

УДК 62-272.22:621.78.01:519.21
DOI: 10.22213/2413-1172-2020-3-15-24

Использование информационной энтропии структуры стали для определения качества и ресурса ее функциональных свойств*

В. В. Белых, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В. В. Муравьев, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова;
Физико-технический институт УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Россия

В. А. Степанов, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

При проведении металлографического анализа возникают трудности в инвариантном воспроизведении его структуры, поскольку для одного и того же металла наблюдаются различные изображения, что создает неопределенность в идентификации структуры. В статье представлены информационные параметры энтропийной модели, полученные в результате мультифрактальной параметризации термообработанной стали 60С2А.

Получены оценки качества структуры и ресурса функциональных свойств стали, установлен режим термообработки, обеспечивающий оптимальную структуру стали 60С2А. Управляющие параметры режима термообработки: различный состав и температура закалочной среды, температура отпуска.

Выделяются три группы структурных состояний термообработанной стали по «норме хаотичности» поведения активных элементов структуры по отношению к равновесному состоянию стали:

– значительный рост энтропии $H_t = 17$ при незначительной величине параметра порядка $KS = 0,02 \dots 0,04$; запас информационной памяти 30..32 %;

– незначительное изменение энтропии $H_t = 15,5 \dots 15,8$; параметр порядка $KS = 0,05 \dots 0,13$; запас информационной памяти 16..21 %;

– снижение энтропии $H_t = 12,6 \dots 13,6$ при неизменном параметре порядка $KS = 0,04$; запас информационной памяти 4...7 %.

Наблюдается экстремальный характер изменения энтропии в зависимости от величины концентрации водного раствора ПЗЖ закалочной среды. Экстремальный характер изменения энтропии возникает в интервале 6...11 % ПЗЖ в результате смены типа самоорганизации – перехода от термодинамического при содержании 0...6 % ПЗЖ к динамическому при содержании 11...12 % ПЗЖ. В интервале 0...11 % ПЗЖ величина параметра порядка практически неизменна, в то же время происходят заметные изменения энтропии.

Результаты исследования энтропийной модели структуры термообработанной стали 60С2А позволяют сделать вывод о возможности создания классификационной таблицы структурных состояний стали на основе информационной энтропии и параметра порядка, оценки запаса информационной памяти качества функциональных свойств структуры для прогнозирования надежности эксплуатации.

Ключевые слова: сталь, закалка, отпуск, энтропия, упорядоченность, мультифрактал.

Введение

Представления о структуре металла основаны на его рассмотрении как открытой нелинейной системы [1]. При обмене системой энергией, веществом и информацией с окружающей средой формируются устойчивые самоподобные носители физических свойств (активные элементы структуры) на разных масштабных уровнях [2]. В физической системе для оценки перехода тепловой энергии в механическую возникло представление об энтропии как мере хаотичности (неопределенности) движения молекул. Термодинамическое выражение энтропии S , Дж/К, приводит Л. Больцман:

$$S = k_B \cdot \ln W,$$

где W – статистический вес макросостояния системы; $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана.

Понятие энтропии как утраченной информации рассматривает Л. Бриллюэн по отношению к микроинформации о реализации в данный момент одного из возможных микросостояний системы [3, 4]. В этом случае количество информации о системе согласно теории информации, бит,

$$I = -\log_2 P = \log_2 W.$$

Любое микросостояние системы быстро переходит в другое из-за тепловых флуктуаций, поэтому микроинформация не «запоминается» системой.

В общем случае, когда система обладает N устойчивыми стационарными состояниями, вероятности которых P_1, P_2, \dots, P_N , связь информации и структуры через информационную энтропию К. Шенон выразил как

$$H = -\sum_i^N P_i \cdot \log_2 P_i.$$

К. Шенон установил первичность понятий энтропии и информации. Информация появляется только после необходимого числа испытаний, а до опыта она является энтропией. Энтропийно-информационный метод основан на анализе информации:

$$I = H_{pr} - H_{ps},$$

где H_{pr} – априори (энтропия до опыта); H_{ps} – апостериори (энтропия после проведенного опыта).

При $H_{ps} = 0$ информация, получаемая при выявлении реализации, численно равна первоначальной энтропии:

$$I = H_{pr} = \log_2 N.$$

Таким образом, К. Шенон произвел энтропийную параметризацию информации.

В материаловедении при оценке качества металла возникают затруднения в инвариантном воспроизведении его структуры, поскольку при абсолютно одинаковых условиях получения одного и того же сплава металла (химический состав, технологические режимы получения) наблюдается многообразие изображений, создающих неопределенность в идентификации структуры. При изготовлении пружин ответственного назначения из рессорно-пружинной стали 60С2А актуальной является разработка новых информативных технологий, снижающих неопределенность. Инвариантной характеристикой структуры металла может рассматриваться информационная энтропия, если ее определять через геометрические вероятности областей изображений элементов структуры с одинаковым окрасом шлифа и вычислять усредненную информационную энтропию по всей площади изображения, которая рассматривается как индикатор механических свойств [5, 6].

Для описания природных материалов перспективным является мультифрактальный формализм, статистическая и информационная физика, теория симметрии [7–9].

