

УДК 519.21

ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЕЙВЛЕТНО-МУЛЬТИФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА ДЛЯ ПРОГНОЗА ЕГО КАЧЕСТВА

ВОЛЧУК В. Н., д. т. н., доц.

Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: volchuku@yandex.ua, ORCID ID: 0000-0001-8717-6786

Аннотация. Постановка проблемы. На сегодняшний день реализовать детерминированный метод оценки механических свойств, основанный на анализе причинно-следственных связей, не представляется возможным, поскольку на них оказывает значительное влияние большое число переменных, сильно взаимосвязанных между собой, часть из которых изменяется в широком диапазоне непредсказуемым образом.

Особенно остро эта задача стоит при оценке механических характеристик металлических конструкций и изделий ответственного назначения в процессе их эксплуатации: труб нефтепроводов, каркасов жилых зданий и т. д. В этих случаях проведение механических испытаний представляется задачей не всегда технически осуществимой, а из множества экспресс-методов неразрушающего контроля на практике чаще всего применяют вербальный или полуколичественный (балловая оценка). Сложность заключается в том, что под воздействием различных факторов: температуры, агрессивных сред и т. д., структурные превращения протекают вдали от термодинамического равновесия, вследствие чего часто получают смешанные типы структуры, в том числе и видманштеттовые. Использование классических методов металлографии не всегда позволяет проводить количественную оценку подобных структур с той точностью, которая может понадобиться в практических целях. В этой связи значительный интерес представляет поиск новых подходов для оценки структуры металла с целью прогноза его механических свойств. **Цель работы.** Получить информацию о возможности применения методов вейвлетно-мультифрактального анализа для оценки механических свойств металла. **Вывод.** Установлена чувствительность между прочностными свойствами и однородностью, регулярностью элементов структуры перлитно-бейнитной группы, а также между вязкими свойствами и однородностью, регулярностью элементов ферритной группы. Полученные результаты свидетельствуют о том, что реализация разработанного метода позволяет при минимально возможных затратах на натурные испытания обеспечивать необходимую в практических целях точность.

Ключевые слова: вейвлетно-мультифрактальный анализ, размерность, механические свойства, прогноз

ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ВЕЙВЛЕТНО-МУЛЬТИФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ СТРУКТУРИ МЕТАЛУ ДЛЯ ПРОГНОЗУ ЙОГО ЯКОСТІ

ВОЛЧУК В. М., д. т. н., доц.

Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: volchuku@yandex.ua, ORCID ID: 0000-0001-8717-6786

Анотація. Постановка проблеми. На сьогоднішній день реалізувати детермінований метод оцінки механічних властивостей, заснований на аналізі причинно-наслідкових зв'язків, не уявляється можливим, оскільки на них значно впливає велике число змінних, сильно взаємозалежних між собою, частина з яких змінюється в широкому діапазоні непередбаченим чином.

Особливо гостро це завдання стоїть у випадку оцінювання механічних характеристик металевих конструкцій і виробів відповідального призначення в процесі їх експлуатації: труб нафтопроводів, каркасів житлових будинків тощо. У цих випадках проведення механічних випробувань стає завданням не завжди технічно здійсненним, а з безлічі експрес-методів неруйнівного контролю на практиці найчастіше застосовують вербальний або напівкількісний (балова оцінка). Складність полягає в тому, що за впливу різних факторів: температури, агресивних середовищ і т. д., структурні перетворення відбуваються віддалі від термодинамічної рівноваги, внаслідок чого часто отримують змішані типи структури, у тому числі і відманштеттові. Застосування класичних методів металлографії не завжди дозволяє проводити кількісну оцінку подібних структур із тією точністю, що може знадобитися на практиці. У цьому зв'язку значний інтерес становить пошук нових підходів до оцінювання структури металу з метою прогнозу його механічних властивостей. **Мета роботи.** Отримати інформацію про можливість застосування методів вейвлетно-мультифрактального аналізу

для оцінки механічних властивостей металу. **Висновок.** Установлено чутливість між показниками міцності та однорідністю, регулярністю елементів структури перлітно-бейнітної групи, а також між в'язкими властивостями й однорідністю, регулярністю елементів феритної групи. Отримані результати свідчать про те, що реалізація розробленого методу дозволяє при мінімально можливих витратах на натурні випробування забезпечувати необхідну на практиці цілях точність.

