

УДК 519.21

**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРЕТИКО-ИНФОРМАЦИОННОГО ПОДХОДА
ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА**

В. И. Большаков, д. т. н., проф., В. Н. Волчук, к. т. н., доц., Ю. И. Дубров, д. т. н., проф.

Ключевые слова: критерии качества, теоретико-информационный подход, структура, энтропия

Для идентификации структуры металла в настоящее время активно используют ЭВМ, при исследователи разделяют изображение его структуры, на несколько различающихся по какому-либо признаку частей, как, например, это показано на рисунке 1, где приведено растровое изображение шлифа, содержащего бейнит – 1 с остаточным аустенитом – 2 для стали 16Г2АФ¹.

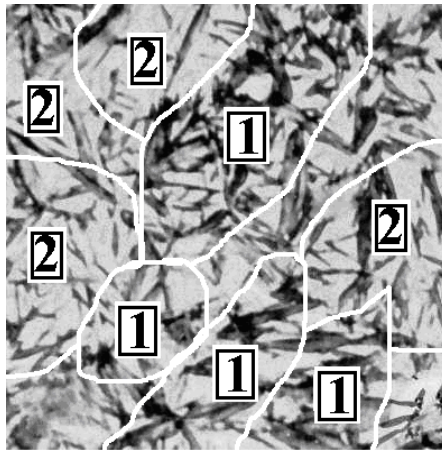


Рис. 1. Микроструктура стали 16Г2АФ, × 500

Участки структуры металлов, которые не поддаются принятой идентификации, продиктованной нормативными документами (например, ГОСТ 5639 или ГОСТ 3443), исследователи изучают на другом, большем масштабе. Например, зерно перлита малоуглеродистой стали можно исследовать с помощью оптического микроскопа, при увеличении в 200 раз (микроструктура), а структуру его перлитной колонии – при увеличении в 20 000 раз (субструктура²). Самым высоким информационным уровнем обладает микроструктура, которая при помощи оптической микроскопии коррелируется с её зрительным восприятием. Для определения принадлежности металла к тому или иному классу применяют балловую (полуколичественную) оценку его структуры, которая, в силу её визуального определения, не всегда коррелирует с характеристиками качества металла [1]. В этой связи балловые оценки применяются при идентификации только лишь некоторых определённых типов структур [2]. Оценка численных значений критериев качества металла, в частности, стали, производится, в основном, только при анализе его микроструктуры.

Исследования же структуры металла на субструктурном или атомном уровне, с нашей точки зрения, используется нерационально, так как результаты таких исследований

¹ Как правило, растровые изображения шлифов отличаются наличием более светлых и более темных областей, которые различаются не только конфигурацией изображения, но и плотностью окраски его частей.

² В металлографии размерный ряд структур традиционно подразделяют на четыре основные группы: макроструктура ~ 10⁻¹ м (дефекты, видимые невооруженным глазом или с помощью лупы: дендриты, крупные включения, вид излома); микроструктура ~ 10⁻⁴ м (зерна, отдельные фазы, границы зерен); субструктура ~ 10⁻⁷ м (структура внутри зерен; дислокации, ячейки, фрагменты); субмикроструктура или атомная структура ~ 10⁻⁹ м (точечные дефекты; размер решеток) [7].

применяются, в основном, для изучения локальных особенностей отдельных элементов микроструктуры [3 – 7]. Результаты исследований, полученных при изучении структуры металла на субструктурном уровне отдельных её элементов, в силу потенциальной анизотропности его структуры, не позволяют распространять их на всю структуру.

Наличие части структуры металла, которая не поддаётся допустимо точной, стандартной идентификации, объясняется неполнотой её формальной аксиоматики (НФА), выявляющейся при описании процесса формирования этой структуры [3]. Часто НФА исследователи пытаются компенсировать применением математической статистики для описания этой структуры (см., например [4]). Однако неизбежные различия в её изображениях, получаемых при одинаковых условиях изготовления³ металла, ставят под сомнение статистически получаемые результаты, характеризующие его качество [5]. НФА инициирует *вычислительную неприводимость* структуры исследуемого металла, проявляющуюся в неосуществимости создания допустимо точного, математического её описания [6].



