

УДК 669.017:519.21

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.261218.10.559

МЕТОДИКА ПРОГНОЗУ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛІ Ст3пс

АКСАКОВ М. О., *магістр*

Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: lpezka@gmail.com

Анотація. Постановка проблеми. Прогноз механічних властивостей металів здійснюється, в основному, на основі аналізу статистичних даних та результатів прямих експериментів. Під час співставлення цих результатів у деяких випадках спостерігаються розбіжності між результатами прогнозу механічних властивостей на основі кількісних показників структури та даними натурних іспитів. Однією з причин, що викликають розбіжність результатів може бути неповнота формальної аксіоматики під час опису реальних елементів структури. Тому в статті запропоновано застосовувати для прогнозу механічних властивостей металу, на прикладі сталі Ст3пс, фрактальний підхід, що базується на визначенні фрактальних розмірностей складових структури. **Матеріали та методика.** За допомогою методик регресійного аналізу та теорії фракталів отримано математичну модель прогнозу критеріїв якості конструкційної низьколегованої сталі Ст3пс залежно від впливу параметрів структури та елементів хімічного складу. **Результати досліджень.** Проведено аналіз впливу хімічного складу та фрактальної розмірності феритно-перлітної структури на механічні властивості сталі: межу міцності, межу плинності, відносне звуження та видовження, твердість. Адекватність отриманих результатів підтверджується критеріями Кохрена і Фішера. Шляхом дослідження коефіцієнтів отриманих залежностей отримано гістограму, що описує вплив фрактальної розмірності металу на механічні властивості. В результаті експериментів встановлено, що фрактальна розмірність зерен перліту змінюється в інтервалі значень 1,662...1,790, а фрактальна розмірність зерен фериту – в інтервалі 1,955...1,978 при зміні кількості вуглецю від 0,14 до 0,22 %. Найбільший ступінь кореляції серед розглянутих встановлено між фрактальною розмірністю перліту та показниками міцності і твердості сталі 3, а найбільшу кореляцію показників пластичності – до фрактальної розмірності фериту. Отримані результати свідчать про можливість застосування фрактальної геометрії до прогнозу механічних властивостей маловуглецевих низьколегованих конструкційних сталей широкого призначення. **Висновки.** Наведено методику прогнозу механічних властивостей сталі Ст3пс на основі аналізу впливу хімічного складу та фрактальних характеристик феритно-перлітної структури. Встановлено, що для прогнозу характеристик міцності та твердості сталі на основі фрактальної розмірності перліту спостерігається кореляція в межах 0,50...0,59; а для прогнозу пластичних властивостей кореляція 0,64...0,86 зафіксована для фрактальної розмірності фериту.

Ключові слова: механічні властивості; сталь; перліт; ферит; фрактальна розмірність; методика прогнозу

МЕТОДИКА ПРОГНОЗА МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ Ст3пс

АКСАКОВ Н. А., *магістр*

Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днипро, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: lpezka@gmail.com

Аннотация. Постановка проблемы. Прогноз механических свойств металлов осуществляется, в основном, на основе анализа статистических данных и результатов прямых экспериментов. При сопоставлении этих результатов в некоторых случаях наблюдаются расхождения между результатами прогноза механических свойств на основе количественных показателей структуры и данными натурных испытаний. Одной из причин, приводящих к расхождению результатов, может являться неполнота формальной аксиоматики при описании реальных элементов структуры. Поэтому в работе предложено использовать для прогноза механических свойств металла, на примере стали Ст3пс, фрактальный подход, основанный на определении фрактальных размерностей составляющих структуры. **Материалы и методика.** С использованием методик регрессионного анализа и теории фракталов получена математическая модель прогноза критериев качества конструкционной низколегированной стали Ст3пс в зависимости от влияния параметров структуры и элементов химического состава. **Результаты исследований.** Проведен анализ влияния химического состава и фрактальной размерности ферритно-перлитной структуры на механические свойства стали: предел прочности, предел текучести, относительное сужение и удлинение, твердость. Адекватность полученных результатов подтверждается критериями Кохрена и Фишера. Путем исследования коэффициентов полученных зависимостей получена гистограмма, описывающая влияние фрактальной размерности металла на механические свойства. В результате экспериментов установлено, что фрактальная размерность зерен перлита меняется в интервале значений 1,662...1,790, а фрактальная размерность зерен феррита – в интервале 1,955...1,978 при изменении количества углерода от 0,14 до 0,22 %. Наибольшая степень корреляции среди рассмотренных установлена между фрактальной размерностью перлита и показателями прочности и твердости стали 3, а наибольшая корреляция показателей пластичности установлена к фрактальной размерности феррита. Полученные результаты свидетельствуют о возможности применения фрактальной геометрии к прогнозу механических свойств малоуглеродистых низколегированных конструкционных сталей широкого назначения. **Выводы.** Представлена методика прогноза механических свойств стали Ст3пс на основе анализа

влияния химического состава и фрактальных характеристик ферритно-перлитной структуры. Установлено, что при прогнозе характеристик прочности и твердости стали на основе фрактальной размерности перлита наблюдается корреляция в пределах 0,50...0,59; а при прогнозе пластических свойств корреляция 0,64...0,86 зафиксирована для фрактальной размерности феррита.

