

**НОВЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА И ОЦЕНКИ ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРЫ  
МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ.**

**Е. Я. Лезинская** к.т.н., В. С. Вахрушева д. т. н. , проф.

*ГВУЗ «Приднепровская государственная академия  
строительства и архитектуры»*

**Введение.** Известно, что практически все физико–механические свойства металлических материалов зависят в той или иной мере от их внутреннего строения, т.е. от структуры. В первую очередь это количество структурных составляющих, их форма и размеры. Для однофазных материалов – это форма и размеры зерен. Распределение размеров зерен в объеме того или иного изделия является важнейшей характеристикой степени однородности его свойств, а, следовательно, стабильности работы изделия в условиях эксплуатации и надежности всей конструкции в целом.

Целью настоящей публикации является желание на популярном уровне ознакомить более широкие круги исследователей с подходами в оценке зеренной структуры, которые выработаны в последние годы. Основная роль в этих исследованиях принадлежит Е.Я. Лезинской, практически все исследования выполнены во время ее работы в Государственном трубном институте (ВНИТИ) при разработке технологии изготовления труб особо ответственного назначения из новых конструкционных материалов, применяемых для атомной энергетики, приборостроения и криогенной техники.

**Результаты исследований.** Важнейшим параметром однофазной структуры сталей и сплавов является величина зерна аустенита или феррита. При всей важности знания этого параметра определение величины зерна осложнено двумя причинами:

- Непрозрачностью объектов измерения;
- Несовершенством методов определения величины зерна.

Современные методы оценки зеренной структуры регламентированы целым рядом стандартов, применяемых в промышленно развитых странах:

- американский ASTM E 112,
- шведский SIS 11 11 10,
- итальянский UNI 3245,
- французский NF A04-102,
- немецкий DIN 50601,
- российский ГОСТ 5639,
- I S O 643 -международного общества стандартизации.

Имеются также стандарты для определения величины зерна цветных металлов:

ГОСТ 21073.0-75, ГОСТ 21073.4-75.

Все стандарты построены на принципах оценки элементов структуры на плоском срезе методом применения ступенчатых шкал и эталонов (фотообразцов), что предопределяет ряд общих недостатков:

- Условность единиц измерения – номеров, что вызывает определенные сложности при переводе этих единиц в общепринятые мм, в конструкторских расчетах.

- Невозможность оценить разнотельность зеренной структуры, присущей всем однофазным высоколегированным сталям и сплавам.

- Невозможность оценки пространственной структуры изделия.

Все действующие стандарты построены на принципах оценки зеренной структуры на плоском срезе методом применения ступенчатых шкал, где каждому номеру зерна  $G$  соответствует:

- Для стандарта ASTM E 112 количество зерен  $N_k$  на площади в 1 квадратный дюйм в соответствии с выражением:

$$N_a = 2^{(G-1)} \text{ шт/дюйм}^2.$$

- Для ГОСТ 5639 (стали и сплавы) количество зерен  $m$  на площади 1 мм<sup>2</sup>, изменяющееся в геометрической прогрессии, в соответствии с выражением:

$$m = 8 \times 2^G \text{ шт/мм}^2$$

Для ГОСТ 21073.4-75(цветные металлы), где основные показатели величина зерна (номер зерна, средний и средний условный размер зерна, средняя площадь сечения зерна и среднее количество зерен на 1 мм<sup>2</sup> площади зерна) совпадают с показателями ГОСТ 5639.

Общим недостатком всех существующих в настоящее время стандартных методов оценки зеренной структуры металлов и сплавов является определение лишь средних размеров зерна на плоском срезе, т.е. отсутствие информации о пространственной структуре и степени ее однородности.[1]

Попытка ввести в ГОСТ 5639 методы определения разнотельности привела к ошибочной трактовке, этого понятия, поскольку за однородную структуру авторы принимают структуру, соответствующую одному из эталонных шкалы. При этом авторы забывают, что каждый эталон шкалы, представляющий плоский срез структуры, уже содержит определенную разнотельность. Это объясняется тем, что совершенно однородная в объеме структура дает на случайном плоском срезе 28% зерен других (меньших) размеров.

