

в сварних швах. Для проведенного аналізу ефективності многокласового розпізнавання технічного со-
стояння об'єкта використано нейросетевий класифікатор.

Ключевые слова: многокласовое распознавание; вектор диагностических признаков; нейросетевый классифи-
катор; вероятностная нейронная сеть; локализация многоочагового повреждения.

¹⁾S. Rupich, ²⁾O. Lukianchenko

¹⁾National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

²⁾Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine,

MULTI-CLASS RECOGNITION FOR DETERMINATION THE TECHNICAL STATE OF THE WELDED JOINT TANK WITH DEFECTS BY USING NEURAL NETWORK CLASSIFIER

The paper shows the efficiency of the multi-class recognition of technical states the welded joint tank by using the neu-
ral network classifier that based on Probabilistic Neural Network.

Implementation of modern multichannel monitoring systems for determination the technical state of spatial objects re-
quires researching of changes of a stress-strain state construction elements which function under the operation pressure
and possible impact its structural integrity. Such researching are needed for prevention of cracks or damage determining
and future prediction of object's technical state.

In the paper the tasks of a multi-class recognition of a state of multi-site damage the welded joint tank are determined.
In the research was created the model of the object with probable location places cracks. One of them is a vertical crack
and two are horizontal. Directions of their propagation are given. Cracks have the same value. The first researching in-
cluded when cracks turn up one by one. The next one related with multi-focal defects when cracks were arised and they
evolve in parallel and independently. The data of strain in the structural of the welded joint tank where sensors were
attached is given.

The research of the possibility of the error-free recognition was conducted by the developed classifier based on the
stress-strain state of the geometric model of the tank structural elements with multi-site damage, where sensors are lo-
cated. The development of the classifier was done by using Probabilistic Neural Network, which provides the best re-
sults of a multi-class recognition for determination technical state of spatial object with multidimensional vectors of
diagnostic features. As a result, the probability of recognition from the network influence parameter, which shows the
effectiveness of the neural network classifier for localization of single damage and localization of multiple cracks, was
established.

Keywords: multichannel recognition; diagnostic features vector; neural network's classifier; Probabilistic Neural Net-
work; localization of damage; influence parameter.

Надійшла до редакції
03 жовтня 2019 року

Рецензовано
11 жовтня 2019 року

УДК 620.1: 54.03

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДО ВИВЧЕННЯ ЗМІНИ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛУ

¹⁾Штофель О. О., ²⁾Рабкина М. Д.

¹⁾Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

²⁾Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ, Україна

E-mail: o.shtof@gmail.com

В роботі описується застосування методу фрактального аналізу на прикладі структури високоякісної
конструкційної вуглецевої сталі марки 20К (вміст вуглецю 0.16-0.24 %), яка використовувалась для виготов-
лення обичайок ректифікаційних колон. Всі експерименти проводились при температурі від -50 °С до +50 °С.
За марочником сталі властивості зразка змінюються не суттєво, а отже і похибка експерименту зводиться
до мінімальної.

Метод фрактального аналізу в роботах з оцінки якості металопродукції зарекомендував себе, як новий якісний підхід, який базується саме на зміні структури металу і є інваріантним при різних збільшеннях фотографії структури зразка. Метод фрактального аналізу може бути застосований до будь якого типу та класу металу, але у попередніх роботах і в цій, обраний метал із переважно ферито-перлітною структурою. Підприємствам вибору саме ферито-перлітних металів є мета започаткування єдиного підходу вивчення певного типу металу з використанням фрактального аналізу.

У роботі проаналізовано результати різних типів випробувань, надані порівняльні характеристики їх фрактальних розмірностей. Проведено випробування зразків на короткочасний розтяг та ударний вигин. Ударний вигин дає найбільш чутливі показники щодо структурного стану металу, в той час, як випробування на короткочасний розтяг описує енергетичні зміни. Методом фрактального аналізу досліджено тимчасові криві при ударному навантаженні і відповідні поверхні зламів.

Основними умовами започаткування тріщини є усереднене напруження – певний енергетичний бар'єр, після якого виникає тріщина, а також накопичена енергія мікронапружень. В роботі зроблено припущення, що основна роль прояву анізотропії визначається енергією розповсюдження і майже не залежить від енергії зародження тріщини.