Ключевые слова: механические свойства; сталь; перлит; феррит; фрактальная размерность; методика прогноза

METHOD OF FORECAST OF MECHANICAL PROPERTIES OF Ст3пс STEEL

AKSAKOV M.O., *Master of Engineering*

Department of Materials Science and Material Processing, State Higher Educational Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-A, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: lpezka@gmail.com

Abstract. Problem statement. The prediction of mechanical properties of metals is mainly based on the analysis of statistical data and the results of direct experiments. When comparing these results, in some cases there are discrepancies between the results of the prediction of mechanical properties based on the quantitative indicators of the structure and the data of field tests. One of the reasons for the divergence of results may be the incompleteness of formal axiomatics in describing the real elements of a structure. Therefore, the paper proposes to use the fractal approach based on the determination of fractal dimensions of the constituents of the structure for the prediction of the mechanical properties of the metal, such as Ст3пс steel. **Materials and methodology.** Using the methods of regression analysis and fractal theory, we obtained a mathematical model for the prediction of the quality criteria for structural low-alloy steel Ст3пс depending on the influence of the parameters of the structure and elements of the chemical composition. **Research results.** The influence of the chemical composition and fractal dimension of the ferrite-pearlite structure on the mechanical properties of the steel was analyzed: tensile strength, yield strength, relative narrowing and elongation, hardness. The adequacy of the obtained results is confirmed by the Kochren and Fisher criteria. By studying the coefficients of the obtained dependences, a histogram describing the effect of the fractal dimension of the metal on the mechanical properties was obtained. As a result of experiments, it was found that the fractal dimension of perlite grains varies in the range of 1,662...1,790, and the fractal dimension of ferrite grains ζ_{ep} in the range of 1,955...1,978 with a change in the amount of carbon from 0,14 to 0,22 %. The highest degree of correlation among those considered is established between the fractal dimension of perlite and the indices of strength and hardness of steel 3, and the highest correlation of plasticity indices is set to the fractal dimension of ferrite. The results obtained indicate the possibility of applying fractal geometry to the prediction of the mechanical properties of low carbon low alloy structural steels. **Conclusions.** The technique of forecasting the mechanical properties of Ст3пс steel is presented based on the analysis of the influence of the chemical composition and fractal characteristics of the ferrite-perlite structure. It was found that when forecasting the strength and hardness characteristics of steel based on the fractal dimension of perlite, a correlation was observed within 0,50...0,59; and in the prediction of plastic properties, the correlation of 0,64...0,86 is fixed for the fractal dimension of ferrite.

Keywords: mechanical properties; steel; perlite; ferrite; fractal dimension; forecasting technique

Постановка проблеми

Механічні властивості металів, включаючи низьковуглецеві сталі широкого призначення, складають одну з ключових характеристик показників їх якості [1]. За необхідності їх здебільшого змінюють у процесі виробництва шляхом коригування хімічного складу в нормативних межах або шляхом застосування до них різних режимів обробки залежно від вимог замовника [2]. Важливу стадію контролю механічних властивостей металів становить їх контроль на стадії виробництва або зразу ж після закінчення технологічних процесів [3]. При цьому ключові характеристики для прогнозу механічних властивостей різних матеріалів це – хімічний склад та структура.

Співставлення результатів їх кількісного аналізу дозволяє з відносною вірогідністю здійснювати прогноз властивостей [4–7]. Однак на цьому етапі досліджень можуть виникати певні труднощі, пов'язані з похибками оцінок прогнозу та результатами натурних іспитів. Похибки можуть бути змовлені межею чутливості традиційних

кількісних методик оцінювання структури, що при цьому застосовуються.

Для часткової компенсації неповноти формальної аксіоматики [8], що виникає під час оцінювання механічних властивостей, на основі аналізу елементів структури застосовують фрактальний підхід, що базується на проміжній асимптотиці [9–12]. Фрактальне моделювання успішно застосовують для обробки зображень структури матеріалів [13], прогнозу механічних властивостей сталей [14–16] та чавунів [17–19] на основі аналізу фрактальних розмірностей елементів їх структури, оцінки балової шкали [20], ранжування критеріїв якості металів [21; 22], ідентифікації складних систем [23; 24].