В основу всех действующих стандартов положена кубическая плотноупакованная модель зерна. Стандартный ряд построен для плоского сечения кубической модели, в которой число объектов в единице площади расположено в виде возрастающей геометрической прогрессии. Для ASTM E 112 показатель прогрессии  $q = \sqrt{2}$ , а для европейских стандартов (ГОСТ, DIN, ISO)  $q = 2$ . При этом плоскость сечения параллельна грани кубика и объекты плоского сечения представляют квадраты. Такой метод построения стандарта применен в английской системе мер (ASTM E 112) и метрической (DIN 50601, ISO 643, ГОСТ5639 и др.). Каждому элементу стандартного ряда присваивается определенный номер. В таблице 1 для сравнения приведены стандартные ряды основных действующих стандартов для оценки структуры.

Стандартный ряд включает:

Для ASTM - 30 позиций от 0,25 до 8192,00 зерен в 1 кв. дюйме (3,88-126976,3 зерен в 1 кв.мм).

## Строительство, материаловедение, машиностроение

Для ГОСТ - 18 позиций от 1 до 131072 зерен в 1 кв.мм.

Для DIN и ISO - 24 позиции от 0.0625 до 1084576 зерен в 1 кв.мм

Каждой позиции стандарта присвоен номер, который называется баллом или номером зерна. В ASTM E 112 номера меняются с шагом 0,5, в европейских стандартах – с шагом 1. Для гармонизации в европейских стандартах введены также и отрицательные номера. Кроме того, в европейских стандартах для каждого номера установлены границы, в пределах которых любое количество зерен в единице площади относится к этому номеру. В американском стандарте эти границы отсутствуют.

Таблица 1.

Стандартные ряды для оценки структур

ASTM E-112			ГОСТ 5639		DIN 50601		ISO 0643	
Номер зерна	Число зерен в единице площади		Номер зерна	Число зерен в единице площади, шт/мм <sup>2</sup>	Номер зерна	Число зерен в единице площади, шт/мм <sup>2</sup>	Номер зерна	Число зерен в единице площади, шт/мм <sup>2</sup>
	кв. дюйм <sup>*)</sup>	кв.мм <sup>**)</sup>						
					-7	0,0625	-7	0,0625
					-6	0,125	-6	0,125
					-5	0,25	-5	0,25
					-4	0,50	-4	0,50
			-3	1	-3	1	-3	1
			-2	2	-2	2	-2	2
00	0,25	3,88	-1	4	-1	4	-1	4
0	0,50	***7,75	0	8	0	8	0	8
1,0	1,00	15,50	1	16	1	16	1	16
2,0	2,00	31,00	2	32	2	32	2	32
3,0	4,00	62,00	3	64	3	64	3	64
4,0	8,00	124,00	4	128	4	128	4	128
5,0	16,00	248,00	5	256	5	256	5	256
6,0	32,00	496,00	6	512	6	512	6	512
7,0	64,00	999,00	7	1024	7	1024	7	1024
8,0	128,00	1984,0	8	2048	8	2048	8	2048
9,0	256,00	3968,0	9	4096	9	4096	9	4096
10,0	512,00	7936,0	10	8192	10	8192	10	8192
11,0	1024,00	15872,0	11	26384	11	26384	11	26384
12,0	2048,00	31744,1	12	32768	12	32768	12	32768
13,0	4096,00	63488,1	13	65536	13	65536	13	65536
14,0	8192,00	126976,3	14	131072	14	131072	14	131072
					15	282144	15	282144
					16	524288	16	524288
					17	1084576	17	1084576

**Примечание.**

Для стандарта ASTM E 112 приведены только целые номера

\*) при увеличении 100 (\*100);

\*\*) при увеличении 1 (\*1);

\*\*\*) В одном квадратном дюйме содержится 645,16 мм<sup>2</sup>.

