

Фрактальна параметризація щільності розподілу включень в структурі металу зварних швів

Головко В. В.^{*}, доктор технічних наук, провідний науковий співробітник, завідувач відділу, v_golovko@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2117-0864>

Штофель О. О.^{***}, кандидат технічних наук, науковий співробітник, старший викладач, o.shtof@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0965-6340>

Чижська Т. Г.^{**}, старший викладач, chijskaya@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8657-5363>

^{*}Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ

^{**}Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

Одним із сучасних запропонованих методів, який активно застосовується до питань діагностики металевих конструкцій є метод фрактального аналізу. За допомогою цього методу шукають взаємозв'язки між фрактальною розмірністю окремих складових структури металу та його механічних властивостей.

Комплексне використання мікроаналізу та фрактального аналізу дозволяє не тільки співставити характеристики структури, але і віднайти числову параметризацію елементів цієї структури.

Проблема поліпшення металоконструкцій зварних швів і механічних властивостей залишається актуальною у зв'язку з постійним збільшенням у зварних конструкціях високоміцних низьколегованих сталей. Як відомо, механічні властивості зварних швів визначаються їх структурними компонентами, в тому числі неметалевими включеннями.

Суто якісна оцінка на підставі стандарту ДСТУ 8966:2019 не дає можливості для ґрунтовного аналізу такої важливої характеристики, як розподіл включень за розмірами та характером розподілу включень у металевій матриці. Існуючі знання ґрунтуються на особливостях впливу неметалевих включень на механічні властивості зварних швів сталі, що вимагає постійного розширення та поглиблення, на що спрямована дана робота. Метод фрактального аналізу дозволяє розглядати неметалеві включення як порожнечі в металевій матриці, що дає можливість для параметризації характеристик включень в структурі металу.

В роботі описана методика, що враховує відстань між включеннями, а також розмір включень, які різним чином впливають на механічні характеристики зразків. Зокрема, ця стаття є продовженням роботи [1] у якій описаний підхід пошуку взаємозв'язків між фрактальними розмірностями та механічними властивостями. В даній роботі акцент зроблений на вплив запропонованих інокулянтів на механічні властивості через розподіл включень по зразку металу.

Ключові слова: фрактал, включення, мікроструктура, інокулянти, розподіл.

Методи дослідження та контролю якості металів

Метод металографічного та фрактального аналізів було застосовано для дослідження зразків зварних швів, отриманих при зварюванні стикових з'єднань сталі 09Г2 дротом Св-08ГН2МА в середовищі захисного газу М21. З метою виявлення особливостей впливу різних за складом включень на структуру та механічні властивості металу до зварних швів під час формування зварювальної ванни вводили дисперсні частинки тугоплавких сполук за методикою [2]. При плануванні експериментів виходили з того, що досліджені шви мають приблизно однаковий хімічний склад і відрізняються лише складом, вмістом та розподілом неметалевих включень. Хімічний склад основного металу (ОМ) та металу досліджених швів, а також механічні властивості (границі плинності $\sigma_{0,2}$ та міцності σ_B , відносне подовження δ , відносне звуження ψ , ударна в'язкість KCV, дійсна напруга руйнування S_k) металу швів наведено в табл.1 та табл. 2, відповідно.

Таблиця 1

Хімічний склад основного металу (ОМ) та металу досліджених швів

Table 1

Chemical composition of the base metal (OM) and the metal of the examined seams

№ зразка	C	Si	Mn	S	P	Ni	Mo	Al	Ti	Іноку-лянт
ОМ	0.088	0.680	1.57	0.012	0.010	0.13	0.08	0.015	0.004	
30	0.049	0.298	1.39	0.023	0.015	2.26	0.25	0.039	0.008	–
TiC	0.054	0.263	1.28	0.025	0.011	2.22	0.26	0.035	0.009	TiC
TiN	0.035	0.317	1.40	0.019	0.009	2.29	0.26	0.036	0.011	TiN
SiC	0.066	0.270	0.92	0.016	0.024	1.72	0.23	0.021	0.005	SiC
TiO ₂	0.035	0.405	1.24	0.016	0.021	1.97	0.27	0.031	0.027	TiO ₂
Al ₂ O ₃	0.034	0.324	1.12	0.017	0.023	2.15	0.29	0.032	0.025	Al ₂ O ₃