Таким чином, співставлення фрактальних розмірностей кривих руйнування з відповідними фрактальними розмірностями поверхонь зламів, показали, що вплив анізотропії прокату має місце лише на стадії розповсюдження тріщини, енергія зародження тріщини практично не залежить від напрямку прокату.

Ключові слова: фрактальна розмірність; анізотропія металу; поверхні руйнування; механічні випробування.

Вступ. Постановка проблеми

Вважається, що поняття фрактальної розмірності у металознавстві набуло широкої популярності завдяки виходу у 1998 році роботи [1], у зв'язку з аналізом структури, зокрема поверхонь руйнування металевих конструкцій. При цьому слід відмітити, що проблема забезпечення надійності роботи посудин тиску, машин, механізмів, тощо після вичерпання ними проектного ресурсу кожного року стає актуальнішою.

Для мінімізації витрат на діагностування було запропоновано метод фрактального аналізу, який може бути застосований як при руйнівному, так і неруйнівному контролі. Особливість даного підходу полягає у простоті його використання: для дослідження необхідна фотографія структури мікро-, мезо-, або макро- рівня [2], та визначення фрактальної розмірності [3].

Таким чином, застосування фрактального методу разом із іншими методами контролю надає можливість виявити більш наочну картину діагностики, зокрема з точки зору розвитку дефектів.

Отже, метою роботи є встановлення взаємозв'язків між фрактальними розмірностями кривих руйнування і поверхонь руйнування залежно від напрямку прокату.

Матеріал дослідження

Для виявлення характерних ознак анізотропії [4], з фрагменту зруйнованої обичайки колони Ø 2200 мм і товщиною стінки 12 мм, із високоякісної вуглецевої сталі 20К [5], були вирізані зразки для іспитів на короткочасний розтяг та ударний вигин [6] у трьох напрямках: повздовжньому (НП), поперечному (ПП) та під кутом 45° .

Іспити на короткочасний розтяг при кімнатній температурі та випробування на ударний вигин

в діапазоні температур від -50°C до $+50^{\circ}\text{C}$ були проведені на маломірних зразках Шарпі [6] з подальшим аналізом профілів кривих і поверхонь руйнування за допомогою фрактального методу.

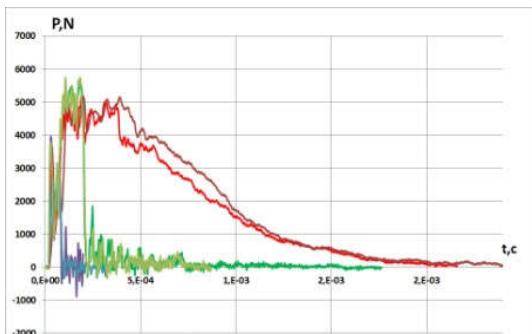
Як можна бачити, за результатами іспитів на короткочасний розтяг, значної схильності металу до анізотропії не виявлено, за винятком деякого відхилення відносного звуження поздовжніх зразків порівняно з іншими зразками, що ймовірно пов'язане з розвитком тріщини відносно напрямку прокату (табл. 1).

З іншого боку відомо, що найбільш чутливими показниками щодо структурного стану металу, у тому числі і до схильності прокату до анізотропії, є результати випробувань на ударний вигин [7]. Так, згідно до кривої крихко-в'язкого переходу при ударних навантаженнях, ознаками анізотропії можуть бути різні значення температури крихко-в'язкого переходу T_x (тобто зсув по температурній осі), а також загальна величина ударної в'язкості для зразків різного напрямку [8, 9]. Ці ознаки відбиваються також на характері і площі під тимчасовими кривими руйнування. Тобто вищому значенню сумарної енергії зародження і розповсюдження тріщини відповідає більша площа під кривою ударної в'язкості (рис. 1). Але найбільш точну оцінку можна отримати, враховуючи фрактальну розмірність профілю кривої, при співставленні з фрактальною розмірністю зламів (табл. 2).