Для номера 0 при увеличении \*100 содержится 0,5 зерна, что при переводе в метрическую систему составляет  $\frac{0,5 \cdot 100 \cdot 100}{645,16} = 7,75$  шт/мм<sup>2</sup>. Таким же

образом считается число зерен в единице площади метрической меры для позиций ASTM.

Линейной мерой зерна на плоском срезе кубической модели является сторона элементарного квадрата, которую называют «диаметром». Средняя величина «диаметра» для европейских стандартов определяется формулой:

$$\bar{d}_m = \frac{1}{\sqrt{m_{ном}}}, \text{ мкм},$$

где  $m_{ном}$  - номинальное число зерен в единице площади.

Для американского стандарта:

$$\bar{d} = \frac{254}{\sqrt{N_A}}, \text{ мкм},$$

где  $N_A$  - число зерен в 1 кв. дюйме.

«Диаметры» зерен плоского среза приведены в таблицах всех стандартов. В числовых характеристиках стандартного ряда приводятся также средняя площадь зерна  $\bar{a}$ , среднее значение  $\bar{l}$  (средний условный диаметр в ГОСТ 5639 или среднее пересечение в ASTM E 112), среднее число зерен в единице объема  $N_V$  шт/мм<sup>3</sup>. Наиболее важными из всех приведенных характеристик являются «диаметр» зерна плоского среза и число зерен в единице объема  $N_V = m^{\frac{3}{2}}$ . В таблице 2 приведены эти характеристики для всех стандартов в метрической системе мер.

Во всех действующих стандартах оценка структуры ведется по случайному плоскому срезу, который неадекватно отображает трехмерное строение материала. Каждая размерная группа зерен в объеме вносит в структуру плоского среза набор элементов размерами от 0 до максимального этой группы, что искажает количественные структурные характеристики и, естественно, их реальную связь со свойствами материала.

Таким образом, главным недостатком действующих стандартов является оценка структуры по плоскому срезу и средним значениям «диаметров», что не несет никакой информации для характеристики физического состояния сплава. Этот факт отмечен в американском стандарте, но о нем ни слова не сказано в отечественном стандарте.

Другие недостатки действующих стандартов – «балловый» метод оценки параметров зеренной структуры, а также необоснованные пределы каждого номера и неправомерная оценка разнотерности в ГОСТ 5639. В частности, если стандарт ASTM E 112 позволяет оценивать средний диаметр зерен только в образцах «...с одинаково распределенной формой зерна, площадей, диаметров и поперечных длин», т.е. с достаточно однородной структурой (см. рис. 1а), то ГОСТ 5639 необоснованно расширяет возможности оценки, распространяя их на разнотерные структуры (см. рис. 1б).

Основные характеристики стандартных рядов

ASTM E-112			ГОСТ 5639		DIN 50601			ISO 643			
Номер зерна	Диаметр плоского среза, мкм	Число зерен в единице объема, шт/мм <sup>3</sup>	Номер зерна	Диаметр плоского среза, мкм	Число зерен в единице объема, шт/мм <sup>3</sup>	Номер зерна	Диаметр плоского среза, мкм	Число зерен в единице объема, шт/мм <sup>3</sup>	Номер зерна	Диаметр плоского среза, мкм	Число зерен в единице объема, шт/мм <sup>3</sup>
						-7	4000,0	0,016	-7	4000,0	0,016
						-6	2828,4	0,044	-6	2828,4	0,044
						-5	2000,0	0,125	-5	2000,0	0,125
						-4	1414,2	0,354	-4	1414,2	0,354
			-3	1000,0	1	-3	1000,0	1	-3	1000,0	1
			-2	707,1	2,8	-2	707,1	2,8	-2	707,1	2,8
00	507,7	7,64	-1	500,0	8,0	-1	500,0	8,0	-1	500,0	8,0
0	359,2	21,6	0	353,6	22,6	0	353,6	22,6	0	353,6	22,6
1,0	254,0	61,0	1	250,0	64,0	1	250,0	64,0	1	250,0	64,0
2,0	179,6	172,6	2	176,8	181,0	2	176,8	181,0	2	176,8	181,0
3,0	127,0	488,2	3	125,0	512,0	3	125,0	512,0	3	125,0	512,0
4,0	89,8	1381	4	88,4	1448	4	88,4	1448	4	88,4	1448
5,0	63,5	3906	5	62,5	4096	5	62,5	4096	5	62,5	4096
6,0	44,9	11046	6	44,2	11585	6	44,2	11585	6	44,2	11585
7,0	31,8	31244	7	31,3	32768	7	31,3	32768	7	31,3	32768
8,0	22,5	88372	8	22,1	92682	8	22,1	92682	8	22,1	92682
9,0	15,9	249953	9	15,6	262144	9	15,6	262144	9	15,6	262144
10,0	11,2	06972	10	11,0	741485	10	11,0	741485	10	11,0	741485
11,0	7,9	1999620	11	7,8	2097152	11	7,8	2097152	11	7,8	2097152
12,0	5,6	5655806	12	5,5	5931008	12	5,5	5931008	12	5,5	5931008
13,0	4,0	15996398	13	3,9	16777216	13	3,9	16777216	13	3,9	16777216
14,0	2,8	45246397	14	2,8	47453133	14	2,8	47453133	14	2,8	47453133
						15	2,0	134217728	15	2,0	134217728
						16	1,4	379625063	16	1,4	379625063
						17	1,0	1073741824	17	1,0	1073741824

