Зауважимо, що χ_0 і P_δ визначали для початкового стану зразків сталей, тобто до випробувань (механічних та корозійних). Суттєвий вплив такого низького вмісту δ -фериту на властивості є сумнівним через малу його кількість. Кількість δ -фериту перебуває в термодинамічній рівновазі зі станом аустеніту. Найменше порушення такого рівноважного стану спричиняє зміну кількості δ -фериту в аустенітній матриці, тому кількість δ -фериту P_δ пов'язана з атомно-магнітним станом аустеніту. Числові значення пока-

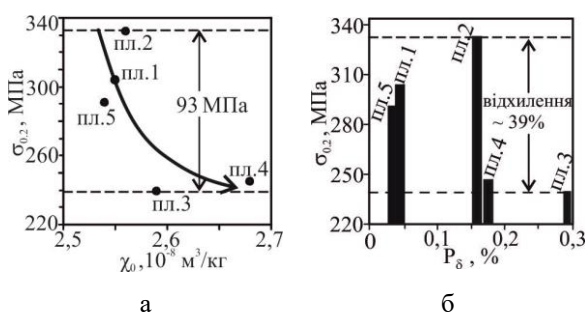
зників властивостей (механічні та корозійні) для цих самих плавів залучені з [5, 6].

На рис. 1 наведена тенденція зміни величини тимчасового опору розриву σ_b для різних плавів сталі AISI 321 від χ_0 аустеніту у початковому стані. Згідно вимогам величина σ_b повинна бути не менш 520 МПа, отже всі плавки відповідають умовам, оскільки їх $\sigma_b \approx (582 \div 654)$ МПа. Але відхилення між ними майже 15% (~ 85 МПа). Для умовної границі текучості $\sigma_{0.2}$ (рис. 2) взагалі маємо розкид 39% (~ 93 МПа), тобто $\sigma_{0.2} \approx (239 \div 332)$ МПа. Для виготовлення відповідальних деталей вибір більш якісної плавки є важливим фактором. Аналіз одержаних результатів показує, що зі збільшенням χ_0 тимчасовий опір розриву σ_b та умовна границя текучості $\sigma_{0.2}$ зменшуються.



а – від χ_0 аустеніту; б – від кількості P_δ δ -фериту

Рис. 1. Тенденція зміни величини тимчасового опору розриву σ_b для різноманітних плавів сталі AISI 321 від магнітних параметрів



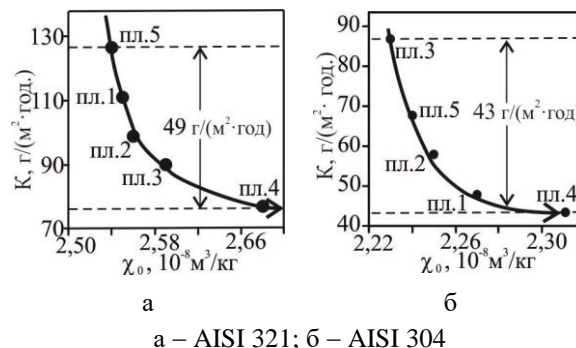
а – від χ_0 аустеніту; б – від кількості P_δ δ -фериту

Рис. 2. Зміна величини умовної границі текучості $\sigma_{0.2}$ для різноманітних плавів сталі AISI 321 від магнітних параметрів

Отримані експериментальні гіперболічні залежності швидкості корозії K від питомої парамагнітності сприйнятливості χ_0 аустеніту досліджуваних сталей AISI 321 і AISI 304 (рис. 3) свідчать: чим більша χ_0 аустеніту, тим менша швидкість корозії K сталі.

Зазначені тенденції змін властивостей відображені в матриці відповідності (табл. 2).

Також у матриці наведені кореляційні тенденції швидкості корозії K , відносного видовження δ , показників пластичності $P = \sigma_{0.2}/\sigma_b$ і опору деформації Мартена-Волеса $P_1 = (\sigma_b/\sigma_{0.2}) \cdot \delta$ сталей AISI 321 і AISI 304.



а – AISI 321; б – AISI 304

Рис. 3. Залежність швидкості корозії K від питомої парамагнітності сприйнятливості χ_0 аустеніту досліджуваних сталей

Таблиця 2

Матриця відповідності напрямку змін (тенденцій) між магнітними параметрами (χ_0 і P_δ) і механічними (σ_b , $\sigma_{0.2}$, δ , P , P_1), корозійними (K) властивостями хромонікелевих сталей

Тенденції, які визначаються експериментально		Тенденції, які прогнозуються					
χ_0	P_δ	K	σ_b	$\sigma_{0.2}$	δ	P	P_1
↑	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↓

↑ - збільшення величини, ↓ - зменшення величини

Аналіз одержаних результатів (див. табл. 2) показує, що для вибору більш якісної сталі (яка має кращі механічні та корозійні властивості) можливо використовувати, як критерій, питому парамагнітну сприйнятливості χ_0 аустеніту.