Таблиця 2

Результати механічних випробувань металу досліджених швів

Table 2

Results of mechanical tests of the metal of the studied seams

№ зразка	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCV (T = - 40 °C), Дж/см ²	S_k , МПа
30	693	605	14	49	53	1359
TiC	716	644	19	63	73	1935
TiN	712	580	5.3	14.7	35	835
SiC	817	755	6.8	12.8	44	937
TiO ₂	644	586	19	60	60	1610
Al ₂ O ₃	622	533	19	65	65	1777

З металу швів вирізали поперечні шліфи для металографічного аналізу та виготовляли зразки для визначення механічних властивостей.

Мікроаналіз включень проводили на зображеннях, які були отримані при збільшенні 1000, на мікроскопі NEOPHOT-32 із застосуванням цифрової фотокамери OLYMPUS.

Фрактальний аналіз був проведений за методом Мінковського до таких інформаційних одиниць, як включення [1]. Для мінімізації похибок в обрахунках, використовувались підготовлені бінарні зображення.

З наведених зображень (рис. 1) можна побачити, складність проблеми числового оцінювання щільності розподілу неметалевих включень в металі на прикладі співставлення зображень отриманих на зразках TiC, TiN, SiC, TiO₂, Al₂O₃ та базового зразка (ЗО), які характеризуються наявною різницею розмірів, вмісту та розподілу включень.

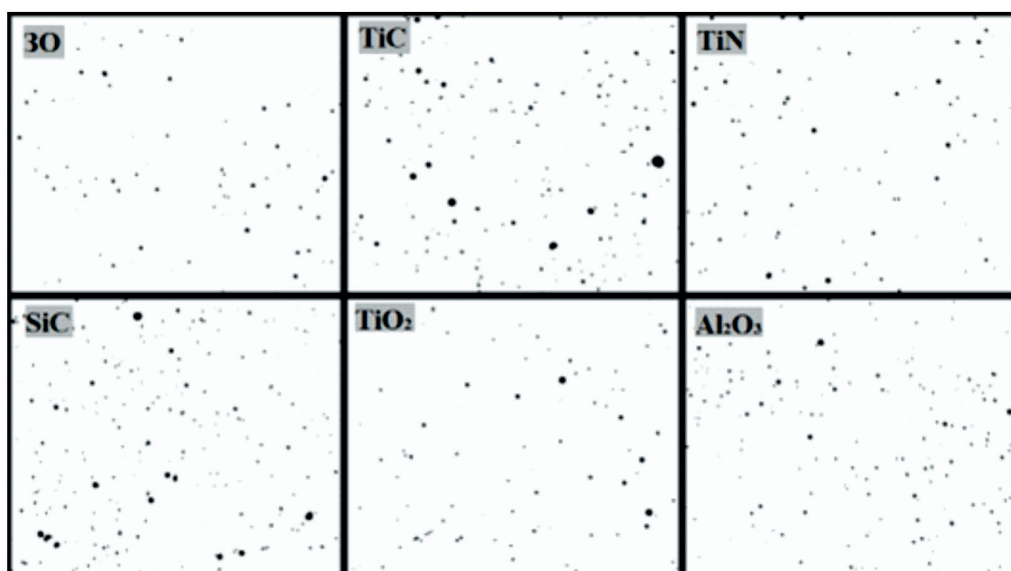


Рис. 1. Шліфи зразків металу шва без інокулянтів – зразок ЗО та з введенням інокулянтів – зразки TiC, TiN, SiC, TiO₂ та Al₂O₃.

Fig. 1. Sections of weld metal samples without inoculants – ЗО and with inoculants – TiC, TiN, SiC, TiO₂ and Al₂O₃.