Ключові слова: *вейвлетно-мультифрактальний аналіз, розмірність, механічні властивості, прогноз*

APPLICATION OF RESULTS OF WAVELET AND MULTIFRACTAL ANALYSIS OF METAL STRUCTURE FOR PROGNOSIS OF ITS QUALITY

VOLCHUK V. M., *Dr. Sc. (Tech.)*

Department of Materials Science, State Higher Education Establishment «Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-39-56, e-mail: volchuky@yandex.ua, ORCID ID: 0000-0001-8717-6786

Summary. Problem statement. At present, to implement a deterministic method of assessment of the mechanical features is not possible based on the analysis of causal links, because they are influenced with a large number of variables that are highly correlated with each other, and some part of them are changing in a wide range of unpredictable ways.

Especially, this problem is in assessing the mechanical properties of metal constructions and products of special purpose in the process of their exploitation: oil pipes, carcasses of residential buildings, etc. In these cases, mechanical testing is the problem is not always technically feasible, and out of variety of express methods of non-destructive control are used often in practice in verbal or semiquantitative. The difficulty is that under the impact of various factors: temperature, corrosive environments, etc., structural changes occur far from thermodynamic equilibrium, and as result the mixed structures are got, including Widmannstätten structure. Use of classical methods of metallography is not always possible to quantify such structures with the precision that may be necessary for practical purposes. In this regard, considerable interest is the search for new approaches to assess the metal structure with a purpose of prognosis of its mechanical properties. **Purpose.** To obtain information about the possible application of wavelet-multifractal analysis to assess the mechanical properties of metal. **Conclusion.** Sensitiveness between strength properties and uniformity is set with regularity of structure elements of bainite-perlite group, and also between the viscous properties and uniformity, a regularity of element of the ferrite group. The results suggest that the realization of this method allows in the minimal and possible cost for the real tests to provide the necessary accuracy for practical purposes.

Key words: *wavelet-multifractal analysis, the dimension, the mechanical properties, the prognosis*

Введение. На сегодняшний день на производстве внедрено множество методик и моделей прогнозирования механических свойств металлов и сплавов на основе анализа их структуры и состава, что сводит к минимуму количество механических испытаний и дает огромный экономический эффект в промышленных масштабах [1; 2]. Это связано с тем, что реализовать детерминированный метод оценки механических свойств, основанный на анализе причинно-следственных связей, не представляется возможным, поскольку на них оказывает значительное влияние большое число переменных, сильно взаимосвязанных между собой, часть из которых изменяется в широком диапазоне непредсказуемым образом.

Особенно остро эта задача стоит при оценке механических характеристик металлических конструкций и изделий ответст-

венного назначения в процессе их эксплуатации: труб нефтепроводов, каркасов жилых зданий и т. д. В этих случаях проведение механических испытаний представляется задачей не всегда технически осуществимой, а из множества экспресс-методов неразрушающего контроля на практике чаще всего применяют вербальный или полуквантитативный (балловая оценка).

Сложность заключается в том, что под воздействием температуры, агрессивных сред и т. д. структурные превращения протекают вдали от термодинамического равновесия, вследствие чего часто получают смешанные типы структуры. Использование классических методов металлографии не всегда позволяет проводить количественную оценку подобных структур с той точностью, которая может понадобиться в практических целях [2]. В этой связи значительный инте-

рес представляет поиск новых подходов для оценки структуры металла с целью прогноза его механических свойств, в частности, с применением вейвлетно-мультифрактального подхода [3].

Цель работы – получить информацию о возможности применения методов вейвлетно-мультифрактального анализа для оценки механических свойств металла.



Рис. 1. Чувствительность прочностных свойств к перлитно-бейнитной группе (а) и вязких – к ферритной группе (б): 1 – регулярность перлита; 2 – однородность перлита и бейнита; 3 – однородность перлита; 4 – однородность феррита; 5 – регулярность феррита; 6 – регулярность феррита

Материал и методы исследований. Объектом исследований являлась микроструктура стали Ст3пс (0,14 %С) и связь ее статистических характеристик с механическими свойствами. Из стали Ст3пс (круг Ø 24 мм) были подготовлены комплекты

стандартных образцов для механических испытаний и исследования микроструктуры. Образцы подвергались термической обработке: нагреву до 930 °С при выдержке 12 мин с ускоренным охлаждением в воде от 650 °С до 400 °С с интервалом 50 °С.