Рис. 2. Микроструктура стали Ст3пс, $\times 500$

Гёдель своей работой [9; 10], опубликованной им ещё в 1930 году, доказал теорему о том, что в теориях, конструируемых на основании формальной аксиоматики, значения исходных терминов и их интерпретации являются неполными и поэтому, добавим мы, являются *неточными*.

Определение принадлежности металла к тому или иному классу, минуя прямые испытания, с присваиванием этому металлу балловых оценок, допускающих прогнозирование показателей его качества⁴, на практике реализуют при визуальной оценке его структуры [2] (см. например, табл.).


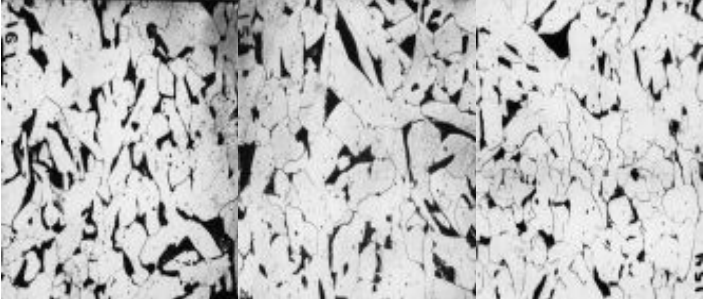

С учётом применения визуальной оценки структуры металла, которую используют исследователи во время присвоения этой структуре баллов, можно утверждать, что этот способ создаёт неопределённость, которая естественно связана с числом изображений структуры – k . Вследствие широкого диапазона возможных значений – k , получение допустимо точной балловой оценки структуры металла весьма затруднительно.

Формально, различающиеся изображения структуры металла – x_i, x_j , изготавливаемого при одинаковых начальных условиях, можно различать, анализируя различия информационных энтропий, изображений – $H(x_i), H(x_j)$, которые, следуя Клоду Шеннону [11], определяются как (1) и (2).

³ См. например, рисунок 2, где показана структура стали Ст3пс, полученной с трех шлифов металла, произведенного при одинаковых начальных условиях [8].

⁴ Согласно ГОСТ 8233.

Балловые оценки, информационная энтропия, микоструктура стали Ст3пс и её механические свойства

П / П	Структура	Структура, $\times 500$ R – расстояние до центра, мм	Балл зерна феррита (ГОСТ 8233-56)	H	σ_B , МПа	σ , МПа	δ , %	ψ , %
1	1	2	3	4	5	6	7	8
2	Ферритно-перлитная (в состоянии поставки), круг $\varnothing 24$ мм	 $R = 0 \ R = 6 \ R = 12$	7,8 7,8 7,8	0,223 0,219 0,215	445 450 455	270 285 300	36 34 32	68 70 70
	Ферритно-перлитная (вода: 930 – 650°C, воздух), круг $\varnothing 24$ мм	 $R = 0 \ R = 6 \ R = 12$	7,8 7,8 7,8	0,286 0,225 0,200	455 455 460	295 300 310	29 28 26	74 72 68
	Ферритно-перлитная (нагрев 930°C, охлаждение на воздухе), арматура $\varnothing 25$ мм	 $R = 0 \ R = 6 \ R = 12$	5 – 8 5 – 8 5 – 8	0,301 0,299 0,300	465 480 494	284 295 305	36 35 35	72 70 69

$$H(x_i) = -\sum_1^n P_i(x_i) \log P_i(x_i) \quad (1)$$

$$H(x_j) = -\sum_1^n P_j(x_j) \log P_j(x_j)$$

где $P(x_i), P(x_j)$ – вероятности наличия изображений x_i, x_j структур, близких между собой по строению и окраске, отнесённых к площади поверхности шлифа s :