**Примечание.** \*Интервал размеров зерен стандартных рядов: ASTM E-112: 507,7 мкм – 2,8мкм; ГОСТ 5639: 1000 мкм – 2,8 мкм; DIN 50601: 4000 мкм – 1,0 мкм; ISO 643: 4000 мкм – 1,0 мкм.

Однако, сама формулировка понятий однородной и разноразмерной структуры, приведенная в п. 3.3.6 ГОСТ 5639, является ошибочной. Кроме того, сам метод оценки разноразмерности с помощью условных номеров не имеет физического смысла, т.к. структура каждого номера на плоском сечении уже содержит определенную разноразмерность.

На основании проведенного анализа установлено, что:

Стандарт ГОСТ5639, за исключением метода хорд совершенно не учитывает реального распределения характеристик зерна (хорды, диаметр плоского

среза, диаметр в объеме), а, следовательно, его применение для оценки изделий ответственного назначения, в которых величина зерна является основным показателем качества, нецелесообразна на что указывает в своей книге С. А. Салтыков: “Стандартизированные методы металлографического анализа... в большинстве случаев являются полуколичественными методами балловой оценки. Важнейшим недостатком является ее субъективность, обусловленная этим низкая точность и надежность”[2]

Невозможность достоверно судить о разнородности металла готовых изделий по ГОСТ 5639 ограничивает его применение для целого ряда новых жаропрочных и коррозионностойких сплавов, склонных к разнородности.

Всеобъемлющей объективной оценкой зеренной структуры металлов и сплавов обладает функция распределения трехмерных объектов и ее количественные характеристики, которые могут быть реализованы с применением стереологической реконструкции видимого на плоскости шлифа изображения реальной структуры и компьютерных методов обработки первичной информации [1,3].

аб

**Рис. 1.** (а, б) Микроструктура стали: а – однородная (х 200); б – разнородная (х 100)

Наиболее корректной оценкой разнородности зеренной структуры является определение коэффициента вариации распределения размеров зерен, видимых на плоском срезе (шлифе) [3].

С целью совершенствования указанного стандарта разработан новый метод количественной оценки параметров пространственной зеренной структуры по ее плоскому изображению на шлифе. На его базе создана система анализа изображений, включающая пакет структурного анализа “Structure 2001”[4], который обеспечивает получение следующих основных характеристик пространственной зеренной структуры по ее плоскому изображению, видимому в микроскопе, либо на микрофрактографии:

- количество зерен в единице площади и объема;
- максимальный и средний диаметры зерен в объеме в мкм.;
- численные и графические распределения хорд и диаметров зерен плоского среза и диаметров зерен в объеме;
- площади и периметры всех исследуемых зерен;
- фактор формы и показатель асимметрии зеренной структуры;

## Строительство, материаловедение, машиностроение

- номер зерна по ГОСТ 5639 ASTM E 112.