Висновки

1. Показано, що властивості різноманітних плавів однієї марки сталі мають розкид механічних і корозійних параметрів (в межах стандарту), пояснити який впливом хімічних елементів складно. Відхилення σ_b , $\sigma_{0.2}$, δ , P , P_1 , K для різних плавів можливо пояснити питомою парамагнітною сприйнятливості χ_0 аустеніту.

2. Запропонована матриця відповідності, за якою можливо вибрати більш якісну плавку сталі (яка має кращі механічні та корозійні властивості)

Література

1. Куриляк, В. В. Застосування кваліметричних метод для оцінювання якості ударно-навантажених матеріалів [Текст] / В. В. Куриляк, Г. І. Хімічева // Успехи физ. мет. – 2017. – Т. 18, № 2. – С. 155–175. DOI: 10.15407/ufm.18.02.155.
2. Snizhnoi, G. V. Magnetic state of the deformed austenite before and after martensite nucleation in austenitic stainless steels [Text] / G. V. Snizhnoi, M. S. Rasshchupkina // Journal of Iron and Steel Research, International. – 2012. – Vol. 19, No. 6. – P. 42-46. DOI: 10.1016/S1006-706X(12)60125-3.
3. Snizhnoi, G. V. Dependence of the corrosion behavior of austenitic chromium-nickel steels on the paramagnetic state of austenite [Text] / G. V. Snizhnoi // Materials science. – 2013. – Vol. 49, No. 3. – P. 341-346.
4. Сніжної, Г. В. Вплив магнітного стану аустенітної матриці на механічні властивості сталі AISI321 [Текст] / Г. В. Сніжної // Авиационно-космическая техника и технология. – 2014. – № 7(114). – С. 105-109.
5. Беліков, С. Б. Кінетика корозійних процесів сталей AISI 321 та 12X18H10T у нейтральних хлоридовмісних розчинах та швидкість їх корозії [Текст] / С. Б. Беліков, О. Е. Нарівський // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2011. – № 1. – С. 36–43.
6. Беліков, С. Б. Вплив механічних властивостей сталі AISI 304 на її пітинговість у хлоридовмісних середовищах [Текст] / С. Б. Беліков, О. Е. Нарівський // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2011. – № 2. – С. 29–33.

References

1. Kurylyak, V. V., Khimicheva, G. I. Zastosuvannya kvalimetrychnykh metod dlya ocinyuvannya

yakosty` udarno-navantazheny`x materiyaliv [Application of qualimetric methods for evaluation test of shock-loaded materials]. *Uspixy` fizy`ky` metaliv – Progress in Physics of Metals*, 2017, vol. 18, no. 2, pp. 155-175. DOI: 10.15407/ufm.18.02.155.

2. Snizhnoi, G. V., Rasshchupkina, M. S. Magnetic state of the deformed austenite before and after martensite nucleation in austenitic stainless steels. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2012, vol. 19, no. 6, pp. 42-46. DOI: 10.1016/S1006-706X(12)60125-3.

3. 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.

4. Snizhnoi, G. V. Vplyv magnitnogo stanu austenitnoyi matry`ci na mexanichni vlasty`vosti stali AISI321 [Influence of magnetic state austenitic matrix on mechanical properties of steel AISI 321]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2014, no. 7(114), pp. 105–109.

5. Belikov, S. B., Narivskyi, O. E. Kinety`ka korozijn`x procesiv stalej AISI 321 ta 12X18H10T u nejtral`ny`x xloridovmisny`x rozchy`nax ta shvy`dkist` yix koroziji [Kinetics of steel AISI 321 and 12X18H10T corrosion process in neutral chloride containing solutions and corrosion rate]. *Novi materialy` i texnologiyi v metalurgiyi ta mashynobuduvanni – New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering*, 2011, no. 1, pp. 36–43.

6. Belikov, S. B., Narivskyi, O. E. Vplyv mexanichny`x vlasty`vostej stali AISI 304 na yiyi pit-ingostijkist` u xloridovmisny`x sere dovny`shhax [Influence of mechanical properties of steel AISI 304 on its resistance to pitting in chloride containing environments]. *Novi materialy` i texnologiyi v metalurgiyi ta mashynobuduvanni – New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering*, 2011, no. 2, pp. 29–33.

Надійшла до редакції 05.05.2021, розглянута на редколегії 20.05.2021

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ СТАЛЕЙ ПО ПАРАМАГНИТНОМУ СОСТОЯНИЮ АУСТЕНИТА

Г. В. Снежной, В. Л. Снежной

Предметом изучения в статье является процесс контроля и оценки качества аустенитных хромоникелевых сталей. Качество сталей и изделий из них зависит от совокупности физических, химических и технологических свойств, которые образуются в результате фазового-химического состава и различных видов обработки (температурной, деформационной, лазерной, излучения и др.). Определение методики, которая позволит дополнить или заменить многочисленные испытания измерением одного параметра является весьма актуальным. **Целью** является нахождение методики для комплексной оценки механических и коррозионных свойств по одному параметру, который является чувствительным к воздействию внешних факторов. Предложено использовать удельную парамагнитную восприимчивость χ_0 аустенита интегральной характеристикой влияния различных факторов (химический состав, условия выплавки, деформация, температура и т.д.). Параметр χ_0 является характеристикой атомно-магнитного состояния аустенита и чувствительной величиной к воздействию внешних факторов. **Задача:** формализовать корреляционную связь между удельной па-