Визначити різницю у вмісті та розподілі різних за розміром включень досить складно, тому було застосовано додаток, який пришвидшує роботу оцінки зображення [3]. Результати статистичної обробки зображень програмним методом [4], дають можливість оцінити розподіл включень за розмірами, наприклад, в діапазоні [$<0.30\mu\text{м}$), [$0.30\text{--}0.50\mu\text{м}$), [$0.55\text{--}0.80\mu\text{м}$] та будь якими, які задає користувач [5].

Вважається, що включення невеликого розміру до $0.3\mu\text{м}$ мають невеликий вплив на формування мікроструктури та механічні властивості металу швів. Проте, якщо включення невеликих розмірів розташовуються на малих відстанях одне від одного або «злипаються» (рис. 2), то їх вплив на механічні властивості металу може ставати вагомим.

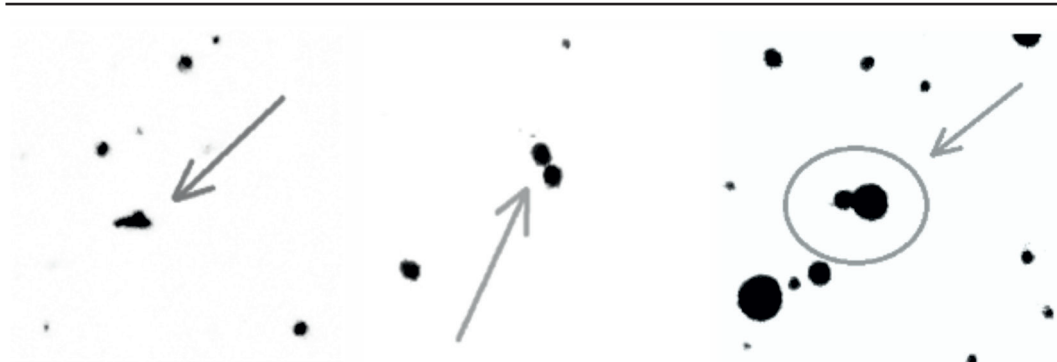


Рис. 2. Приклади скупчення включень в металі досліджених швів.

Fig. 2. Examples of inclusions accumulation of the studied metal seams.

Навколо включень в металевій матриці формуються певні напруження. З віддаленням від границі, між матрицею і включенням поле далеко діючих напруг спадає. Чим більший розмір включення, тим більша величина напруги поблизу міжфазного кордону. Напруги в зонах, прилеглих до включення, можуть перевищувати межу плинності і сприяти розвитку пластичної деформації матриці, що сприяє зменшенню напруги. Навколо включення створюється пластична зона, напруги в якій не перевищують межу плинності матриці. Поза цією зоною зберігаються пружні напруги, які поширюються на відстань, що перевищує радіус включення в 4-5 разів [6].

Мета роботи полягала в дослідженні особливостей впливу розмірів та щільності розподілу включень на механічні властивості металу зварних швів, і, зокрема, залежності від фрактального параметру розміру і щільності розподілу включень. З цією метою доцільно використання методу фрактального аналізу.

Результати фрактального аналізу розподілу включень за розмірами у визначених діапазонах та відповідний фрактальний параметр наведено у табл. 3.

Таблиця 3 містить результати D фрактальної розмірності та кількості включень, які були визначені при аналізі не менше ніж з п'яти експериментів.

Таблиця 3

Результати розподілу включень за розмірами та фрактальний параметр вмісту включень

Table 3

The results of the distribution of inclusions by size and the fractal parameter of the content of inclusions

Зразок	Zn	TiC	TiN	SiC	TiO ₂	Al ₂ O ₃
Фрактальний параметр D	0.8928	0.9284	0.91	0.9074	0.9209	0.9196
Діапазон розміру включення	Кількість включень (вміст), шт.					
[<0.30)	26	15	39	18	8	10
[0.30 - 0.50)	53	30	59	37	17	12
[0.55 - 0.80]	42	31	68	42	24	20

Дані обраховувались за допомогою програм ImageJ, Fractal та програмним додатком зазначеним вище [3-5].