Основным преимуществом разработанного метода является возможность оценки разнородности исследуемой структуры с помощью общепринятого для оценки неоднородности системы коэффициента вариации распределений зерен в объеме. При этом все указанные параметры определяют в общепринятых единицах измерения, что позволит более точно производить конструкторские расчеты прочности новых материалов, т.к. не требует перевода условных номеров в общепринятые единицы измерения, привносящего большую погрешность в расчеты.

В таблице 3 приведены данные оценки фотообразцов номеров стандарта ГОСТ 5639 с помощью “Structure 2001” и данные для усовершенствования оценки структуры, в которой в качестве номера зерна принята величина диаметра зерна в объеме монодисперсной системы сфер, в которой отсутствует разнородность, а не количество зерен в виде кубиков в  $1 \text{ мм}^2$ , как это принято в ГОСТ5639. Такой подход позволит четко оценивать разнородность материала по коэффициенту вариации распределения зерен по размерам.

Таблица 3.

*Модернизация стандарта ГОСТ 5639 «Методы выявления и определения величины зерна»*

№ п/п	Номер зерна по ГОСТ 5639	Количество зерен в единице объема, шт/мм <sup>3</sup>	Стандартные размеры зерен в объеме			Размеры сечений на плоскости			Размеры хор на линии		
			диаметр D, мкм	ср.кв. откл. $\sigma_D$ , мкм	коэф. вар. $K_D$	диаметр d, мкм	ср.кв. откл. $\sigma_d$ , мкм	коэф. вар. $K_d$	длина l, мкм	ср.кв. откл. $\sigma_l$ , мкм	коэф. вар.
1	-3	1	1240,7	0	0	974,4	276,9	0,2842	815,1	293,5	0,36
2	-2	2,8	877,3	0	0	689,0	195,8	0,2842	576,4	207,5	0,36
3	-1	8,0	620,4	0	0	487,2	138,8	0,2842	407,6	146,7	0,36
4	0	22,6	428,8	0	0	344,5	97,9	0,2842	288,2	103,8	0,36
5	1	64,0	310,2	0	0	243,6	69,2	0,2842	203,8	73,4	0,36
6	2	181,0	219,3	0	0	172,3	49,0	0,2842	144,1	51,9	0,36
7	3	512,0	155,1	0	0	121,8	34,6	0,2842	101,9	36,7	0,36
8	4	1448	109,7	0	0	86,1	24,5	0,2842	72,1	25,9	0,36
9	5	4096	77,5	0	0	60,9	17,3	0,2842	50,9	18,3	0,36
10	6	11585	54,8	0	0	43,1	12,2	0,2842	36,0	13,0	0,36
11	7	32768	388,8	0	0	30,5	8,7	0,2842	25,5	9,2	0,36
12	8	92682	27,4	0	0	21,5	6,1	0,2842	18,0	6,5	0,36
13	9	262144	19,4	0	0	15,2	4,3	0,2842	12,7	4,6	0,36
14	10	741485	13,7	0	0	10,8	3,1	0,2842	9,0	3,2	0,36
15	11	2097152	9,7	0	0	7,6	2,2	0,2842	6,4	2,3	0,36
16	12	5931008	6,9	0	0	5,4	1,5	0,2842	4,5	1,6	0,36
17	13	16777216	4,8	0	0	3,8	1,1	0,2842	3,2	1,1	0,36
18	14	47453133	3,4	0	0	2,7	0,8	0,2842	2,2	0,8	0,36

Получение коэффициента вариации в исследуемой структуре равным на плоскости – 0,28 или на линии – 0,36 свидетельствует об однородности структуры в объеме, а чем больше будет отличаться значение этой величины от выше указанных, тем больше разнородность в объеме исследуемой структуры.

Доказано, что с учетом реальной формы зерен изотропных структур однофазной стали применение сферической, вместо кубической, и их реконструкционной структуры достаточно корректно [1].