рамагнитным восприимчивостью χ_0 аустенита и механическими, коррозионными свойствами (временное сопротивление разрыву σ_b , условная граница текучести $\sigma_{0.2}$, относительное удлинение δ , скорость коррозии K). Используемые **методы**: высокочувствительный магнитометрический метод для определения удельной магнитной восприимчивости χ и низкого содержания ферромагнитной фазы образцов исследуемых сталей в исходном состоянии (до механических и коррозионных испытаний). Механические показатели определяли в соответствии с ГОСТ 1497-84, значение коррозионных потерь в хлоридосодержащих растворах – в соответствии с ГОСТ 9.912-89. **Получены следующие результаты**. Экспериментально установлено, что тенденция изменений механических и коррозионных свойств сталей типа AISI 321 и AISI 304 коррелируют с направлением изменения величины удельной парамагнитной восприимчивости χ_0 аустенитной матрицы, определяемой суммой магнитных моментов атомов, приходящихся на единицу массы (удельная намагниченность). **Выводы**. С помощью парамагнитной восприимчивости аустенита возможно определять тенденцию изменения (повышение или уменьшение) механических и коррозионных свойств. Низкое содержание δ -феррита также может быть мерой (индикатором) изменения указанных свойств.

Ключевые слова: хромоникелевая сталь; качество; аустенит; удельная магнитная восприимчивость; временное сопротивление разрыву; предел текучести; относительное удлинение; показатель сопротивления деформации Мартена-Волеса; коррозия.

QUALITY CONTROL OF CHROME-NICKEL STEELS BY THE PARAMAGNETIC STATE OF AUSTENITE

G. Snizhnoi, V. Snizhnoi

The **subject matter** of the article is the processes of monitoring and assessing the quality of austenitic chromium-nickel steels. The quality of steels and products made from them depends on the combination of physical, chemical and technological properties that are formed as a result of the phase-chemical composition and various types of processing (temperature, deformation, laser, radiation, etc.). Determination of a methodology that will supplement or replace multiple tests by measuring one parameter is highly relevant. The **goal** is to find a methodology for a comprehensive assessment of mechanical and corrosion properties in one parameter, which is sensitive to external factors. It is proposed to use the specific paramagnetic susceptibility of austenite χ_0 as an integral characteristic of the influence of various factors (chemical composition, melting conditions, deformation, temperature, etc.). Parameter χ_0 is a characteristic of the atomic-magnetic state of austenite and a sensitive quantity to the influence of external factors. The **tasks** to be solved are: to formalize the correlation between the specific paramagnetic susceptibility χ_0 of austenite and mechanical, corrosion properties (tensile strength σ_b , conditional yield stress $\sigma_{0.2}$, elongation δ , corrosion rate K). The **methods** used are: a highly sensitive magnetometric method for determining the specific magnetic susceptibility χ and the low content of the ferromagnetic phase of the samples of the studied steels in the initial state (before mechanical and corrosion tests). Mechanical indicators were determined in accordance with GOST 1497-84, the value of corrosion losses in chloride-containing solutions - in accordance with GOST 9.912-89. The following **results** were obtained. It has been experimentally established that the tendency of changes in the mechanical and corrosion properties of steels of the AISI 321 and AISI 304 types correlates with the magnetic nature of the paramagnetic austenite matrix, which is determined by the sum of the magnetic moments of atoms per unit mass (specific magnetization). **Conclusions**. It is shown that the specific paramagnetic susceptibility of austenite can be used to determine the behavior (increase or decrease in mechanical and corrosion properties). It is shown that a low content of δ -ferrite can also be a measure (indicator) of the behavior of these properties.

Keywords: chromium-nickel steel; austenite; quality; specific magnetic susceptibility; ultimate tensile strength; yield strength; elongation; Marten-Voles deformation resistance index; corrosion.

Сніжний Геннадій Валентинович – д-р техн. наук, зав. каф. мікро- та наноелектроніки, Національний університет "Запорізька політехніка", Запоріжжя, Україна.

Сніжний Валентин Лук'янович – канд. фіз.-мат. наук, доц. каф. прикладної фізики та наноматеріалів, Запорізький національний університет, Запоріжжя, Україна.

Gennadii Snizhnoi – Doctor of Technical Sciences, head of Dept. of Micro- and Nanoelectronics, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhya, Ukraine,
e-mail: snow@zntu.edu.ua, ORCID: 0000-0003-1452-0544, Scopus Author ID: 54406427800,
ResearcherID: Q-4033-2019, <https://scholar.google.com.ua/citations?user=54406427800>.

Valentin Snizhnoi – Candidate of Physical and Mathematical Science, docent of Dept. of Applied Physics and Nanomaterials, Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhya, Ukraine,
e-mail: valentinsnezhnoy@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6901-9920, Scopus Author ID: 6505865034