Результати статистичної обробки зображень (рис. 1) та експериментальних результатів (табл. 3) представлені на рис. 3, де наведено дані розподілу неметалічних включень за вмістом, дають можливість оцінити розподіл включень за розміром в трьох розмірних діапазонах. З наведених даних (рис. 3) видно, що зразки мають невелику кількість включень у межах від до 0,3 мкм. Включення із розмірами у межах від 0,5 мкм до 0,8 мкм переважають за вмістом у зразках металу швів інокульованих дисперсними тугоплавкими сполуками (TiC, TiN, SiC, TiO₂, Al₂O₃). Використання методів фрактального аналізу дозволяє провести таке оцінювання, яке враховує як загальний вміст неметалевих включень, так і їх розподіл за розміром в металі швів. Адже, утворення тріщин поблизу включень є складним багатостадійним процесом. Умовою високої міцності металів та сплавів, зміцнених деформацією, є висока щільність дислокацій, рух яких має бути загальмовано різними бар'єрами, до яких належать також і неметалеві включення [6].

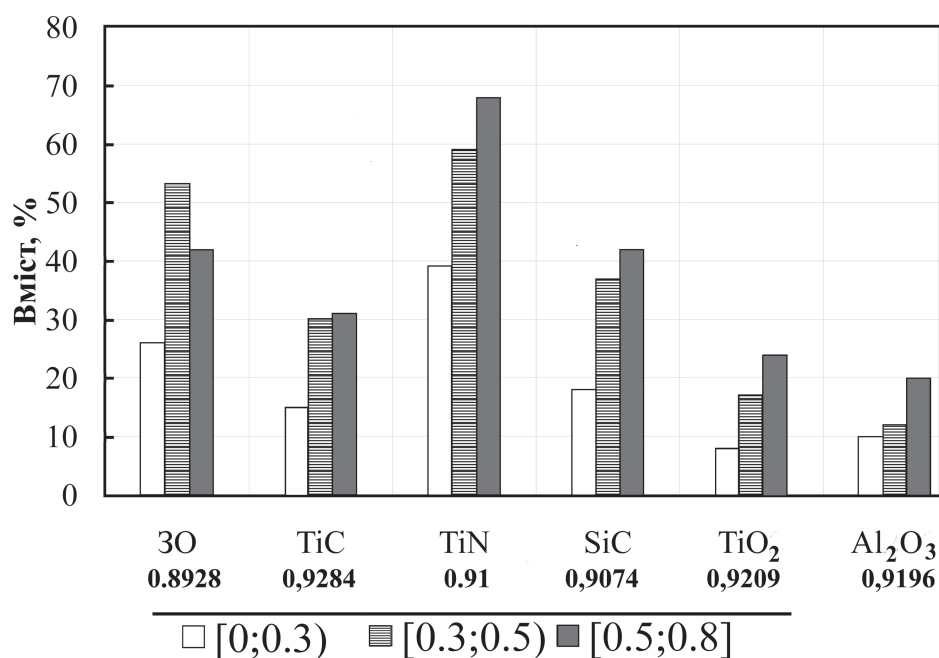


Рис. 3. Розподіл за вмістом неметалевих включень різних розмірів від <0,30 до 0,80 мкм на шліфі зразків, з врахуванням фрактальної розмірності.

Fig. 3. Histogram of non-metallic inclusions of various sizes from <0.30 to 0.80 μm on the section of the samples, taking into account the fractal dimension.

Результати проведення фрактальної параметризації дають можливість проаналізувати розподіл включень у площі шліфав залежності від відстані до найближчого включення. Критичною вважається відстань між сусідніми включеннями до п'яти діаметрів радіуса включення. Отримані результати візуально представлені на рис. 4. Вплив об'ємного вмісту включень на