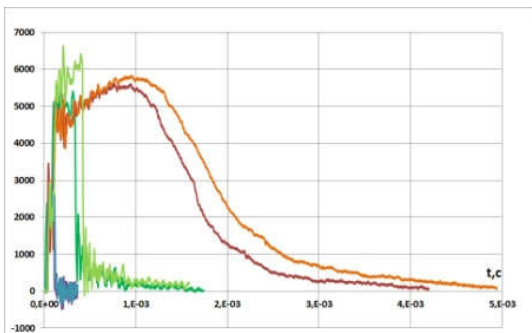
До визначення фрактальної розмірності профілю тимчасової кривої, що відповідає загальній роботі руйнування (D_k), в тому числі тієї частини кривої, яка відповідає енергії зародження тріщини (D_{kmax}), застосовано підхід, який набув розвитку у роботі [10]. Крім того, в табл. 2 наведено дані щодо фрактальних розмірностей зламів (D_{st}), а на рис. 2 – типові поверхні зламів ударних зразків.

Таблиця 1. Результати випробувань на короткочасний розтяг

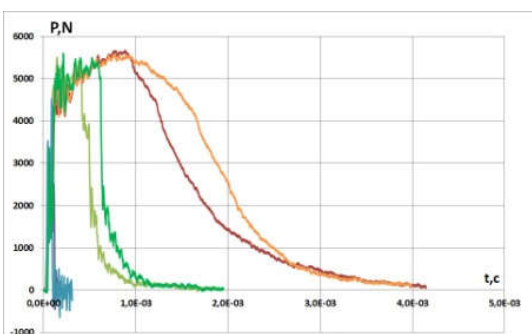
Напрямок розташування зразка відносно напрямку прокату	Механічні властивості			
	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	ψ , %
НП	412	268	32,0	62,5
⊥ ПП	415	264	31,7	67,1
Під 45°	419	263	31,6	68,7



а)



б)



в)

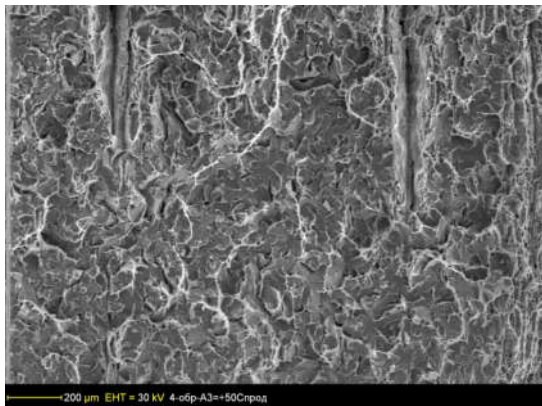
Рис. 1. Тимчасові криві руйнування зразків на ударний вигин при температурах від -50°C до $+50^{\circ}\text{C}$ в різних напрямках: а) повздовжній напрямок руйнування; б) поперечний напрямок руйнування; в) напрямок руйнування під кутом 45°

Таблиця 2. Взаємозв'язок фрактальних розмірностей кривих руйнування і відповідних поверхонь зламів в діапазоні температур $-50^{\circ}\text{C} \dots +50^{\circ}\text{C}$

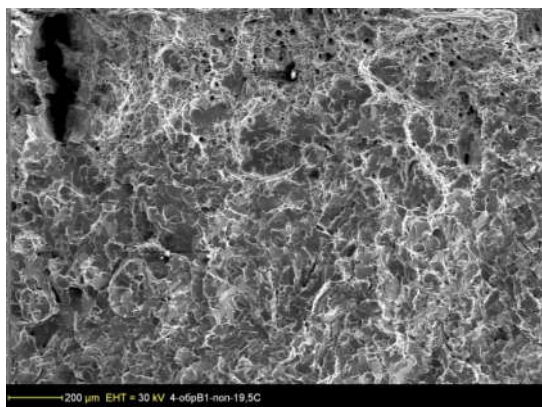
n	Температура $T, ^{\circ}\text{C}$	Фрактальна розмірність		
		D_{kmax}	D_{st}	D_k
Повздовжній напрямок руйнування				
S1	-50,0	1,216	1,960	1,149
S2	-50,0	1,251	1,962	1,153
S3	19,5	1,148	1,961	1,217
S4	22,0	1,363	1,959	1,209
S5	50,0	1,249	1,953	1,160
S6	50,0	1,349	1,956	1,157
Поперечний напрямок руйнування				
S7	-50,0	1,311	1,956	1,159
S8	-50,0	1,257	1,962	1,158
S9	19,5	1,312	1,958	1,196
S10	22,0	1,318	1,952	1,193
S11	50,0	1,309	1,959	1,171
S12	50,0	1,272	1,961	1,154
Напрямок руйнування під кутом 45°				
S13	-50,0	1,247	1,963	1,097
S14	-50,0	1,318	1,972	1,138
S15	19,5	1,319	1,936	1,133
S16	22,0	1,342	1,951	1,154
S17	50,0	1,269	1,959	1,125
S18	50,0	1,268	1,960	1,124