Распределение размеров зерен в объеме изделия является важнейшей характеристикой дисперсности и однородности, а следовательно стабильности свойств изделия при эксплуатации, а также надежности всей конструкции в целом. Исходной информацией структуры является специально обработанный плоский срез (шлиф), косвенно изображающий пространственное строение материала, характеристику которого можно получить методом стереологической реконструкции.

Все методы стереологической реконструкции по ее изображению сводятся к решению интегрального уравнения, характеризующего вероятностную связь параметров отображения и истинных размеров круговых или сферических элементов статистической совокупности.[5]

Для количественной оценки объемной структуры металла по заданным характеристикам плоского среза разработан новый метод реконструкции,[4] в основу которого положено:

1. плотноупакованная структура выпуклых равноосных многогранников моделируется системой непересекающихся сфер, случайно расположенных в пространстве.
2. вероятностной мерой, единственным образом определяющей геометрические характеристики любого объекта статической совокупности, является положение секущего элемента относительно центра объекта.

Функциональные связи параметров пространственной структуры с характеристиками ее изображения на плоскости получены на основании выбора единой меры геометрических вероятностей – равновероятности положения случайного сечения относительно центра сферы или круга, составляющих статистическую совокупность объектов структуры.

Использование принципа равновероятности секущих элементов относительно центров рассекаемых объектов на плоскости и в объеме, а также применение условий суперпозиции в системах объектов, позволяет реконструировать структуру как на переходе от линии к плотности, так и при переходе от плоскости к объему.

Установление связи обобщающих характеристик реконструированной трехмерной структуры со свойствами материала позволит впоследствии более квалифицированно определить режимы термической обработки материала для получения необратимого качества изделия.

В соответствии с теорией стереологической реконструкции разработана компьютерная программа структурного анализа [6] в режимах которой выполняется:



## Строительство, материаловедение, машиностроение

- ввод исходного изображения структуры плоского среза методом сканирования фотографии шлифа либо из буфера обмена после оцифрованного фотографирования увеличенного микроскопом изображения плоского среза,

- вырезание карточки области положения и размеры которого наиболее точно характеризует структуру плоского среза,

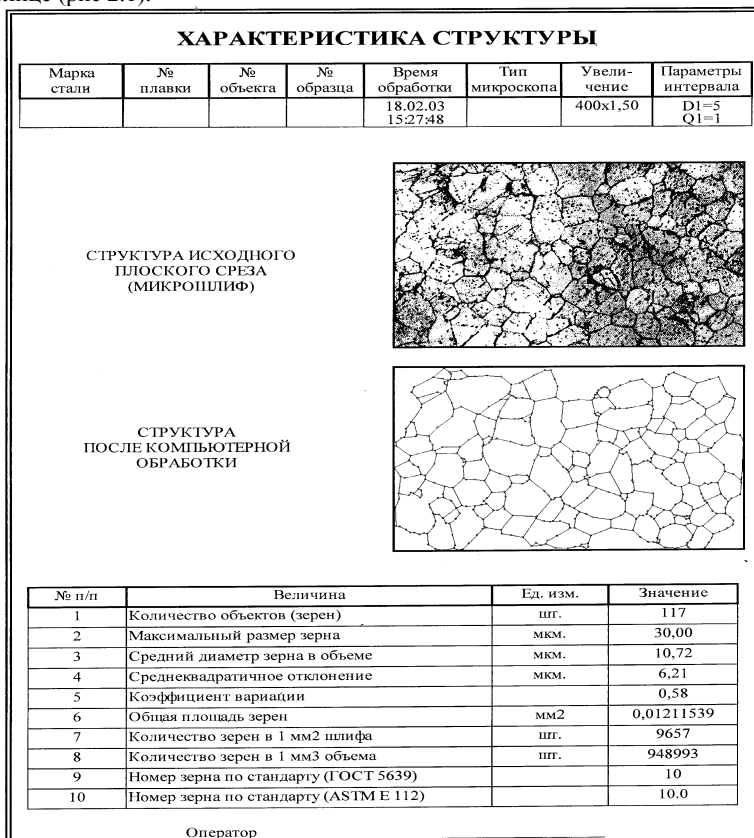
- оптическое распознавание границ объектов выбранной области,

- структурный анализ и реконструкция соответствующего изображения,

- формирование отчетной документации.