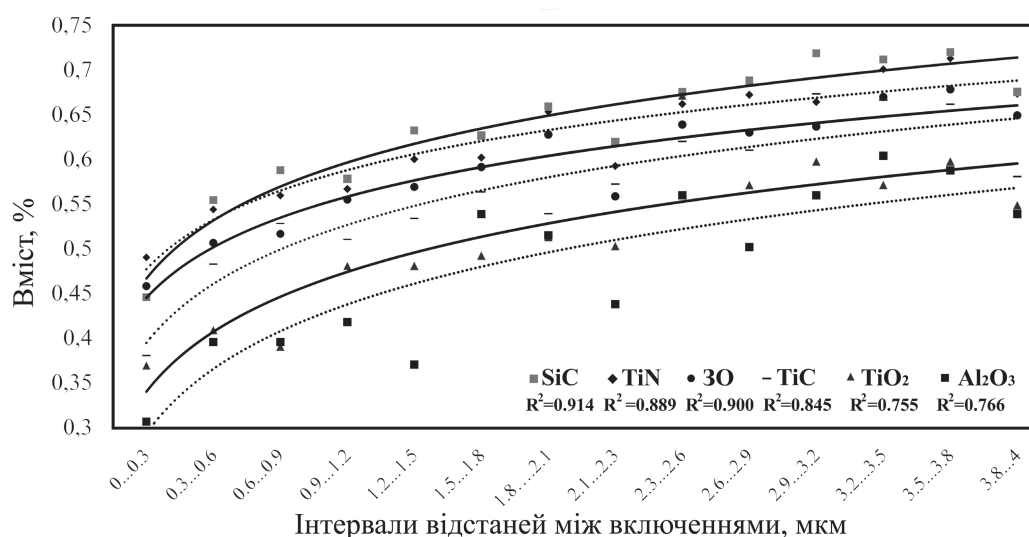


Рис. 4. Щільність розподілу включень на площі шліфа.

Fig. 4. Density of inclusions distribution on the area of the section.

механічні властивості сталей однозначне: чим більше їх міститься в сталі, тим нижчий рівень характеристик міцності та пластичності [7].

Результати наведені на рис. 4 для розмірів включень в межах від $< 0,30$ мкм до $0,8$ мкм показують помітний розкид експериментальних даних, що може бути описано лише поліноміальною залежністю. Це свідчить про те, що модель прогнозування, яка описує вплив вмісту неметалевих включень на їх фрактальний параметр, повинна містити додаткові характеристики.

На рис. 5 наведено результати визначення характеру розподілу включень в металевій матриці, а саме відстані між включеннями різних розмірів, які мають вплив на напружений стан у прилеглому шарі металу. З даних видно суттєву різницю в щільності розподілу неметалевих включень. Включення в структурі швів можуть бути розташовані більш-менш рівномірно і на відстані одне від одного більше п'ятикратного розміру включень (≥ 5), або у вигляді скупчень (≤ 5), чи розташовані у вигляді ланцюжків на границях зерен. В останніх двох випадках такі скупчення можуть бути осередками зародження крихкого руйнування металу. З даних, наведених на рис. 5 видно зростаючу степеневу залежність для всіх зразків з різним ступенем апроксимації. Так як, стандарт ДСТУ 8966:2019 не враховує щільність розподілу включень в металевій матриці, то даний підхід дає можливість більш ретельно дослідити чинники, які впливають на показники структури. Адже у випадках, коли включення розташовані рівномірно по всьому об'єму металу, то субмікроскопічні частинки, які приносять найменший внесок в рівень напруги, у ряді випадків є корисними. Як показано на рис. 5, збільшення значень показників пластичності (рис. 5 а), ударної в'язкості за температури -40 °C (рис. 5 б) та спротиву відриву (рис. 5 г), добре корелюється зі щільністю розподілу включень (рис. 4).