Информация остается практически неизменной до тех пор, пока не изменятся свойства симметрии, например, при фазовом переходе 1-го рода. Возникновение ближнего и дальнего порядков при фазовых переходах газ – жидкость и жидкость – кристалл сопровождается возникновением скрытых энтропий переходов, которые в свете понятия энтропии как утраченной информации Бриллюэна являются оценками содержания структурной информации.

С понятием энтропии и информации развиваются теоретические представления о «порядке» и «организации» сложных систем в материаловедении.

Рост сложности системы происходит за счет увеличения разнородных элементов и связей между ними, на математическом уровне она связана с нелинейностью. На физическом уровне хаотическое поведение сложной системы описывается в статистических терминах: «плотность вероятности», «корреляция», «математическое ожидание», «дисперсия» и др. В работе [10] установлен степенной закон распределения плотности (вероятностей) размеров включений графита на плоскости шлифа. Показатель степени α характеризует сложную итерационную процедуру графитизации как рождения фрактальной структуры. В процессе структурообразования графита количество возможных макросостояний (форм графита) увеличивается быстрее, чем количество реально наблюдаемых макросостояний системы. Это можно объяснить как рост и усложнение организации структуры (возрастание упорядоченности) с одновременным спонтанным продуцированием положительной энтропии, т. е. нарушением порядка. Причина наблюдаемого парадокса в том, что возрастание энтропии в отличие от дисперсии не зависит от значений наблюдаемой величины и потому характеризует не столько разброс, сколько разнообразие значений этой величины.

Изменения структурной информации используются для целей диагностики и оценки качества в микро- и нанотехнологиях твердых структур [11], анализа параметров микроструктур и процессов их производства.

В основе лежит представление о том, что при критическом уровне физической и информационной энтропий

$$S_k = k_B H_k = k_B \cdot \ln N,$$

когда энтропия максимальна, согласно Л. Больцману в термодинамической системе наступает физический хаос и происходит полная потеря функционального качества структуры. Макси-

мальная информация $I = H = \log_2 N$ равна двоичному логарифму числа равновероятных состояний системы. Начальный конфигурационный запас энтропии в структуре выражается физической энтропией:

$$S_0 = k_B \ln N = k_B \cdot H_i.$$

В процессе эксплуатации в структуре металла из-за роста дефектов происходят процессы деградации (неправильная технология), что приводит к возрастанию физической энтропии и, следовательно, к «стиранию» информационной памяти. Изменение энтропии при «стирании» информационной памяти $\Delta S = S - S_0$ определяет срок службы изделия в виде интегрального уравнения

$$k_B (H - H_i) = \int_0^{\tau} v dt,$$

где v – «скорость производства энтропии»; $H - H_i$ – параметр запаса информационной памяти структуры, обеспечивающего функциональное качество на протяжении времени эксплуатации τ_k .

Предпосылкой для структурообразования в открытых системах является существование определенного соотношения между производством энтропии в самой системе и обменом энтропией с внешней средой.

Выделяются два типа самоорганизации в открытых системах: термодинамическая (контролируемая стремлением системы к минимуму свободной энергии) и динамическая (контролируемая стремлением системы к минимуму производства энтропии). Действие информации, в противоположность энтропии, выражается в тенденции к увеличению упорядоченности и уменьшению неопределенности.

Неоднозначность реакции нелинейной системы на внешнее воздействие проявляется в точках бифуркаций (особые точки выбора пути эволюции системы), которые активизируются изменением управляющего параметра. С энтропией системы связан ее параметр порядка, поэтому, изменяя энтропию, можно получить необходимую упорядоченность в системе. В работах [12, 13] отмечается важная роль «нормы хаотичности» в поведении активных элементов открытой системы для ее адаптации к новым условиям существования. Активность элементов структуры возникает при взаимодействии отличных друг от друга потоков вещества – энергии – информации в результате возникновения определенного соотношения между

производством $d_i S$ энтропии и обменом энтропией $d_e S$ со средой. Устойчивости активных элементов соответствует условие баланса энтропии:

$$dS = d_i S + d_e S = 0.$$

Экстремальное значение энтропии является условием равновесного состояния системы, проявлением «критической самоорганизации», целостности системы на различных масштабных уровнях. Эти стационарные уровни структуры характеризуют состояния активных элементов, определяемых величиной параметра порядка и информационной энтропии.

Изменение энтропии при термообработке металла состоит из частей:

$$\Delta S = \Delta S_T + \Delta S_{\text{конф}},$$

где ΔS_T – температурный прирост энтропии; $\Delta S_{\text{конф}}$ – изменение энтропии, обусловленное структурными преобразованиями.

Цель работы – поиск наилучших режимов термообработки, обеспечивающих оптимальную микроструктуру конструкционной рессорно-пружинной стали 60С2А на основе энтропийной модели с использованием мультифрактальной параметризации.

Задачи:

- создать энтропийную модель структурного состояния конструкционной рессорно-пружинной стали 60С2А и получить оценку качества функциональных свойств для различных режимов термообработки;

- сравнить относительную степень хаотичности и упорядоченности структурных состояний металла после различных режимов термообработки на основе сравнения с информационной энтропией нормализованного состояния стали;

- установить стационарные уровни структуры шлифа – матрицу структурной памяти состояния металла из условия баланса информационной энтропии и масштабной инвариантности.