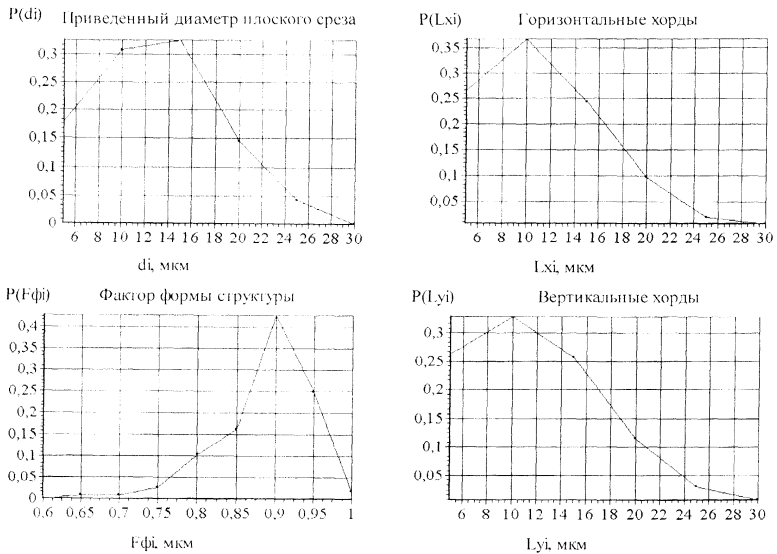
На рисунках 2.1, 2.2, 2.3 приведены примеры результатов компьютерной обработки и реконструкции структуры сплава Zr-1Nb после термической обработки.

Сертификат включает (рис 2.1) характеристику структуры металла после обработки первичного среза. Рассчитываемые характеристики представлены в таблице (рис 2.1).



**Рис 2.1.** Характеристика структуры.

СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ  
ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА СТРУКТУРЫ



Параметры первичной обработки

№ п/п	Параметр	Ед. изм.	Значения	Ср. кв. откл.	Коефф. вариации
1	Площадь объектов	мкм.2	106,27	96,77	0,91
2	Периметр объектов	мкм.	36,26	19,28	0,53
3	Приведенный диаметр объектов	мкм.	10,32	5,37	0,52
4	Максимальный приведен. диаметр объекта	мкм.	23,02		
5	Фактор формы		0,86	0,06	0,07
6	Количество объектов плоского среза	шт.	117		
7	Число секущих линий	шт.	400		
8	Угол наклона секущей к оси OX	°	0		
9	Количество отрезков в пересечениях с границами зерен	шт.			
	- горизонтальные		5602		
	- вертикальные		3526		
10	Лишней размеры пересечений	мкм.			
	- горизонтальные		8,76	5,25	0,60
	- вертикальные		9,22	5,59	0,61
11	Максимальная хорда	мкм.	29,42		
12	Коеффициент асимметрии		0,95		
13	Количество интервалов	шт.	6		

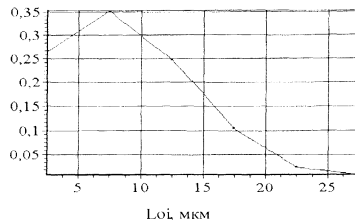
Рис 2.2. Структурный анализ металлических образцов.