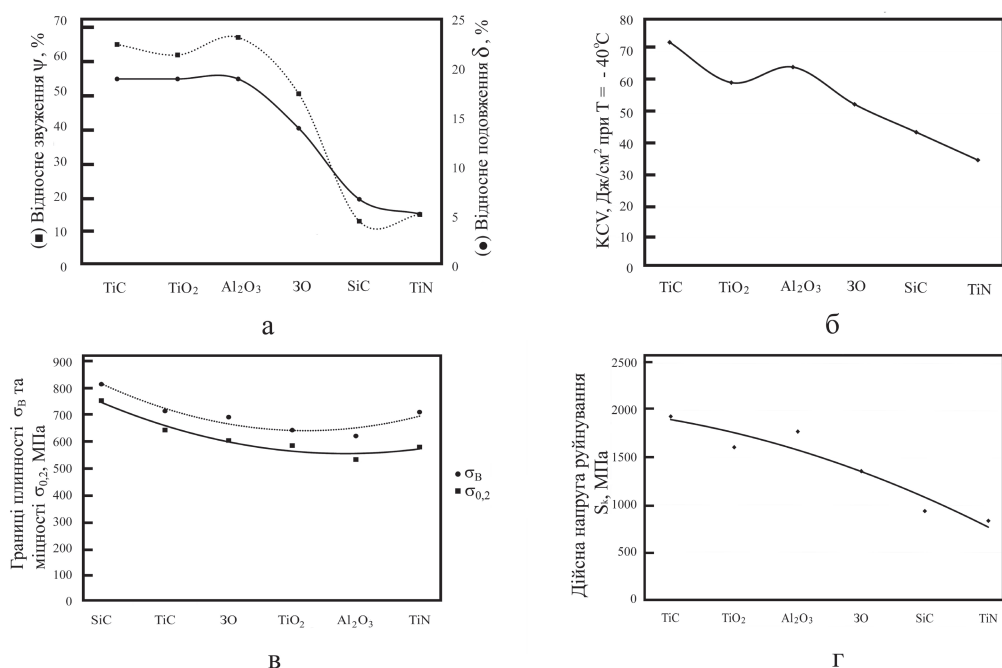


Рис. 5. Вплив фрактального параметру включень в металі досліджених швів на: а – показники відносного подовження та відносного звуження; б – ударну в'язкість при температурі – 40 °С; в – границі плинності та міцності; г – дійсну напругу руйнування.

Fig. 5. The influence of the inclusions fractal parameter of the studied metal seams on: а – indicators of relative elongation and relative narrowing; б – impact viscosity at a temperature – 40 °C, в – yield and strength limits; г – the actual failure stress.

Висновки

Досліджено можливість встановлення та аналізу щільності розподілу включень в металі зварних швів інокульованих дисперсними частинками тугоплавких сполук. Показано вплив щільності розподілу неметалевих включень в металевій матриці на механічні властивості металу швів низьколегованих сталей. Встановлено вплив інокулянтів різного складу (оксидів, карбідів та нітридів) на фрактальні параметри включень в металевій матриці та механічних властивості металу швів. Експериментально підтверджено існування зв'язку між фрактальними параметрами включень і механічними властивостями металу зварних швів низьколегованих сталей.

Для подальшого розширення бази знань в тріаді «склад – структура – властивості» доцільно розширити методику фрактального аналізу та опис структурних складових металу швів та використання методів мультифрактального аналізу.

Література

1. Головка В.В., Штофель О.О. Фрактальна розмірність і мультифрактальний аналіз структури металу зварних швів // Науково-технічний журнал «Металознавство та обробка металів». – 2022. – №3. – С. 51-59. <https://doi.org/10.15407/mom2022.03.051>

2. Костін В.А., Жуков В.В., Берднікова О.М., Головко В.В., Кушнарєва О.С. Вплив модифікування металу зварних швів високоміцних низьколегованих сталей на їх структуру та властивості // Автоматичне зварювання. – 2021. – № 5. – Р. 57-63. <https://doi.org/10.37434/tpwj2021.05.10>
3. Головко В. В., Штофель О.О., Короленко Д.Ю. Пришвидшений метод обрахунку неметалічних включень на шліфі // Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції «Actual problems of learning and teaching methods». - Відень, 2022. – С. 567-570. <https://doi.org/10.36074/mcnd-03.12.2021>
4. Короленко Д. Ю., Штофель О. О. Фрактальний аналіз та його можливості у задачах металознавства // Матеріали II Міжнародної наукової конференції «Наукові тренди постіндустріального суспільства: матеріали». – Запоріжжя, 2021. – С. 106-108. <https://doi.org/10.36074/mcnd-03.12.2021>
5. Штофель О., Короленко Д., Головко В. Комп'ютеризація процесу обрахунку параметрів неметалічних включень в металі // The 7th International scientific and practical conference «Application of knowledge for the development of science». – Stockholm, 2023. Р. 423-426.
6. Губенко С.И. Неметаллические включения и прочность сталей. Физические основы прочности сталей. – Германия: Palmarium academic publishing, 2015. – 476 с.
7. О.О. Штофель, В.В. Головко, Т.Г. Чижська, Застосування фрактального та металографічного аналізів для оцінки якості металу зварних швів // Автоматичне зварювання. – 2021. – № 5. – С. 70-74.