Материалы и методики исследования

В качестве управляющих параметров режима термообработки для изменения качества функциональных свойств структуры стали использовались: разный состав и температура закалочных сред, разная температура отпуска, что изменяло информационную энтропию и оказывало влияние на контролируемый параметр порядка структуры.

Изменение информационной энтропии вызывается тепловыми и фазовыми преобразованиями структуры металла.

Материалом исследования служит прутковый прокат из стали марки 60С2А, используемый при производстве винтовых цилиндрических железнодорожных пружин горячей навивки, химический состав которой представлен в табл. 1. Микроструктуру исследовали на световом оптическом микроскопе Альтами MET 1M

при увеличении микроскопа $\times 1000$. Нагрев образцов осуществлялся до температуры $870\text{ }^{\circ}\text{C}$ токами высокой частоты (ТВЧ) или в электропечи. Охлаждение образцов проводилось в полимерной закалочной жидкости (ПЗЖ) Ferroquench 2000 с последующим отпуском или без него (табл. 2).

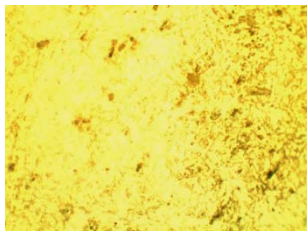
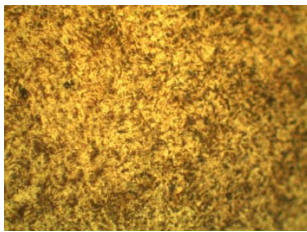
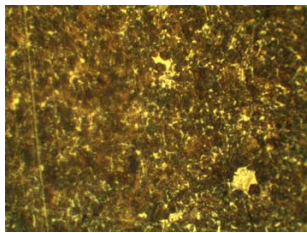
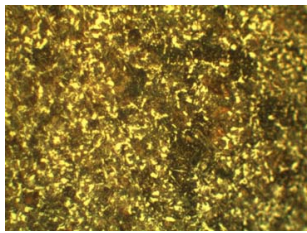
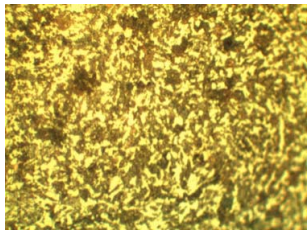
Таблица 1. Химический состав стали 60С2А, легирующие элементы масс.% по ГОСТ 14959–79, %

Table 1. The chemical composition of steel 60С2А alloying elements wt.% According to GOST 14959-79, %

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
0,58...0,63	1,6...2	0,6...0,9	до 0,25	до 0,025	до 0,025	до 0,3	до 0,2

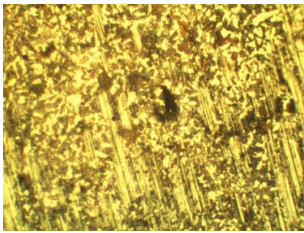
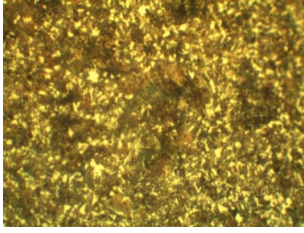
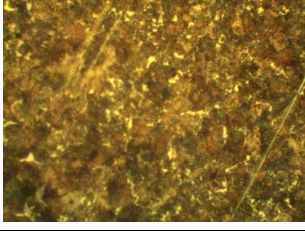
Таблица 2. Микроструктуры и режимы термообработки стали

Table 2. Microstructures and modes of heat treatment of steel

№ п/п	Микрофотография шлифа	Термообработка	Микроструктура
1		Нагрев в электрической печи до температуры $870\text{ }^{\circ}\text{C}$ с выдержкой 20 мин, закалке в масле, высокий отпуск при $T_{\text{отп}} = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ с выдержкой 1 ч	Мелкозернистый перлит, обезуглероженного слоя нет
2		Нагрев ТВЧ до температуры $870\text{ }^{\circ}\text{C}$ с выдержкой 15 с, охлаждение на воздухе	Пластинчатый перлит, обезуглероженного слоя нет
3		Нагрев под закалку ТВЧ до температуры $870\text{ }^{\circ}\text{C}$ с выдержкой 20 с, охлаждение в воде с 12%-й концентрацией ПЗЖ, $T_{\text{ПЗЖ}} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, средний отпуск в электрической печи при $T_{\text{отп}} = 410\text{ }^{\circ}\text{C}$, выдержка 75 мин	Троостомартенсит 3...4 балла
4		Нагрев под закалку ТВЧ до температуры $870\text{ }^{\circ}\text{C}$, выдержка 15 с, охлаждение в воде, $T_{\text{воды}} = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$	Мартенсит по всему сечению, обезуглероженного слоя нет
5		Нагрев под закалку ТВЧ до температуры $870\text{ }^{\circ}\text{C}$ с выдержкой 20 с, закалка в воде с 12%-й концентрацией ПЗЖ, $T_{\text{ПЗЖ}} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	Мартенсит 6...7 баллов, обезуглероженного слоя нет