РЕКОНСТРУКЦИЯ СТРУКТУРЫ

1. Линейные пересечения границ зерен плоского среза (исходные данные по хордам)

Общее количество пересечений, шт	9128
Средний размер хорды, мкм	8,94
Среднеквадратичное отклонение, мкм	5,39
Коэффициент вариации	0,60
Модальный размер, мкм	7,5

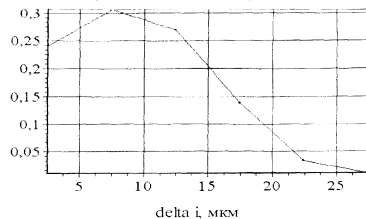
P(L<sub>0i</sub>) Распределение хорд плоского среза



2. Реконструкция структуры плоского среза

Средний диаметр плоского среза, мкм	9,75
Среднеквадратичное отклонение, мкм	5,79
Коэффициент вариации	0,59
Модальный размер, мкм	7,5

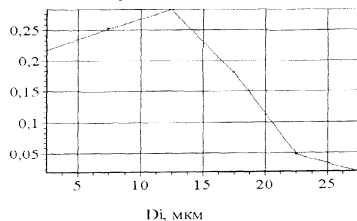
P(delta i) Распределение diam. зерен плоского среза



3. Реконструкция структуры в объеме

Средний диаметр зерна в объеме, мкм	10,72
Среднеквадратичное отклонение, мкм	6,21
Коэффициент вариации	0,58
Модальный размер, мкм	12,5

P(D<sub>i</sub>) Распределение диаметров в объеме



**Рис.2.3.** Результаты компьютерной обработки и реконструкции структуры сплава Zr-1 Nb после термической обработки

Далее приводятся некоторые статистические характеристики первичной обработки:

- средняя площадь плоскости зерна;
- средний периметр границ;
- средний приведенный диаметр кругов плоского среза и соответствующие этим величинам характеристики.

Реконструкция структуры (рис 2.3.) произведена на основании объединенной статической совокупности хорд плоского среза. При этом максимальное значение диаметра кругов плоского среза  $\delta_{max}$  и диаметр сфер в объеме  $D_{max}$  равны максимальному размеру хорды  $l_{max}$ , в результате реконструкции получаем распределение диаметра зерен плоского среза  $p(\delta_i)$  коэффициент

вариации. Далее на базе исходных данных распределение диаметра зерен плоского среза устанавливаем распределение диаметра зерен в объеме  $p(D_i)$ .

Таким образом, выполнен всеобъемлющий количественный анализ структуры металла, показывающий что любое сечение случайной плоскостью или линией измельчает структуру и увеличивает разнородность.

Главным результатом количественной оценки структуры металлов и сплавов является распределение диаметров сфер в трехмерном пространстве, а также числовые характеристики этого распределения, характеризующие количество монодисперсных структур в объеме, средние значения диаметров зерен во всем объеме статистической совокупности отклонение от среднего и коэффициент вариации, определяющий разнородность. Кроме основных характеристик положения возможно определение моментов распределения высших порядков на всех этапах реконструкции.

По результатам выполненных работ готовится проект нового стандарта .

#### **Заключение:**

Выполнен сравнительный анализ стандартных методов оценки размеров зерен в соответствии со стандартами ASTM, ГОСТ, DIN и др.

Показаны недостатки в существующих стандартах методов оценки величины (размеров) зерен в реальных изделиях.

Предложены новые подходы и методы оценки зеренной структуры. Создана компьютерная программа “Structure 2001, позволяющая количественно оценить структуру металлов и сплавов, производить реконструкцию в том числе в трехмерном пространстве. Разрабатывается проект нового стандарта.

#### **Список использованных источников литературы:**

1. Лезинская Е.Я. Стереометрическая металлография. – Днепропетровск «Экономика» 2013, - 298с.
2. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. – М.Металлургия, 1976, - 271с.
3. Лезинская Е.Я. и др. Новый метод реконструкции зеренной структуры по плоскому срезу. Сообщение2/ Теория и практика металлургии.-№6.-2007.
4. Патент Украина № 77135 Способ определения основных параметров структуры металла. Бюл. «Промышленная собственность» - №10. 16.10ю2006.
5. Чернявский К.С. Стереология в металловедении. – М.; Metallurgia, 1977. – 279 с.
6. Компьютерная программа “Structure 2001“. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 15773 від 20.02.06, Бюл. ДДІВ «Авторське право та суміжні права» №9,2006.