Аналіз даних табл. 2 показав, що взаємозв'язок між фрактальними розмірностями кривих руйнування на стадії зародження тріщини і відповідних поверхонь руйнування зразків мають схожий характер (рис. 3 – пунктирна лінія). Так, для зразків у всіх напрямках залежність може бути апроксимована лінійно, що свідчить про той факт, що напрямок прокату практично не відбивається на енергії зародження тріщини, отже на стадії зародження руйнування анізотропія практично не виявляється.

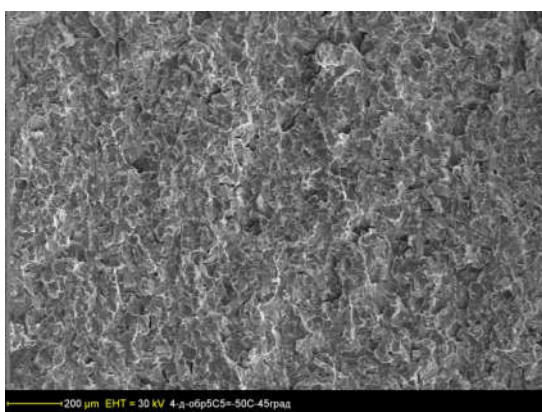
У той же час взаємозв'язок між фрактальними розмірностями кривих, які включають як стадію зародження, так і стадію розповсюдження руйнування, та відповідними розмірностями поверхонь руйнування зразків, мають різний характер (рис. 3 – двокрапка пунктирна лінія).



а)

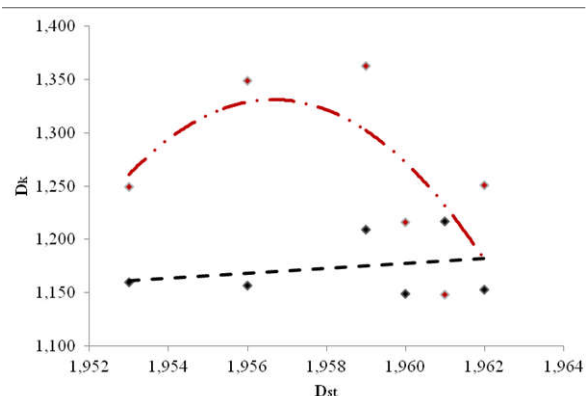


б)

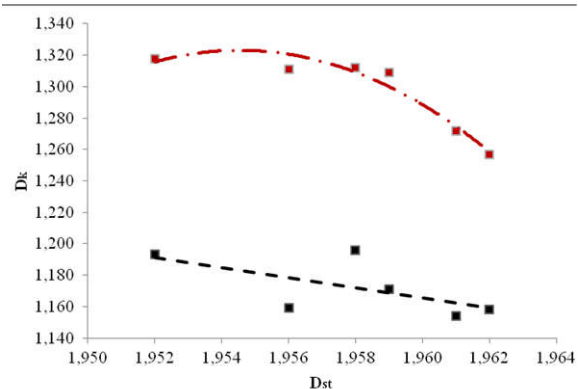


в)

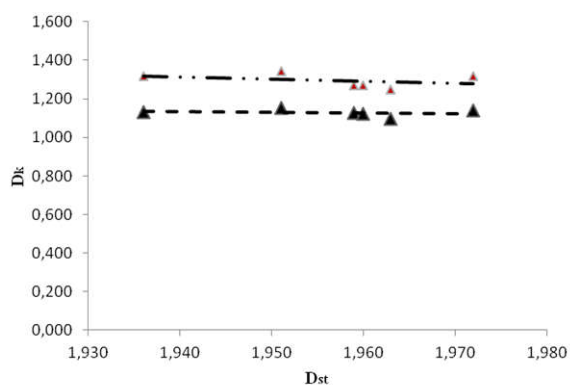
Рис. 2. Приклади фрагментів поверхонь зламів в надрізі зразків Шарпі після випробувань на ударний вигин при різних температурах: в повздовжньому напрямку при +50 °С (а); в поперечному напрямку при +19,5 °С (б); під кутом 45° при -50 °С (в)