Окончание табл. 2

Table 2 (continued)

№ п/п	Микрофотография шлифа	Термообработка	Микроструктура
6		Нагрев под закалку ТВЧ до температуры 870 °С с выдержкой 15 с, охлаждение в воде с 6%-й концентрацией ПЗЖ, $T_{ПЗЖ} = 55$ °С	В центре неравновесная структура, мартенсит, сорбит и продукты немартенситного распада; по краю зерна феррита, перлита, ферритная сетка по границам зерен
7		Нагрев в электрической печи до температуры 870 °С, выдержка 35 мин, закалка в воде с 11%-й концентрацией ПЗЖ, $T_{ПЗЖ} = 25$ °С	Мартенсит, троостит, пластинчатый перлит, мелкозернистый феррит. Обезуглероженный слой равномерный по всей окружности прутка глубиной 0,7 мм, крупнозернистый феррит
8		Нагрев под закалку ТВЧ до температуры 870 °С, выдержка 15 сек, охлаждение в воде с 12%-й концентрацией ПЗЖ, $T_{ПЗЖ} = 25$ °С, отпуск при $T_{отп} = 250$ °С, выдержка 75 мин	Троостит, пластинчатый перлит, мелкозернистый феррит, обезуглероженный слой равномерный по всей окружности прутка глубиной 0,4 мм, крупнозернистый феррит

Параметризация и расчет мультифрактальных характеристик проводились на основе параметризации растровых изображений структур [14].

Для этого используется равноячейстое квадратное разбиение изучаемой структуры изображения, каждой ячейке сопоставляется мера в виде положительного числа, характеризующая область структуры, приходящейся на эту ячейку. В компьютерной программе обработки точечной графики плоские изображения представляются в оцифрованной форме как матрицы дискретных одинаковых по размеру элементов изображения – пикселей. Каждому пикселю приписывается три числовых координаты: две из них (i, j) задают положение пикселя на плоскости изображения (x, y) , третья характеристика задает его цвет $Z(i, j)$. Цветовые характеристики пикселей задаются целыми числами – для серых изображений от 0 до 256. Генерируемая мера цвета

$$\mu_{i,j} = Z(i, j) / \sum_i^j Z(i, j)$$

на множестве элементарных ячеек пикселей используется для мультифрактального анализа изображений.

Предлагаемая методика отличается от бинаризованного изображения тем, что анализируется изображение для интервала градации

серого (область оптической плотности можно задавать произвольно). Можно анализировать изображение по определенным интервалам оптической плотности или анализировать по цвету структурных элементов.

Состояние неравновесной системы описывается обобщенными энтропиями Реньи:

при $q = 0$ – $D_0 = \ln N$, D_0 – размерность Хаусдорфа – Безиковича, характеризующая однородный фрактал (размерность самоподобия), N – число состояний системы;

при $q = 1$ – $D_1 = H = -\sum P_i \ln P_i$ (информационная энтропия);

при $q = 2$ – D_2 (корреляционная энтропия);

при $q = \infty$ – $D_\infty = \ln(1/P_{\max})$, P_{\max} – относительное представление доминирующей структурной фазы;

при $q = -\infty$ – $D_{-\infty} = \ln(1/P_{\min})$, P_{\min} – относительное представление редкого дефекта;

$D_1 - D_\infty$ – мера упорядоченности множества;

$D_{-\infty} - D_{+\infty}$ – может рассматриваться как мера хаотичности.

В литературе в качестве минимальной и максимальной разреженности ограничиваются рассмотрением D_{+40} и D_{-40} при $q = 40$.

Создание энтропийной модели неравновесных фазовых переходов и переходных процес-

сов адаптации в структуре стали осуществлялось на основе экспериментального изучения разномасштабных эффектов, сопровождающихся скачками энтропии D_1 и термодинамическими неустойчивостями (информационные резонансы) $D_{-40} \dots D_{+40}$ при информационных преобразованиях. Активные элементы структуры проявляют устойчивость относительно малых возмущений масштабного параметра q при информационных преобразованиях, когда масштаб регулярной евклидовой пространственной системы и хаотической системы изображения совпадают.

Обсуждение результатов

Активные элементы структуры могут рассматриваться в виде матрицы памяти как запись кодированной информации качества ее функциональных свойств.

Декодирование записи информации заключается в получении численной величины первоначальной энтропии структуры $I(x) = H(x)$, где $H(x)$ – усредненная информационная энтропия всех активных элементов структуры $D_{1i}(d_i)$, $k = 1, 2, \dots, N$:

$$H(x) = \sum_i^N D_{1i}(d_i).$$

Необходимо определить для усредненной оценки энтропии статистический вес равновероятных макросостояний системы, создающих такую же величину энтропии $H(x) = \ln N$ и максимальную информацию в битах $H_{\max} = \log_2 N$. В качестве параметра порядка структуры рассматривается средняя оценка параметра порядка активных элементов $K_S = D_1 - D_{40}$.