$$P(x_i) = \frac{\sum_1^m s_m}{s}, P(x_j) = \frac{\sum_1^n s_n}{s} \quad (2)$$

Рассмотрим показанное на рисунке, растровое изображение шлифа стали Ст16Г2АФ, содержащее бейнит (участок микроструктуры 1) с остаточным аустенитом (участок микроструктуры 2)⁵. Сумма площадей участков 1 и 2 соответственно равняется $s_1 = 0,48$ и $s_2 = 0,32$, что позволило вычислить энтропии каждой из этих областей. С учётом аддитивности энтропии неопределённость всей структуры указанной марки стали определялась как сумма энтропий этих участков: $H(x) = 0,8$.

Для примера рассмотрим металл – сталь Ст3пс. В таблице приведены балловые оценки, механические свойства и информационная энтропия микроструктуры стали при различных её модификациях. Из таблицы следует, что степень неопределённости микроструктуры стали естественно измерят количеством информации, получаемой вследствие уменьшения неопределённости. В этой связи каждой приведенной в таблице структуре установлена её информационная энтропия. Естественно, что исследователь предпочтение отдаст тому металлу, у которого энтропия (неопределённость) наименьшая. В таблице приведены фотографии структур стали с присущей им минимальной информационной энтропией среди рассмотренных 27 фотографий структур.

Таким образом, показано, что идентификация характеристик качества металла возможна не только на основании применения традиционных методов анализа, но и путем применения теоретико-информационного подхода [8].

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. **Большаков В. И.** Пути решения вычисленно неприводимых задач в материаловедении / В. И. Большаков, Ю. И. Дубров, Т. В. Буньковская // Моделирование и оптимизация в материаловедении МОК-42. – Одесса: Астропринт, 2003. – С. 151 – 152.
2. **Салтыков С. А.** Стереометрическая металлография / С. А. Салтыков. – М. : Металлургия, 1970. – 376 с.
3. **Шиммель Г.** Методика электронной микроскопии: Пер. с англ. – М. : Мир, 1972. – 300 с.
4. **Большаков Вад. І.** Про неповноту формальної аксіоматики в задачах ідентифікації структури металу / Вад. І. Большаков, В. І. Большаков, Ю. І. Дубров // Вісник НАН України. – 2014. – № 4. – С. 55 – 59.
5. **Большаков В. И.** Пути решения задач идентификации качественных характеристик материалов на основе экспертных систем / В. И. Большаков, Ю. И. Дубров, А. Н. Ткаченко, В. А. Ткаченко // Доп. НАН України. – 2006. – № 4. – С. 97 – 102.
6. **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. – № 9. – С. 46 – 49.
7. **Тушинский Л. И.** Методы исследования материалов / Л. И. Тушинский, А. В. Плохов, А. О. Токарев, В. И. Синдеев. – М. : Мир, 1965. – 384 с.
8. **Большаков В. И.** Особенности применения мультифрактального формализма в материаловедении / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Доп. НАН України. – 2008. – № 11. – С. 99 – 107.
9. **Клини Стефен К.** Введение в математику / Клини Стефен К. – М. : ИЛ, 1957. – 527 с.

⁵ Как правило, растровые изображения шлифов, отличаются наличием более светлых и более темных областей, которые различаются не только конфигурацией, но рисунком и плотностью его окраса.

10. Успенский В. А. Теорема Гёделя о неполноте / В. А. Успенский. – М. : Наука, 1982. – 110 с.
11. Шеннон К. Математическая теория связи: в кн. : «Работы по теории информации и кибернетике». – М. : ИЛ, 1963. – С. 243 – 322.

SUMMARY

In a number of papers devoted to the definition of the numerical values of the quality criteria of the metal, the researchers separated the image of its structure, several different, on what grounds or parts.