Запропоновано дослідити арматуру сталі Ст3пс (клас Ат400С) у стані заводської поставки на предмет установлення взаємозв'язку між її механічними властивостями та фрактальними розмірностями елементів структури.

Матеріали та методика

Для дослідження обиралися зразки арматури зі сталі Ст3пс (арматура), хімічний склад яких змінювався в ГОСТ 380–2005 (див. табл. 1).

Таблиця 1

Вміст елементів хімічного складу Ст3пс / Content of chemical elements of Ст3пс

Хімічні елементи	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As
Вміст, %	0,14...0,22	0,05...0,15	0,40...0,65	до 0,30	до 0,05	до 0,04	до 0,30	до 0,30	до 0,08

Мікроструктура сталі Ст3пс наведена на рисунку 1. Згідно із вмістом вуглецю в сталі процентний вміст перліту коливався в межах 18...27%, фериту до 80% та одиничних бейнітних зерен до 2%.

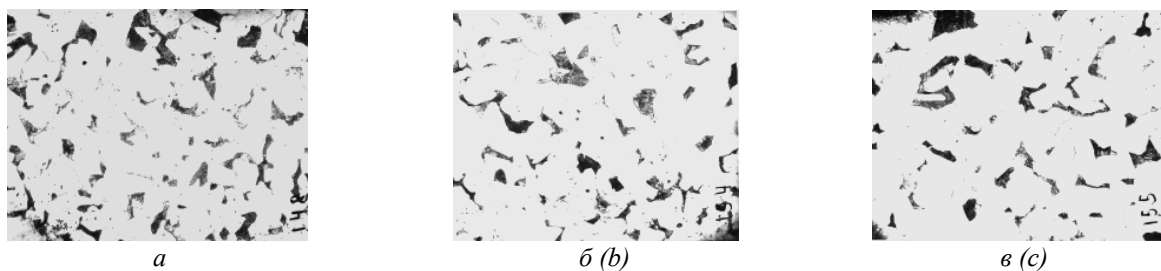


Рис. 1. Структура сталі Ст3пс (×500) на відстані R від центру: а R = 0 мм; б – R = 6 мм; в – R = 12,5 мм / Fig. 1. Ст3пс steel structure (×500) at a distance R from the center (×500): а – R = 0 mm; б – R = 6 mm; в – R = 12,5 mm

Механічні властивості сталі: межа міцності (σ_B), межа плинності (σ_T), відносне видовження (δ) та

звуження (ψ), твердість (HRB) визначалися традиційними методами та наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Механічні властивості та фрактальні розмірності структури / Mechanical properties and fractal dimensions of the structure

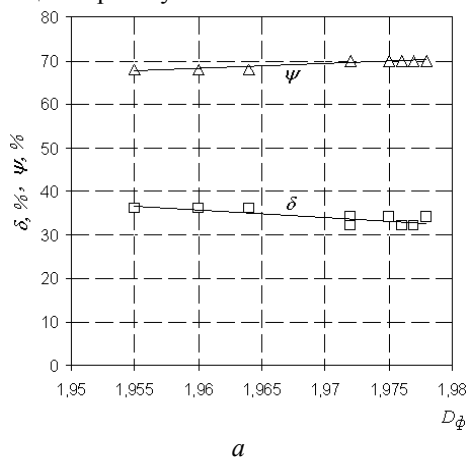
Відстань від центра зразка, мм <i>R</i>	Фрактальні розмірності			Механічні властивості				
	D_ϕ	D_Π	D_{ep}	HRB	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	ψ , %
0	1,955	1,711	1,090	65	445	270	36	68
	1,960	1,698	1,119	64	445	270	36	68
	1,964	1,662	1,063	64	445	270	36	68
6	1,972	1,712	1,132	68	450	285	34	70
	1,975	1,720	1,131	68	450	285	34	70
	1,978	1,747	1,149	67	450	285	34	70
12,5	1,976	1,742	1,165	67	455	300	32	70
	1,972	1,790	1,173	68	455	300	32	70
	1,977	1,727	1,158	66	455	300	32	70