Параметры матрицы информационной памяти качества термообработанных структур сталей приводятся в табл. 3.

Выделяются три группы структурных состояний, полученных в результате термообработки стали относительно равновесного структурного состояния H_0 :

- 1) значительный рост энтропии $H - H_0 > 0$ (1, 7);
- 2) незначительное изменение информационной энтропии (режимы 3, 5, 8);
- 3) снижение энтропии $H - H_0 < 0$, (режимы 4, 6).

Таблица 3. Матрица информационной памяти записи качества функциональных свойств структуры термообработанной стали, оценка запаса ее служебных свойств

Table 3. Matrix of information memory for recording the quality of the functional properties of the structure of heat-treated steel, assessment of the margin of its service properties

Режим, № образца	$H = \sum D_{1i}$	H^*	$\Delta I^* = H^* - H$	$\Delta I^* / H_k, \%$	$H_{\max} = H_k$	$\Delta I_k^* = H_k - H^*$	$\Delta I_k^* / H^*, \%$	K_S
1	17,4	17,26	-0,14	-0,5	25,2	7,94	31,5	0,0203
2	14,5	20,08	5,58	26,6	21,0	0,92	4,4	0,1025
3	15,48	17,73	2,25	10	22,4	4,67	20,8	0,1304
4	12,60	16,96	4,36	23,9	18,2	1,28	7	0,0402
5	15,44	20,48	5,04	22,5	22,4	1,92	8,6	0,0596
6	13,55	18,76	5,21	26,6	19,6	0,84	4,3	0,0444
7	17,01	17,13	0,12	0,5	24,6	7,47	30,4	0,0361
8	15,84	19,30	3,46	15	22,9	3,60	15,7	0,0522

$H = \sum D_{1i}$ – начальная информационная память активных элементов; H^* – («стирание» информационной памяти) изменение записи качества структуры информационной памяти при конфигурационных преобразованиях активных элементов; $\Delta I^* = H^* - H$ – потери записи информационной памяти; $H_{\max} = H_k$ – максимальная величина информационной памяти, бит; $\Delta I_k^* = H_k - H^*$ и $\Delta I_k^* / H_k, \%$, – параметр запаса информационной памяти.

Нагрев 1-го образца выше фазовых превращений A_{C3} и длительная выдержка (20 мин) обеспечивают равномерное распределение легирующих элементов, измельчаются зерна аустенита. Закалка в масле и высокий отпуск при $T_{\text{отп}} = 450$ °C с длительной выдержкой (1 ч) обеспечивают получение мелкозернистого перлита. Энтропийные параметры структуры: $H = 17,4$ и $K_S = 0,0203$. Запас качества функциональных свойств структуры составляет 31,5 %. Потери информационной памяти в результате конфигурационных преобразований $-0,14$ ($-0,5$ %).

Нагрев 2-го образца и охлаждение на воздухе (нормализация) образуют равновесную структуру в результате распада аустенита в цементитную смесь – пластинчатый перлит. Нет обезуглероженного слоя. Энтропийные параметры структуры: $H = 14,5$ и $K_S = 0,1025$. Запас качества функциональных свойств структуры составляет 0,92 (4,4 %). Потери информационной памяти в результате конфигурационных преобразований 5,58 (26,6 %).

Нагрев и охлаждение 3-го образца в 12%-м водном растворе ПЗЖ при температуре раство-

ра 25 °С, отпуск при температуре 410 °С с выдержкой 25 мин образуют в структуре троостомартенсит 3...4 балла. Энтропийные параметры структуры: $H = 15,48$ и $K_S = 0,13$. Запас качества функциональных свойств структуры составляет 4,67 (20,8 %). Потери информационной памяти в результате конфигурационных преобразований 2,25 (10 %).

Нагрев и охлаждение в воде при температуре 45 °С 4-го образца создает мартенсит по всему сечению. Нет обезуглероженного слоя. Энтропийные параметры структуры: $H = 12,6$ и $K_S = 0,040$. Запас качества функциональных свойств структуры составляет 1,28 (7 %). Потери информационной памяти в результате конфигурационных преобразований 4,36 (23,9 %).

Нагрев и закалка 5-го образца в 12%-м водном растворе ПЗЖ при температуре раствора 25 °С привели к образованию в структуре мартенсита 6...7 баллов. Нет обезуглероженного слоя. Энтропийные параметры структуры: $H = 15,4$ и $K_S = 0,060$. Запас качества функциональных свойств структуры составляет 1,92 (8,6 %). Потери информационной памяти в результате конфигурационных преобразований 5,04 (22,5 %).