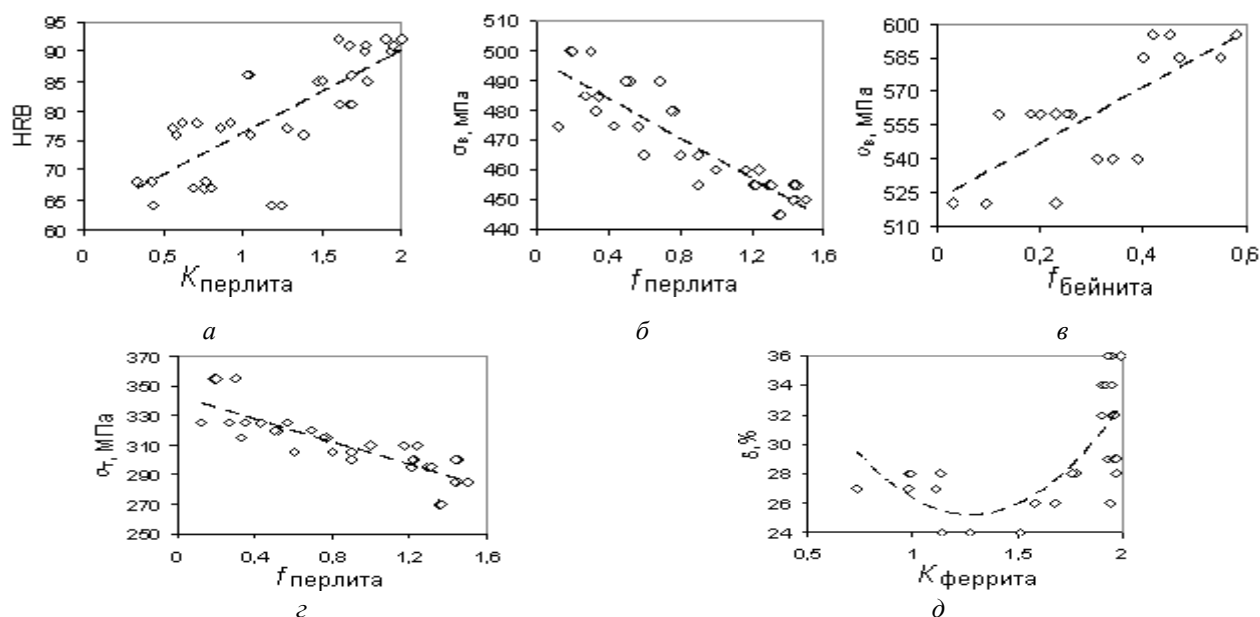


Рис. 2. Соотношения между статистическими характеристиками структуры и механическими свойствами стали Ст3пс

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Чувствительность между статистическими характеристиками элементов микроструктуры и механическими свойствами стали Ст3пс определяли по формуле, предложенной авторами в работе [4]:

$$Z_i = |Y_i - Y_{i+1}| / |X_i - X_{i+1}|, \quad (1)$$

где Y_i и Y_{i+1} – статистические характеристики элемента структуры, вычисленные в i и $i+1$ точках структуры металла; X_i и X_{i+1} – механические свойства металла в этих точках.

Таким образом, путем сравнения полученных результатов были выявлены наиболее чувствительные друг к другу статистические характеристики и механические свойства. На рисунке 1 приведена гистограмма распределения чувствительности механических свойств стали СтЗпс к статистическим характеристикам элементов ее микроструктуры. Из гистограммы следует, что наилучшая чувствительность наблюдается между прочностными свойствами и характеристиками однородности, регулярности перлитно-бейнитной группы (рис. 1 а), а также между вязкими свойствами и одно-

$$HRB = 14,068 \cdot K_{\text{перлита}} + 62,129$$

$$\sigma_B = -33,328 \cdot f_{\text{перлита}} + 497,42$$

$$\sigma_B = 124,48 \cdot f_{\text{бейнита}} + 521,94$$

$$\sigma_T = -38,931 \cdot f_{\text{перлита}} + 343,22$$

$$\delta = 14,436 \cdot K_{\text{феррита}}^2 - 36,857 \cdot K_{\text{феррита}} + 48,757.$$