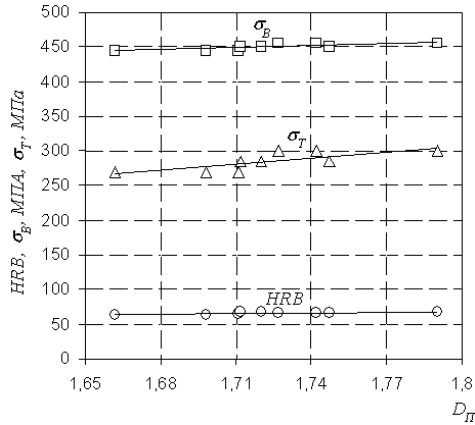
Для визначення фрактальної розмірності зерен фериту та перліту застосовувався спосіб [25], в основі якого лежить визначення збіжності числових значень розмірностей, вирахованих за допомогою точового та клітинного методів. У роботі розраховувалися фрактальні розмірності перліту (D_Π), фериту (D_ϕ), границь зерен (D_{ep}) (див. табл. 2).

Результати досліджень

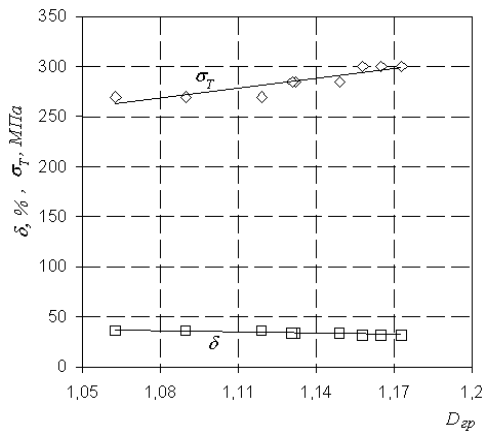
Із застосуванням методики регресійного аналізу отримано залежності механічних властивостей сталі Ст3пс від фрактальних розмірностей елементів структури (рис. 2). Отримані залежності дозволяють прогнозувати механічні властивості досліджуваної марки сталі (1–5), що повинно зумовити скорочення кількості натурних іспитів та дасть позитивний

економічний ефект у промислових масштабах виробництва прокату зі сталі Ст3пс.





б (b)



в (c)

Рис. 2. Співвідношення між механічними властивостями та фрактальними розмірностями структури / Fig. 2. Relationship between mechanical properties and fractal dimensions of the structure

Рівняння (1–7), що описують отримані на рисунку 2 залежності, підтверджують існування взаємозв'язку між фрактальними розмірностями структури та механічними властивостями:

$$\begin{aligned} \psi &= 112,98D_{\phi} - 153,22 & R^2 &= 0,86, & (1) \\ \delta &= -169,46D_{\phi} + 367,82 & R^2 &= 0,64, & (2) \\ \sigma_B &= 93,425D_{II} + 289,01 & R^2 &= 0,59, & (3) \\ \sigma_T &= 280,27D_{II} - 197,98 & R^2 &= 0,59, & (4) \\ HRB &= 33,03D_{II} + 9,4153 & R^2 &= 0,50, & (5) \\ \sigma_T &= 322,37D_{III} - 79,633 & R^2 &= 0,80, & (6) \\ \delta &= -42,982D_{III} + 82,618 & R^2 &= 0,79. & (7) \end{aligned}$$

На основі аналізу коефіцієнтів парної кореляції R^2 побудовано гістограму, що відображає вагу впливу фрактальних розмірностей структурних елементів на розглянуті властивості (рис. 3). Слід зазначити, що взаємозв'язок спостерігається між

пластичними властивостями (δ , ψ) та фрактальними розмірностями фериту, а також між показниками міцності, твердості сталі (σ_B , σ_T , HRB) і фрактальними розмірностями перліту. З фізичної точки зору це можна пояснити тим, що перліт має дещо вищі показники міцності завдяки більш високому середньому вмісту вуглецю 0,8 % порівнянно з феритом (~ 0,03 %). Зв'язок фрактальної розмірності границь зерен спостерігається до показників як міцності, так і пластичності, оскільки збільшення їх довжини на одиницю площі шліфа пов'язане зі зменшенням розміру зерен, що позитивно позначається на механічних властивостях металів.

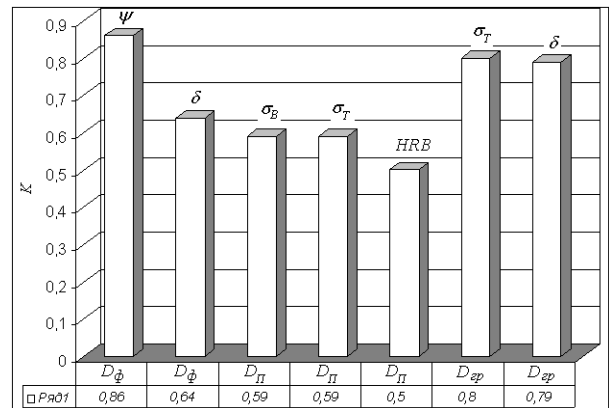


Рис. 3. Гістограма впливу розмірностей феритно-перлітної структури на механічні властивості / Fig 3. Histogram of the influence of the dimensions of the ferrite-pearlite structure on the mechanical properties

Отримані моделі адекватні згідно із статистичними критеріям Фішера ($F_{спос} = 1,862$; $F_{крит} = 2,400$) та Кохрена ($F_{спос} = 0,456$; $F_{крит} = 0,547$).