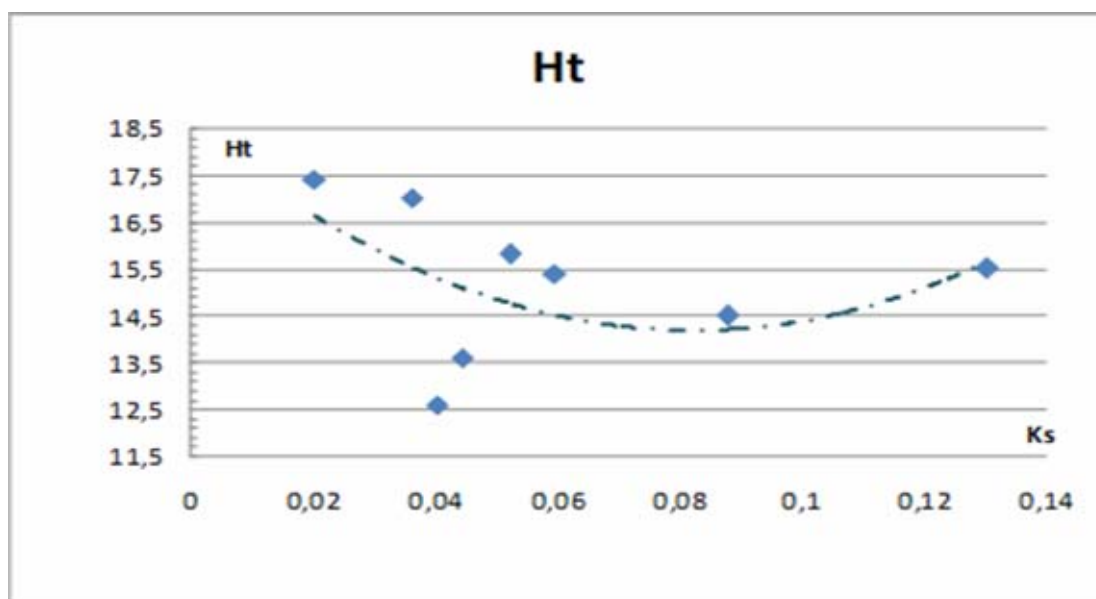
Нагрев и охлаждение 6-го образца в 6%-м водном растворе ПЗЖ при температуре раствора 55 °С образует неравновесную структуру: смесь мартенсита, сорбита и продуктов немартенситного распада. По краю зерна феррита, перлита, ферритная сетка по границам зерен. Энтропийные параметры структуры: $H = 13,6$ и $K_S = 0,044$. Запас качества функциональных

свойств структуры составляет 0,84 (4,3%). Потери информационной памяти в результате конфигурационных преобразований 5,21 (26,6 %).

Нагрев и длительная выдержка (35 мин) 7-го образца обеспечивает равномерное распределение легирующих элементов, измельчая зерна аустенита. Закалка в 11%-м водном растворе ПЗЖ при $T = 25$ °С создает смешанную структуру: мартенсит, троостит, пластинчатый перлит, мелкозернистый феррит. По краю крупнозернистый феррит, обезуглероженный слой равномерный по всей окружности глубиной до 0,7 мм. Энтропийные параметры структуры: $H = 17$ и $K_S = 0,036$. Запас качества функциональных свойств структуры составляет 7,47 (30,4 %). Потери информационной памяти в результате конфигурационных преобразований 0,12 (0,5 %).

Нагрев и охлаждение 8-го образца в 12%-м водном растворе ПЗЖ при температуре раствора 25 °С, среднем отпуске 250 °С при времени выдержки 75 мин образует в структуре троостит, пластинчатый перлит, мелкозернистый феррит, по краю крупнозернистый феррит, обезуглероженный слой по всей окружности прутка глубиной 0,4 мм. Энтропийные параметры структуры: $H = 15,84$ и $K_S = 0,052$. Запас качества функциональных свойств структуры составляет 3,6 (15,7 %). Потери информационной памяти в результате конфигурационных преобразований 3,46 (15 %).

Ниже на рисунке представлены изменения энтропийных параметров H_i и K_S , вызванных тепловыми и фазовыми превращениями структуры стали.



Взаимосвязь информации и энтропии при тепловых и структурных превращениях в стали
Relationship of information and entropy during thermal and structural transformations in steel

Состояния (1, 2, 5, 7, 8) связаны структурными превращениями аустенита в ферритно-цементитную смесь, при этом энтропия убывает с ростом упорядоченности. Металлическая система достигает равновесного состояния (2) при параметре порядка $K_S = 0,1025$ в результате процессов динамической самоорганизации. Структурный коэффициент преобразований состояний (1, 2, 5, 7, 8) $\alpha_{s1} = \Delta H / \Delta K_S = -26$. Распад мартенсита (4...6) в ферритно-цементитную смесь с достижением равновесного состояния (2) происходит в результате термодинамической самоорганизации, при этом энтропия достигает стационарного уровня $H = 14,5$ при параметре порядка $K_S = 0,1025$. При образовании троостита отпуска или троостомартенсита (3) продолжают процессы термодинамической самоорганизации при $K_S > 0,1025$, энтропия возрастает, тепловой коэффициент преобразований состояний (2, 4) $\alpha_t = \Delta H / \Delta K_S = 32$. При параметре порядка $K_S < 0,1025$ в структуре стали идут оба механизма самоорганизации; при $K_S > 0,1025$ в структуре стали происходят только процессы термодинамической самоорганизации. С помощью управляющих параметров можно изменять величину энтропии и параметр порядка для получения нужной структуры металлической системы.

Результаты влияния процентного содержания ПЗЖ в водном растворе закалочной среды на энтропийные параметры приведены в табл. 4.