а



б



в

Рис. 3. Взаємозв'язок фрактальних розмірностей ділянок кривих руйнування на стадії зародження тріщини і відповідних поверхонь зламів у зразках (двокрапка пунктирна лінія) та взаємозв'язок фрактальних розмірностей кривих загального руйнування і відповідних поверхонь зламів у зразках (пунктирна лінія): повздовжній напрямок (а); поперечний напрямок (б); під кутом 45°(в)

Так, лінійну залежність мають лише зразки, вирізані під 45° (рис. 3, в). Для повздовжнього напрямку (рис. 3, а), а також для зразків, вирізаних поперечно (рис. 3, б) залежність має поліноміальний вид другого порядку.

Тим не менше, той факт, що в різних напрямках існують різні типи залежностей, може свідчити про ознаки анізотропії. Отже, вплив анізотропії прокату відбивається лише на стадії розвитку руйнування, що має бути враховано при виборі матеріалу відповідного призначення.

Висновки

Таким чином, співставлення фрактальних розмірностей кривих руйнування з відповідними фрактальними розмірностями поверхонь зламів, показали, що вплив анізотропії прокату має місце лише на стадії розповсюдження тріщини, енергія зародження тріщини практично не залежить від напрямку прокату.

Перспективи подальшої роботи полягають у дослідженні різних марок металів із ферито-перлітною структурою методом фрактального аналізу, пошук кореляційних зв'язків фрактальної розмірності методом фрактального аналізу із фізико-механічними властивостями металічних об'єктів.

Література

- [1] В. С. Иванова, А. С. Баланкин, И. Ж. Бунин, А. А. Оксогоев, *Синергетика и фракталы в материаловедении*. Рос. акад. наук. Ин-т металлургии им. А. А. Байкова, Москва, РФ: Наука, 1994.
- [2] В. С. Иванова, А. А. Оксогоев, "О связи стадийности процессов пластической деформации с фрактальной структурой, отвечающей смене

масштабного уровня деформации", *Физическая мезомеханика*, Т. 9, № 6, с.17-27, 2016.

- [3] Р. М. Кроновер, "Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории. Учебное пособие", Москва, РФ: Постмаркет, 2000.
- [4] Ч. С. Барретт, *Структура металлов. Кристаллографические методы, принципы и данные*. 1-е изд.; перевод под ред. проф. докт. Я. С. Уманского, Москва, СССР: Гос. науч.-техн. изд. лит. по черной и цв. металлургии, 1948.
- [5] ДСТУ 8540:2015. Національний стандарт України. Прокат листовий гарячекатаний. Сортамент. Київ: ДП "УкрНДНЦ", 2016.
- [6] ДСТУ EN 10045-1:2006. Матеріали металеві. Випробування на ударний вигин за Шарпі. Частина 1. Метод випробування. Київ: Держспоживстандарт України, 2008.
- [7] А. П. Гуляев, *Металловедение: Учебник для вузов*, Москва, РФ: Металлургия, 1986.
- [8] Механические свойства конструкционных материалов при низких температурах: Сб. науч. трудов: Пер. с англ. под ред. Фридляндера И. И., Москва, РФ: Металлургия, 1983.
- [9] М. А. Смирнов, К. Ю. Окишев, Х. М. Ибрагимов, Ю. Д. Корягин, *Материаловедение: Учебное пособие*. Ч. I. Челябинск, РФ: Изд. ЮУрГУ, 2005.
- [10] О. А. Штофель, М. Д. Рабкина, "Использование мультифрактального анализа для оценки свойств конструкционных сталей", *Universum: Технические науки: электрон. научн. журн.* № 10(31), 2016.