Those parts of the structure of metals, which can not be accepted identification dictated by regulatory documents (eg GOST GOST 5639 or 3443), researchers are studying them on another, larger scale. For example, grain pearlite mild steel can be examined using an optical microscope at a magnification image of its structure by 200 times, and the structure of its pearlite colonies studied under an electron microscope with image magnification structures 20 000 times. In the first case, the researchers studied the structure is referred to the microstructures in the second, to the substructure. The highest level of information has a microstructure that by optical microscopy corresponds with its visual perception. Of the definition of the metal to a particular class, use the scoring (in lukolichestvennyu) assessment of its structure, which, by virtue of its visual determination, does not always correlate with the characteristics of the quality of the metal. In this regard, ranking point used in the identification of only a few, certain types of structures. Determination of the numerical values of quality criteria of metal, in particular steel, is produced mainly only by analyzing its microstructure.

For example, consider a metal – steel St3ps. Table. given ranking point, mechanical properties and microstructure of the information entropy of steel at its various modifications. From this Table. it follows that the measure of the uncertainty of the microstructure of steel natural to measure the amount of information obtained due to the reduction of uncertainty. In this regard, each described in Table. structure established its information entropy. Naturally, the researcher will give preference to the metal, in which the entropy (uncertainty) is minimal. Table. shows photographs of steel structures inherent minimum information entropy of the considered 27 pictures of structures.

Thus, it is shown that the identification of the characteristics of quality me-metal, can be made only on the basis of traditional methods of analysis, but also through the application of information-theoretic approach.

REFERENCES

1. Bol'shakov V. I. Puti reshenija vychislenno neprivodimyh zadach v materialovedenii / V. I. Bol'shakov, Ju. I. Dubrov, T. V. Bun'kovskaja // Modelirovanie i optimizacija v materialovedenii MOK-42. – Odessa: Astroprint, 2003. – S. 151 – 152.
2. Saltykov S. A. Stereometricheskaja metallografija / S. A. Saltykov. – М. : Metallurgija, 1970. – 376 s.
3. Shimmel' G. Metodika jelektronnoj mikroskopii: Per. s angl. – М. : Mir, 1972. – 300 s.
4. Bol'shakov Vad. I. Pro nepovnotu formal'noï aksiomatiki v zadachah identifikacii strukturi metalu / Vad. I. Bol'shakov, V. I. Bol'shakov, Ju. I. Dubrov // Visnik NAN Ukraïni. – 2014. – № 4. – S. 55 – 59.
5. Bol'shakov V. I. Puti reshenija zadach identifikacii kachestvennyh harakteristik materialov na osnove jekspertnyh sistem / V. I. Bol'shakov, Ju. I. Dubrov, A. N. Tkachenko, V. A. Tkachenko // Dop. NAN Ukraïni. – 2006. – № 4. – S. 97 – 102.
6. Bol'shakov Vad. I. Chastkova kompensatsiya nepovnoty formal'noyi aksiomatyky pry identyfikatsiyi struktury metalu / Vad. I. Bol'shakov, V. I. Bol'shakov, V. M. Volchuk, Yu. I. Dubrov // Visnyk NAN Ukrayiny. – 2014. – № 9. – S. 46 – 49.
7. Tushinskij L. I. Metody issledovanija materialov / L. I. Tushinskij, A. V. Plovov, A. O. Tokarev, V. I. Sindeev. – М. : Mir, 1965. – 384 s.
8. Bol'shakov V. I. Osobennosti primenenija mul'tifraktal'nogo formalizma v materialovedenii / V. I. Bol'shakov, V. N. Volchuk, Ju. I. Dubrov // Dop. NAN Ukraïni. – 2008. – № 11. – S. 99 – 107.
9. Klini Stefen K. Vvedenie v matematiku / Klini Stefen K. – М. : IL, 1957. – 527 s.
10. Uspenskij V. A. Teorema Gjodelja o nepolnote / V. A. Uspenskij. – М. : Nauka, 1982. – 110 s.
11. Shennon K. Matematicheskaja teorija svjazi: v kn. : «Raboty po teorii informacii i

kibernetike». – М. : ІЛ, 1963. – С. 243 – 322.