Таблица 4. Влияние содержания водного раствора ПЗЖ на изменения энтропийных параметров H_t и K_S , %

Table 4. The influence of the content of the aqueous solution of the PZZH on changes in the entropy parameters of H_t and K_S , %

Режим т/о	4	5	6	7
р-р ПЗЖ, %	0	12	6	11
(T , °C)	(45 °C)	(25 °C)	(55 °C)	(25 °C)
H_t	12,6	15,4	13,6	17
K_S	0,0402	0,0596	0,0444	0,0361

Экстремальный характер изменения энтропии возникает в результате смены типа самоорганизации: переход от термодинамической при содержании 0...6 % ПЗЖ к динамической при содержании 11...12 % ПЗЖ. В интервале 0...11 % ПЗЖ величина упорядоченности практически неизменна, в то же время происходят заметные изменения энтропии. Противоположный случай наблюдается между состояниями структур 3-го и 5-го образцов: энтропии практически совпадают, однако параметры порядка, баллы, запас

информационной памяти структуры различаются в два раза.

Заключение и выводы

Характер изменения энтропии свидетельствует о качестве организации и резервах управления открытой системой. Метод позволяет оценить запас качества функциональных свойств и его распределение по объему образца.

В результате термообработки возникают фазовые и тепловые превращения в структуре стали, изменяющие запись функционального качества свойств в матрице информационной памяти структуры.

Запас функционального качества свойств структур 1-го и 7-го образцов в информационной памяти составляет 30...32 %, что делает приведенные режимы термообработки перспективными к использованию для повышения срока эксплуатации изделий.

Запас качества функциональных свойств структур 3-го и 8-го образцов в информационной памяти составляет, соответственно, 21 и 16 %.

Самый низкий запас функционального качества свойств в информационной памяти структуры сталей режимов термообработки 2-го и 6-го образцов (4 %).

Режимы термообработки 4-го и 5-го образцов обеспечивают запас качества 7...9 %.

Библиографические ссылки

1. Хакен Г. Информация и самоорганизация. М. : Мир, 1991. 240 с.
2. Встовский Г. В., Колмаков А. Г., Бунин И. Ж. Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов. Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, 2001. 116 с.
3. Бриллюэн Л. Научная неопределенность и информация. М. : КомКнига, 2006. 272 с.
4. Титов А. В. Влияние режимов термической обработки на микроструктуру пружин ответственного назначения из стали 60С2А и титанового сплава ВТ16 // Металлообработка. 2015. № 5 (89). С. 43–49.
5. Большаков В. И., Дубров Ю. И., Жевтило Е. Ю. Информационная энтропия как средство оценки качества металла // Вісник ПДАБА До 80-річчя Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2010. № 1. С. 49–55.
6. Большаков В. И., Дубров Ю. И., Жевтило Е. Ю. Исследования работоспособности и эффективности эмпирического прогнозирования качественных характеристик стали на предпроектной стадии её проектирования // Доп. НАН України. 2009. № 9. С. 103–106.
7. Синергетика и фракталы в материаловедении / В. С. Иванова, А. С. Баланкин, И. Ж. Бунин, А. А. Оксогоев. М. : Наука, 1994. 383 с.

8. Vstovsky V., Bunin I. Multifractal parametrization of structures in material science, *J. Advanced Materials*, 1994, 1, 230-240.

9. Встовский Г. В. Элементы информационной физики. М. : МГИУ, 2002. 260 с.

10. Белых В. В., Муравьев В. В., Степанов В. А. Применение обобщенного распределения Парето для определения структурных параметров графита в чугунах // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2019. Т. 22, № 1. С. 52–61. DOI 10.22213/2413-1172-2019-1-52-61.

11. Воробьев В. Л. Термодинамические основы диагностики и надежности микроэлектронных устройств. М. : Наука, 1989. 159 с.

12. Климонтович Ю. Л. Критерии относительной степени упорядоченности открытых систем // Успехи физ. наук. 1996. Т. 166, № 11. С. 1231–1243.

13. Климонтович Ю. Л. Введение в физику открытых систем. М. : Янус-К, 2002. 284 с.

14. Фрактальный анализ рентгенограмм / В. П. Иванников, В. Г. Суфиянов, В. В. Белых, В. А. Степанов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2009. № 3. С.150–154.

References

1. Haken G. *Informatsiya i samoorganizatsiya*. [Information and self-organization]. Moscow, Mir Publ., 1991, 240 p. (in Russ.).

2. Vstovsky G.V., Kolmakov A.G., Bunin I.Zh. *Vvedeniye v mul'tifraktal'nyuyu parametrizatsiyu struktur materialov* [Introduction to multifractal parameterization of material structures]. Izhevsk, Regul'yarnaya i khaoticheskaya dinamika Publ., 2001, 116 p.(in Russ.).

3. Brillouin L. *Nauchnaya neopredelennost' i informatsiy* [Scientific uncertainty and information]. Moscow, KomKniga Publ., 2006, 272 p. (in Russ.).

4. Titov A.B. [Influence of heat treatment on the microstructure of critical springs made of 60C2A steel and VT16 titanium alloy]. *Metalloobrabotka*, 2015, no. 5, pp. 43-49 (in Russ.).