References

1. Golovko V.V., Stofel O.O. *Metalozn. obrobka met.*, 2022, No. 3, pp. 51-59 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/mom2022.03.051>
2. Kostin V.A., Zhukov V.V., Berdnikova O.M., Holovko V.V., Kushnaryova O.S., *Avtomatychne zvaryuvannya*, 2021, No.5, pp. 62-69 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.37434/tpwj2021.05.10>
3. V.V. Golovko, O.O. Shtofel, D.Yu. Korolenko. Accelerated method of calculation of non-metallic inclusions on a grinding wheel // XI International scientific and practical conference "Actual problems of learning and teaching methods", Vienna, 2022, С. 567-570. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.46299/ISG.2022.2.11>
4. Korolenko D.Yu., Shtofel O.O., *Scientific trends of post-industrial society: materials of the II International scientific conference*, Abstract of Papers, Zaporizhzhia, 2021, pp. 106-108 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.36074/mcnd-03.12.2021>
5. Shtofel O., Korolenko D., Golovko V., *The 7th International scientific and practical conference "Application of knowledge for the development of science"*, Abstract of Papers, Stockholm, 2023, pp. 423-426. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.46299/ISG.2023.1.7>
6. Gubenko S.I. *Nemetallicheskiye vklyucheniya i prochnost' staley. Fizicheskiye osnovy prochnosti staley* (Non-metallic inclusions and strength of steels. Physical basis of strength of steels), Germany: Palmarium academic publishing, 2015, 476 p. [in Russian].
7. Stofel O.O., Golovko V.V., Chyzhska T.G., *Avtomatychne zvaryuvannya*, 2021, No. 5, pp. 70-74 [in English]. <https://doi.org/10.37434/tpwj2021.05.11>

V. V. Holovko, O. O. Shtofel, T. G. Chyzhska

Fractal parameterization of the inclusion distribution density in the welded joint metal structure.

Summary

One of the modern proposed methods actively used for diagnosing metal structures is the method of fractal analysis. This method seeks to find the conjunction between the fractal dimension of individual components of the metal structure and its mechanical properties.

The comprehensive use of microanalysis and fractal analysis allows not only for comparing structural characteristics but also for finding a numerical parameterization of the elements of this structure.

The problem of advance the mechanical properties of welded joints in metal structures remains relevant due to the constant increase in high-strength low-alloy steels used in welded structures. As known, the mechanical properties of welded joints are determined by their structural components, including non-metallic inclusions.

A purely qualitative assessment based on the DSTU 8966:2019 standard does not provide an opportunity for a thorough analysis of such an important characteristic as the distribution of inclusions by size and the character of their distribution in the metal matrix. Existing knowledge is based on the peculiarities of the influence of non-metallic inclusions on the mechanical properties of steel welded joints, which requires constant expansion and deepening cognitions, as this work aims to do. The method of fractal analysis allows considering non-metallic inclusions as voids in the metal matrix, which enables parameterization of the inclusion characteristics in the metal structure.

The paper describes a methodology that takes into account the distance between inclusions as well as the size of inclusions, which differently affect the mechanical characteristics of the samples. In particular, this article is a continuation of the work [1], which describes an approach to finding relationships between fractal dimensions and mechanical properties. This work focuses on the impact of proposed inoculants on mechanical properties through the distribution of inclusions throughout the metal sample.

Keywords: fractal, inclusion, microstructure, inoculants, distribution.