Відомості про авторів:

Большаков Володимир Іванович, д. т. н., професор, ректор Придніпровської державної академії будівництва та архітектури, e-mail: postmaster@pgasa.dp.ua.

Волчук Володимир Миколайович, к. т. н., доцент кафедри матеріалознавства та обробки матеріалів ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», e-mail: volchuku@yandex.ru.

Дубров Юрій Ісайович, д. т. н., професор кафедри матеріалознавства та обробки матеріалів ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», e-mail: postmaster@pgasa.dp.ua.

УДК 691. 327

**ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ОБЖИГА МАГНЕЗИТА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА
МАГНЕЗИАЛЬНОГО КАМНЯ**

*В. Н. Деревянко, д. т. н., проф., А. И. Бегун, * к. т. н., доц.,
А. Н. Гришко, * к. т. н., ст. преп., А. А. Максименко, с. н. с.*

**Днепропетровский государственный аграрно-экономический университет*

Ключевые слова: магнезиальное вяжущее, каустический магнезит, температура обжига, кремнезем, минералогический состав, гидросиликаты магнезия, коэффициент размягчения, электронно-микроскопические исследования

Введение. В Украине неоправданно широко используется портландцемент – даже там, где можно использовать вяжущие, которые производятся при более низких температурах, с меньшими затратами энергии. Например, производство магнезиальных вяжущих веществ требует низкопотенциальную теплоту, потому что основной компонент – MgO обжигают при температурах ниже 1 000° С. Энергия получения магнезиального вяжущего составляет 30...40 % энергии получения портландцемента, а природные запасы магнезисодержащих минералов велики и составляют не менее 8 % земной коры. Поэтому низкие энергозатраты позволяют широко использовать магнезиальные вяжущие в воздушно-сухих условиях эксплуатации, а исследования влияния режимов обжига магнезита на структуру и свойства магнезиального камня являются актуальными.

Также известно, что к недостаткам каустического магнезита относятся низкая водостойкость, высокая коррозионная активность и большой коэффициент термического расширения. Поэтому мы определяли способы улучшения вышеуказанных свойств каустического магнезита.

Анализ публикаций. Причиной очень медленной гидратации обожженного магнезита является пленка гидроксида магнезия, обволакивающая зерна MgO и препятствующая поступлению к ним влаги. Конечно, вяжущее с такой длительной гидратацией не устраивает строителей, тем более что конечный продукт твердения низкопрочный [1; 3]. Однако обожженный магнезит является хотя и воздушным, но минеральным вяжущим, и введение в систему MgO – H₂O тонкодисперсного кремнезема приведет к образованию гидросиликатов магнезия, которые упрочняют магнезиальный камень по аналогии с действием силикатов кальция при их гидратации, так как микрокремнезем обеспечивает связывание свободного MgO в сложное оксихлоридное соединение и увеличивает коэффициент размягчения продуктов твердения. Гидросиликаты магнезия образуются даже при комнатной температуре при взаимодействии гидроксида магнезия с двуокисом кремния [4], особенно с аморфной кремниевой кислотой.

По данным [5], раствор, состоящий из гидроксида магнезия и аморфной кремниевой кислоты, схватывается в течение 48 часов. Образцы, содержащие 20 % песка, после полутора лет твердения на воздухе показали прочность при изгибе 38 кгс/см² (3,8 МПа) и прочность при сжатии 285 кгс/см² (28,5 МПа). При взаимодействии образуется нестабильное соединение, из которого с увеличением продолжительности твердения выделяются игольчатые кристаллы магнезита с кремнеземом состава 2MgO SiO₂ – H₂O и гелеобразный гидроксид магнезия. Последний действует как цементирующее вещество.