УДК 620.1: 54.03

¹⁾О. О. Штофель, ²⁾М. Д. Рабкина

¹⁾Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина

²⁾Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев, Украина

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА К ИЗУЧЕНИЮ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА

В работе описывается применение метода фрактального анализа на примере структуры высококачественной конструкционной углеродистой стали марки 20К (содержание углерода 0.16-0.24%), которая использовалась для изготовления обечаек ректификационных колонн. Все эксперименты проводились при температуре от -50 °С до +50 °С. По марочнику стали свойства образца меняются незначительно, следовательно, и погрешность эксперимента сводится к минимальной.

Метод фрактального анализа в работах по оценке качества металлопродукции зарекомендовал себя, как новый качественный подход, который базируется именно на изменении структуры металла и является инвариантным при различных увеличениях фотографии структуры образца. Метод фрактального анализа может быть применен к любому типу и классу металла, но в предыдущих работах и этой, выбран металл преимущественно феррито-перлитной структуры. В основе выбора именно феррито-перлитных металлов лежит цель установления единого подхода методом фрактального анализа к изучению определенного типа металла.

В работе проанализированы результаты различных типов испытаний, представлены сравнительные характеристики их фрактальных размерностей. Проведены испытания образцов на кратковременное растяжение и ударный изгиб. Ударный изгиб дает наиболее чувствительные показатели структурного состояния металла, в то время, как испытания на кратковременный растяжение описывают энергетические изменения. Методом фрактального анализа исследованы временные кривые при ударной нагрузке и соответствующие поверхности изломов.

Основной причиной возникновения трещины является усредненное напряжение - определенный энергетический барьер, после которого и возникает трещина, а также накопленная энергия микронапряжений. В работе выдвинуто предположение, что основная роль проявления анизотропии определяется энергией распространения и почти не зависит от энергии зарождения трещины.

Таким образом, сопоставление фрактальных размерностей кривых разрушения с соответствующими фрактальными размерностями поверхностей изломов показали, что влияние анизотропии проката имеет место только на стадии распространения трещины, энергия зарождения трещины практически не зависит от направления проката.

Ключевые слова: фрактальная размерность; анизотропия металла; поверхности разрушения; механические испытания.

¹⁾**О. О. Shtopfel** **О. О.**, ²⁾**М. Д. Rabkina**

¹⁾*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine*

²⁾*The Paton Electric Welding Institute of the NASU, Kyiv, Ukraine*

APPLICATION OF THE FRACTAL ANALYSIS METHOD TO THE STUDY OF CHANGES IN THE METAL PROPERTIES

The paper describes the application of fractal analysis on the structure of high quality structural steel grade 20K example (carbon content 0.16-0.24 %), which was used for the manufacture of shells of distillation columns. All experiments were carried out at a temperature of -50 °C to +50 °C. By the mark of steel, the properties of the sample do not change significantly, and therefore the error of the experiment is minimized.

The method of fractal analysis in works on the assessment of the quality of metal products has proven itself as a new qualitative approach, which is based on the change of the structure of the metal and is invariant under different magnifications of the photograph of the structure of the sample. The method of fractal analysis can be applied to any type and class of metal, but in previous works, this metal is chosen with a predominantly ferrite-pearlite structure. The basis for the choice of ferrite-pearlite metals is the purpose of initiating a single approach to the study of a particular type of metal using a fractal approach.

The results of different types of tests are analyzed and comparative characteristics of their fractal dimensions are given. The specimens were tested for short-term tensile and shock bending. Shock bending gives the most sensitive indication of the structural state of the metal, while the short-tensile test describes the energy changes. Fractal analysis has investigated the time curves at impact and the corresponding fracture surfaces.

The basic conditions for initiating a crack are averaged stress - a certain energy barrier, after which the crack itself occurs, as well as the accumulated energy of the micro-voltages. In the paper it was suggested that the main role of the manifestation of anisotropy is determined by the propagation energy and is almost independent of the energy of crack origin.

Thus, the comparison of fractal dimensions of the fracture curves with the corresponding fractal dimensions of the fracture surfaces showed that the effect of rolled anisotropy takes place only at the crack propagation stage.

Keywords: fractal dimension; anisotropy of a metal; surface of destruction; mechanical tests.

*Надійшла до редакції
29 липня 2019 року*

*Рецензовано
02 вересня 2019 року*