Висновки

Наведено результати дослідження структури сталі Ст3пс із застосуванням фрактального підходу. Отримано залежності механічних властивостей від фрактальної розмірності елементів структури, що сприяє скороченню матеріально-часових витрат на проведення натурних іспитів.

На основі аналізу впливу фрактальних розмірностей сталі на механічні властивості побудовано гістограму, що дозволяє за необхідності прогнозувати властивості шляхом оцінювання розмірностей елементів структури в межах ГОСТ 380–2005.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Berns H. Ferrous materials: Steel and Cast Iron : monograph / [H. Berns, W. Theisen]. – Berlin Heidelberg : Springer, 2008. – 418 p.

2. Волчук В. Н. Исследования влияния химического состава чугуновых прокатных валков на их механические свойства / В. Н. Волчук // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2014. – № 5. – С. 12–18. – Режим доступа : <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/40698>
3. Большаков В. И. О прогнозировании качества целевого продукта в периодических технологиях / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Доповіді НАН України. – 2014. – № 11. – С. 77–81. – Режим доступа : <https://doi.org/10.15407/dopovidi2014.11.0771>
4. Иванцов С. В. Влияние размера аустенитного зерна на кинетику разрушения высокопрочных строительных сталей / С. В. Иванцов, В. И. Большаков, Д. В. Лаухин, А. В. Бекетов, А. В. Мурашкин // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2014. – № 1. – С. 70–72.
5. Mishutin A. Modified expanded clay lightweight concretes for thin-walled reinforced concrete floating structures / A. Mishutin, S. Kroviakov, O. Pishev, B. Soldo // Technical Journal. – 2017. – Vol. 11. – № 3. – Pp. 121–124. – Режим доступа : <https://hrcak.srce.hr/186657>
6. Kroviakov S. Production technology of modified expanded clay lightweight concrete for floating structures / S. Kroviakov, A. Mishutin // The Scientific Journal of Cihan University – Sulaimania. – 2017. – Vol. 1. – № 4. – Pp. 2–10.
7. Mishutin A. V. Modified expanded clay lightweight concretes for thin-walled floating structures / A. V. Mishutin, S. O. Kroviakov, N. V. Mishutin, V. L. Bogutsky // Proceeding of the Second International Conference on Concrete Sustainability (ICCS16), held in Madrid, Spain on 13-15 June 2016 – Barcelona, Spain: International Center for Numerical Method in Engineering, 2016. – Pp. 743–749.
8. Большаков Вад. І. Часткова компенсація неповноти формальної аксіоматики при ідентифікації структури металу / Вад. І. Большаков В. І. Большаков, В. М. Волчук, Ю. І. Дубров // Вісник НАН України. – 2014. – № 12. – С. 45–48. – Режим доступа : <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/73434>
9. Mandelbrot B. B. The Fractal Geometry of Nature : monograph / B. B. Mandelbrot. – New-York, San Francisco : Freeman, 1982, 480 p. – Режим доступа : <http://www.amazon.com/Fractal-Geometry-Nature-Benoit-Mandelbrot/dp/0716711869>
10. Большаков В. И. Особенности применения мультифрактального формализма в материаловедении / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Доповіді НАН України. – 2008. – № 11. – С. 99–107. – Режим доступа : <http://www.dopovidi.nas.gov.ua/2008-11/08-11-17.pdf>
11. Основы организации фрактального моделирования : монография / [В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров]. – Киев : Академперіодика НАН України, 2017. – 170 с.
12. Fractals and properties of materials : monograph / [V. Bol'shakov, V. Volchuk, Yu. Dubrov]. – Saarbrücken : Lambert Academic Publishing, 2016. – 140 p.