5. Bolshakov V.I., Dubrov Yu.I., Zhevtilo E.Yu. [Information entropy as a means of assessing the quality of metal]. *Visnik PDABA Do 80-pichchya Pridniprovs'koï derzhavnoi akademii' budivnitsva ta arkhitekturi*, 2010, no. 1. pp. 49-55 (in Russ.).

6. Bolshakov V.I., Dubrov Yu.I., Zhevtilo E.Yu. [Studies of the health and effectiveness of empirical forecasting of the qualitative characteristics of steel at the pre-design stage of its design]. *Doklady NAN Ukrainy*, 2009, no. 9, pp. 103-106 (in Russ.).

7. Ivanova V.S., Balankin A.S., Bunin I.Zh., Oхogoev A.A. *Sinergetika i fraktaly v materialovedenii* [Synergetics and fractals in materials science]. Moscow, Nauka Publ., 1994, 383 p. (in Russ.).

8. Vstovsky V., Bunin I. Multifractal parametrization of structures in material science. *J. Advanced Materials*, 1994, 1, 230-240.

9. Vstovsky G.V. *Elementy informatsionnoy fiziki* [Elements of Information Physics]. Moscow, MGIU Publ., 2002, 260 p. (in Russ.).

10. Belykh V.V., Muravyov V.V., Stepanov V.A. [Application of the generalized Pareto distribution to determine the structural parameters of graphite in cast iron]. *Vestnik IzhSTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2019, vol. 22, no. 1, pp. 52-61 (in Russ.). DOI 10.22213 / 2413-1172-2019-1-52-61

11. Vorobyov V.L. *Termodinamicheskiye osnovy diagnostiki i nadezhnosti mikroelektronnykh ustroystv* [Thermodynamic principles of diagnostics and reliability of microelectronic devices]. Moscow, Nauka Publ., 1989, 159 p. (in Russ.).

12. Klimontovich Yu.L. [Criteria of a relative degree of ordering of open systems]. *Physics-Uspekhi*, 1996, vol. 166, no. 11, pp. 1231-1243 (in Russ.)

13. Klimontovich Yu.L. *Vvedeniye v fiziku otkrytykh sistem* [Introduction to the physics of open systems]. Moscow, Janus-K Publ., 2002, 284 p. (in Russ.)

14. Ivannikov V.P., Sufiyarov V.G., Belykh V.V., Stepanov V.A. [Fractal analysis of radiographs]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2009, vol. 3, pp. 150-154 (in Russ.).

Entropy Assessment of the Quality and Resource of the Steel Structure Functional Properties

V.V. Belykh, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

V.V. Murav'ev, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

V.A. Stepanov, PhD in Engineering, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

When conducting a metallographic metal analysis, difficulties arise in the invariant reproduction of its structure, since a variety of images are observed for the same metal, creating uncertainty in the identification of the structure. The paper presents the information parameters of the entropy model obtained due to the multifractal parameterization of heat-treated steel 60C2A. Estimates of the structure quality and resource of the functional properties are derived, the heat treatment mode is carried out, which ensures the optimal structure of 60C2A steel. The control parameters of the heat treatment mode were various compositions and temperatures of the quenching medium, and the tempering temperature.

Three groups of structural states of heat-treated steel are distinguished according to the "randomness norm" of the behavior for active structural elements relative to the equilibrium state of steel:

- the first group: a significant increase in entropy $H_t = 17$ with an insignificant value of the order parameter $KS = 0.02...0.04$; stock of information memory 30...32 %;

- second group: a slight change in entropy $H_t = 15.5...15.8$; order parameter $KS = 0.05...0.13$; stock of information memory 16...21 %;

- third group: entropy reduction $H_t = 12.6...13.6$ with a constant order parameter $KS = 0.04$; stock of information memory 4...7 %.

The extreme nature of the change in entropy from the concentration of the aqueous solution of the PZZh quenching medium is observed. The extreme nature of the entropy change originates from a change in the type of self-organization: the transition from thermodynamic at a content of 0...6 % of the PZZh to the dynamic at a content of 11...12 % of the PZZh. In the interval 0...11 % of the PZZh, the order parameter is practically unchanged; at the same time, noticeable changes in entropy occur. The results of studying the entropy model of the structure of heat-treated steel 60C2A allow us to conclude that it is possible to create a classification table of steel structural states based on information entropy and the order parameter, to estimate the reserve of quality information memory and functional properties of the structure for forecasting operation reliability.

Keywords: steel, hardening, tempering, entropy, ordering, multifractal.

Получено 29.04.2020

Образец цитирования

Белых В. В., Муравьев В. В., Степанов В. А. Использование информационной энтропии структуры стали для определения качества и ресурса ее функциональных свойств // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2020. Т. 23, № 3. С. 15–24. DOI: 10.22213/2413-1172-2020-3-15-24.

For Citation

Belykh V.V., Murav'ev V.V., Stepanov V.A. [Entropy Assessment of the Quality and Resource of the Steel Structure Functional Properties]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2020, vol. 23, no. 3, pp. 15-24 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2020-3-15-24.