Для установления практической ценности использования вейвлетно-мультифрактального подхода для прогноза механических свойств стали СтЗпс проведен сравнительный анализ полученных результатов с результатами, которые получены с помощью разработанных ранее методов неразрушающего контроля [1]. Средняя относительная погрешность при вычислении механических свойств с использованием вейвлетно-мультифрактального подхода (по полученным уравнениям (6-9)) составляет 7 %, с помощью существующих методов неразрушающего контроля – 11 % [1], что свидетельствует об удовлетворительной согласованности полученных результатов с

родностью, регулярностью феррита (рис. 1 б), как структуры с наиболее высокими пластичными свойствами.

Такой подход позволил получить формализованное описание соотношений между наиболее чувствительными друг к другу механическими свойствами металла и статистическими характеристиками конкретного элемента микроструктуры. На рисунке 2 приведены установленные в этой связи корреляционные зависимости.

Уравнения аппроксимации соотношений, приведенных на рисунке 2, имели следующий вид:

$$(2) \text{ к рис. 2 а,}$$

$$(3) \text{ к рис. 2 б,}$$

$$(4) \text{ к рис. 2 в,}$$

$$(5) \text{ к рис. 2 г,}$$

$$(6) \text{ к рис. 2 д.}$$

соответствующими данными натуральных испытаний.

Выводы. По результатам проведенной работы установлена чувствительность между прочностными свойствами и однородностью, регулярностью элементов структуры перлитно-бейнитной группы, а также между вязкими свойствами и однородностью, регулярностью элементов ферритной группы. Полученные результаты свидетельствуют о том, что реализация разработанного метода позволяет при минимально возможных затратах на натурные испытания обеспечивать необходимую в практических целях точность.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Большаков В. И. Материаловедческие аспекты применения вейвлетно-мультифрактального подхода для оценки структуры и свойств малоуглеродистой стали / В. И. Большаков, В. Н. Волчук // Металлофизика и новейшие технологии : сб. науч. тр. / Ин-т металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины. – Киев, 2011. – Т. 33, № 3. – С. 347-360.
2. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография (стереология металлических материалов) / С. А. Салтыков. – Москва : Металлургия, 1976. – 270 с.
3. Большаков В. И. Фракталы в материаловедении / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров. – Днепропетровск : ПГАСА, 2005. – 253 с.
4. Большаков В. И. Об оценке применимости языка фрактальной геометрии для описания качественных трансформаций материалов / В. И. Большаков, Ю. И. Дубров // Доповіді Національної академії наук України. – 2002. – № 4. – С. 116-121.

REFERENCES

1. Bol'shakov V.I. and Volchuk V.N. *Materialovedcheskie aspekty primeneniya veyvletno-mul'tifraktal'nogo podkhoda dlya otsenki struktury i svoystv malouglerodistoy stali* [Materials science aspects of the application of wavelet multi-fractal approach for assessing the structure and properties of low-carbon steel]. *Metallofizika i noveyshie tekhnologii* [Metal physics and advanced technologies]. Kiev, 2011, vol. 33, no 3, pp. 347-360. (in Russian).
2. Saltykov S.A. *Stereometricheskaya metallografiya (stereologiya metallicheskih materialov)* [Stereometric metallography (Stereology of metallic materials)]. Moscow: Metallurgiya, 1976, 270 p. (in Russian).
3. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Fraktaly v materialovedenii* [Fractals in material science]. Dnepropetrovsk: PGASA, 2005, 253 p. (in Russian).
4. Bol'shakov V.I. and Dubrov Yu.I. *Ob otsenke primenimosti yazyka fraktal'noy geometrii dlya opisaniya kachestvennykh transformatsiy materialov* [An estimate of the applicability of the language of fractal geometry to describe the qualitative transformation of materials]. *Dopovidi Natsional'noy akademii nauk Ukrainy* [Reports National Academy of Sciences of Ukraine]. 2002, no. 4, pp. 116-121. (in Russian).

Стаття рекомендована до друку 15.05.2015 р. Рецензент: д-р т. н., проф. Ю. І. Дубров

Надійшла до редколегії: 07.09.2015 р. Прийнята до друку: 11.09.2015 р.