13. Волчук В. Н. Применение вейвлет-анализа для оценки зеренной структуры металлов / В. Н. Волчук // Металознавство та термічна обробка металів. – 2009. – № 4. – С. 24–32. – Режим доступа : <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/23-30>
14. Волчук В. Н. К вопросу о применении теории мультифракталов для оценки механических свойств металла / В. Н. Волчук // Металознавство та термічна обробка металів. – 2014. – № 3. – С. 12–19. – Режим доступа : <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/12-19>
15. Большаков В. И. Организация фрактального моделирования / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Доповіді НАН України. – 2018. – № 6. – С. 67–72. – Режим доступа : <https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.06.067>
16. Большаков В. И. Разработка и исследование метода определения механических свойств металла на основе анализа фрактальной размерности его микроструктуры / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Металознавство та термічна обробка металів. – 2004. – № 1. – С. 43–54.
17. Volchuk V. Method of material quality estimation with usage of multifractal formalism / V. Volchuk, I. Klymenko, S. Kroviakov, M. Orešković // Tehnički glasnik - Technical Journal. – 2018. – Vol. 12. – № 2. – P. 93–97. – Режим доступа : <https://doi.org/10.31803/tg-20180302115027>
18. Большаков В. И. К вопросу о постановке задачи идентификации фрактальной структуры металла / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2016. – № 5. – С. 35–39. – Режим доступа : <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/68905/63995>
19. Волчук В. Н. Определение чувствительности мультифрактальных характеристик металла / В. Н. Волчук // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2015. – № 12. – С. 10–14. – Режим доступа : <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/58941>
20. Волчук В. Н. Фрактальный анализ балловой системы / В. Н. Волчук // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2018. – № 5. – С. 47–53. – Режим доступа : <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/58941>
21. Волчук В. Н. К применению фрактального формализма при ранжировании критериев качества многопараметрических технологий / В. Н. Волчук // Металлофизика и новейшие технологии. – 2017. – Т. 39. – № 3. – С. 949–957. – Режим доступа : <http://mfint.imp.kiev.ua/ru/abstract/v39/i07/0949.html>
22. Большаков В. И. Разработка и исследование метода определения механических свойств металла на основе анализа фрактальной размерности его микроструктуры / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Металознавство та термічна обробка металів. – 2018. – № 2. – С. 10–16. – Режим доступа : <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/9-16>
23. Bolshakov V. I. Regularization of One Conditionally Ill-Posed Problem of Extractive Metallurgy / V. I. Bolshakov, V. M. Volchuk, Yu. I. Dubrov // Metallofizika i Noveishie Tekhnologii. – 2018. – Vol. 40. – № 9. – Pp. 1165–1171. – Режим доступа : <https://DOI: 10.15407/mfint.40.09.1165>
24. Большаков В. И. Фрактальный подход при идентификации сложных систем / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Доповіді НАН України. – 2017. – № 6. – С. 46–50. – Режим доступа : <https://doi.org/10.15407/dopovidi2017.06.00>
25. Большаков В. И., Дубров Ю. И., Криулін Ф. В., Волчук В. М. Патент на винахід № 51439А. Спосіб визначення фрактальної розмірності зображення. – Бюл. № 11. – 15.11.2002.

REFERENCES

1. Berns H. and Theisen W. Ferrous materials. Steel and Cast Iron. Berlin Heidelberg: Springer, 2008, 418 p.
2. Volchuk V.M. *Issledovaniya vliyaniya khimicheskogo sostava chugunnykh prokatnykh valkov na ikh mekhanicheskiye svoystva* [Studies of the influence of the chemical composition of cast iron rolls on their mechanical properties]. *Visnyk Prydniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk'a State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2014, no. 5, pp. 12–18. (in Russian).
3. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *O prognozirovani kachestva tselevogo produkta v periodicheskikh tekhnologiyakh* [Predicting the quality of a desired product in periodic technologies]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2014, no. 11, pp. 77–81. (in Russian).
4. Ivantsov S.V., Bolshakov V.I., Laukhin D.V., Beketov A.V., Murashkin A.V. *Vliyaniye razmera austenitnogo zerna na kinetiku razrusheniya vysokoprochnykh stroitel'nykh staley* [Influence of the size of austenitic grain on the kinetics of fracture of high-strength structural steels]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and Mining]. 2014, no. 1, pp. 70–72. (in Russian).
5. Mishutin A., Kroviakov S., Pishev O. and Soldo B. Modified expanded clay lightweight concretes for thin-walled reinforced concrete floating structures. *Technical Journal*, 2017, vol. 11, no. 3, pp. 121–124.
6. Kroviakov S. and Mishutin A. Production technology of modified expanded clay lightweight concrete for floating structures. *The Scientific Journal of Cihan University – Sulaimaniya*. 2017, vol. 1, no. 4, pp. 2–10.
7. Mishutin A.V., Kroviakov S.O., Mishutin N.V., Bogutsky V.L. Modified expanded clay lightweight concretes for thin-walled floating structures / Proceeding of the Second International Conference on Concrete Sustainability (ICCS16), held in Madrid, Spain on 13-15 June 2016 – Barcelona, Spain: International Center for Numerical Method in Engineering, 2016. – P. 743-749.
8. Bol'shakov Vad.I., Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Chastkova kompensatsiya nepovnoti formalnoy aksiomatiki pri identifikatsiyi struktury metaly* [The partial compensation of incompleteness of formal axiomatics in the identification of the metal structure]. *Visnyk akademiyi nauk Ukrainy* [Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2014, no. 12, pp. 45–48. (in Ukrainian).
9. Mandelbrot B.B. *The Fractal Geometry of Nature*. New-York, San Francisco : Freeman, 1982, 480 p.
10. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Osobennosti primeneniya mul'tifraktal'nogo formalizma v materialovedenii* [Features of the multifractal formalism in materials]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2008, no. 11, pp. 99–107. (in Russian).
11. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Fundamentals of fractal modeling*. Kyiv, Ukraine : PH "Akademperiodyka" National Academy of Sciences of Ukraine, 2017, 170 p. (in Russian).
12. Bol'shakov V., Volchuk V. and Dubrov Yu. *Fractals and properties of materials*. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2016, 140 p.
13. Volchuk V.M. *Primeneniye veyvlet-analiza dlya otsenki zerennoy struktury metallov* [The use of wavelet analysis to assess the grain structure of metals]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2009, no. 4, pp. 24–32. (in Russian).
14. Volchuk V.M. *K voprosu o primeneni teorii mul'tifraktalov dlya otsenki mekhanicheskikh svoystv metalla* [On the application of the theory of multifractals for the evaluation of the mechanical properties of a metal]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2014, no. 3, pp. 12–19. (in Russian).
15. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Organizatsiya fraktal'nogo modelirovaniya* [Organization of fractal modeling]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2018, no. 6, pp. 67–72. (in Russian).
16. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Razrabotka i issledovaniye metoda opredeleniya mekhanicheskikh svoystv metalla na osnove analiza fraktal'noy razmernosti yego mikrostruktury* [Development and study of the method for determining the mechanical properties of a metal based on an analysis of the fractal dimension of its microstructure]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2004, no. 1, pp. 43–54. (in Russian).
17. Volchuk V., Klymenko I., Kroviakov S., Orešković M. Method of material quality estimation with usage of multifractal formalism. *Tehnički glasnik - Technical Journal*. 2018, vol. 12, no. 2, pp. 93–97.
18. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *K voprosu o postanovke zadachi identifikatsii fraktal'noy struktury metalla* [Statement on the issue of the problem identification of fractal metal structures]. *Visnyk Prydniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk'a State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2016, no. 5, pp. 35–39. (in Russian).
19. Volchuk V.M. *Opredeleniye chuvstvitel'nosti mul'tifraktal'nykh kharakteristik metalla* [Determining the sensitivity of the multifractal characteristics of metals]. *Visnyk Prydniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk'a State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2015, no. 12, pp. 10–14. (in Russian).
20. Volchuk V.M. *Fraktal'nyy analiz ballovoiy sistemy* [Fractal analysis of the point system]. *Visnyk Prydniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk'a State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2018, no. 5, pp. 47–53. (in Russian).
21. Volchuk V.M. *K primeneniyu fraktal'nogo formalizma pri ranzhirovani kriteriyev kachestva mnogoparametricheskikh tekhnologiy* [On the Application of Fractal Formalism for Ranging Criteria of Quality of Multiparametric Technologies]. *Metallofizika i noveyshiye tekhnologii* [Metal Physics and Advanced Technologies]. 2017, vol. 39, no 3, pp. 949–957. (in Russian).
22. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Ranzhirovaniye pokazateley kachestva metalla* [The ranking of the quality criteria of the metal]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2018, no. 2, pp. 10–16. (in Russian).
23. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. Regularization of One Conditionally Ill-Posed Problem of Extractive Metallurgy. *Metallofizika i Noveyshiye Tekhnologii*, 2018, vol. 40, no. 9, pp. 1165–1171.
24. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Fraktal'nyy podkhod pri identifikatsii slozhnykh sistem* [Fractal approach to the identification of complex systems]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2017, no. 6, pp. 46–50. (in Russian).

25. Bolshakov V.I., Dubrov Yu.I., Kryulin F.V. and Volchuk V.M. *Sposib vyznachennya fraktal'noyi rozmirnosti zobrazhennya* [Method for determining fractal dimensionality of an image]. Patent product no. 51439A, UA. MPK 7 G06K9/00, bulletin no. 11, 2002. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 15.10.18

УДК 532.526:532.24

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.261218.16.560

ОБЛЕДЕНЕНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ: МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМ КРУПНЫХ ЛЕДЯНЫХ НАРОСТОВ

АЛЕКСЕЕНКО С. В.^{1*}, к. т. н.,
ЮШКЕВИЧ О. П.², к. т. н.

^{1*} Кафедра механотроники, Дніпровський національний університет імені Олеса Гончара, пр. Гагарина, 72, 49000, Дніпро, Україна, тел. +38(050) 480-85-03, e-mail: alexeyenko_sv@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-0320-989X

² Кафедра механотроники, Дніпровський національний університет імені Олеса Гончара, пр. Гагарина, 72, 49000, Дніпро, Україна, тел. +38(066) 775-37-58, e-mail: ReilTO@i.ua, ORCID ID:0000-0002-7199-8424

Аннотация. Постановка проблемы. Численное моделирование процессов обледенения летательных аппаратов во время полета в неблагоприятных метеорологических условиях является актуальной проблемой при обеспечении безопасности полетов. Данные о воспроизведенных формах крупных ледяных наростов, которые, в свою очередь, зависят от условий полета, могут быть использованы для оценки степени негативного влияния обледенения на летательный аппарат. **Методика исследования.** Для численного моделирования процессов обледенения аэродинамических поверхностей летательных аппаратов разработано программно-методическое обеспечение. При описании внешнего воздушно-капельного потока и выпадения влаги на обтекаемую поверхность использована модель взаимопроникающих сред, при описании процесса нарастания льда – метод поверхностных контрольных объемов, базирующийся на уравнениях неразрывности и сохранения энергии. **Результаты расчетов.** Расчетным путем воспроизведены основные формы крупных ледяных наростов при двухмерном обтекании профиля *NACA 0012* двухфазным вязким сжимаемым потоком с учетом шероховатости поверхности и взаимодействия воздушного потока и переохлажденных капель. **Выводы.** Проанализированы физические особенности процесса обледенения, приводящие к образованию рогообразных форм ледяных наростов. Получены характерные формы ледяных наростов в сухом, влажном и смешанном режимах обледенения. Наблюдается хорошее согласование с известными экспериментальными данными. Проведены исследования влияния летных и метеорологических параметров на форму ледяных наростов. Проиллюстрирована возможность использования разработанного инструмента исследования для определения наиболее «опасного», с точки зрения степени влияния обледенения на летательный аппарат, диапазона параметров.

Ключевые слова: численное моделирование; воздушно-капельный поток; выпадение влаги на обтекаемую поверхность; нарастание льда; формы ледяных наростов; обледенение аэродинамических поверхностей

ЗЛЕДЕНІННЯ АЕРОДИНАМІЧНИХ ПОВЕРХОНЬ: МОДЕЛЮВАННЯ ФОРМ ВЕЛИКИХ КРИЖАНИХ НАРОСТІВ

АЛЕКСЕЄНКО С. В.^{1*}, к. т. н.,
ЮШКЕВИЧ О. П.², к. т. н.

^{1*} Кафедра механотроніки, Дніпровський національний університет імені Олеса Гончара, пр. Гагарина, 72, 49000, Дніпро, Україна, тел. +38(050) 480-85-03, e-mail: alexeyenko_sv@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-0320-989X

² Кафедра механотроніки, Дніпровський національний університет імені Олеса Гончара, пр. Гагарина, 72, 49000, Дніпро, Україна, тел. +38(066) 775-37-58, e-mail: ReilTO@i.ua, ORCID ID:0000-0002-7199-8424

Анотация. Постановка проблемы. Числове моделювання процесів обмерзання літальних апаратів під час польоту в несприятливих метеорологічних умовах становить актуальну проблему у забезпеченні безпеки польотів. Дані про відтворені форми великих крижаних наростів, які, у свою чергу, залежать від умов польоту, можуть бути використані для оцінювання ступеня негативного впливу зледеніння на літальний апарат. **Методика дослідження.** Для числового моделювання процесів зледеніння аеродинамічних поверхонь літальних апаратів розроблено програмно-методичне забезпечення. Для опису зовнішнього повітряно-крапельного потоку і випадіння вологи на обтічну поверхню застосовано модель взаємопроникних середовищ, для опису процесу наростання льоду – метод поверхневих контрольних об'ємів, що базується на рівняннях нерозривності і збереження енергії. **Результати розрахунків.** Розрахунковим шляхом відтворено основні