

## МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СТРУКТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ МЕТАЛЛА ТРУБ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛ И ЧЕХЛОВ ТВС ИЗ КОРРОЗИОННО-СТОЙКИХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

*Е.Я. Лезинская*

*Государственный трубный институт, г. Днепропетровск, Украина*

Проведен анализ методов оценки разнородности в металле труб из аустенитных сталей марок 08X18H10, 08X18H10T, ASTM304и347, широко применяемых в качестве материала оболочек твэлов и других деталей ТВС. Доказана несостоятельность стандартного метода оценки разнородности по ГОСТ5639. Показана целесообразность применения количественных методов оценки и реконструкции структуры с применением математической статистики и компьютерной техники.

Аустенитные нержавеющие стали марок 08X18H10, 08X18H10T, ASTM304 и 347, широко применяемые в качестве материала оболочек твэлов и других деталей тепловыделяющих сборок в исследовательских и энергетических реакторах, охлаждаемых водой высоких параметров, обладают рядом преимуществ перед цирконием, алюминием и их сплавами: высокой жаропрочностью и жаростойкостью вплоть до 600°C, хорошей коррозионной стойкостью и свариваемостью. Несомненным преимуществом этих сталей является их технологичность при производстве труб [1,2].

Существенным недостатком упомянутых сталей является их склонность к разнородности при нагреве после деформации.

Поскольку оболочка твэла работает в очень сложных напряженных условиях в течение длительного времени очень важно, чтобы она сохраняла весь комплекс свойств, достигнутых в готовой трубе, что обеспечивается **однородностью** зеренной структуры металла труб.

Однако в производственных условиях получение однородной структуры является сложной технологической задачей. Требования, предъявляемые к таким трубам, ставят перед разработчиками две основные задачи: разработку режимов деформации и термической обработки, обеспечивающих получение регламентированной структуры, и ее объективную оценку.

Современные методы деформации и термической обработки обеспечивают получение достаточно однородной структуры, требуемой в соответствии с нормативной документацией. Что касается оценки самой зеренной структуры металла готовых труб и ее однородности, то они весьма субъективны, так как в основном производятся методами визуального сравнения с фотообразцами соответствующих стандартов и целиком зависят от зрительных способностей контролера.

Наиболее распространенными методами оценки величины зерна в международной практике является стандарт ASTM E 112-55T "Стандартные методы испытаний для определения средних размеров зер-

на", который корректируется и переиздается каждые 5 лет (текущее издание E 112-95), а также ГОСТ 5639 и его модификация СТ СЭВ 1959, который разработан и введен в действие в 1965 году (текущее издание ГОСТ 5639-88) [3].

Анализ этих двух основных методов определения величины зерна в металлических изделиях показал следующее.

Метод подсчета зерен по ГОСТ 5639, который заключается в определении их количества на единице поверхности шлифа (1 мм<sup>2</sup>), расчете средней площади зерна (*a*) и расчете диаметра зерен (*d<sub>m</sub>*) предусматривает определение указанных параметров по следующим формулам:

$$\text{средняя площадь зерна в мм}^2 \\ a = \frac{1}{m};$$

$$\text{средний диаметр зерна в мм} \\ d_m = \frac{1}{\sqrt{m}},$$

где *m* – число зерен на исследуемой площади испытательного образца.

Сравнением полученных значений *m*, *a* и *d<sub>m</sub>* с табличными значениями номеров, приведенных в ГОСТе, определяют соответствующий номер *G*.

Однако определенный таким образом средний диаметр зерна не имеет физического смысла, поскольку представляет сторону квадратного зерна площадью *a*, при том, что поперечное сечение реальных зерен практически никогда не бывает квадратным.

Иными словами, эти методы дают лишь приближенные представления о величине зерна в условных единицах (номерах), которые при их использовании в конструкторских расчетах могут привести к существенной погрешности последних. Кроме того, оценка величины зерна по ГОСТ 5639 затруднена по той причине, что в табл.1 ГОСТа приведены одинаковые значения параметров границ для двух соседних номеров, а именно: максимальное число зерен меньшего номера равно минимальному числу

зерен большего номера, что вызывает перебраковку готовых изделий, в частности труб, если величина зерна в них оказывается равной граничным значениям допустимого и недопустимого размеров (например: 7 и 6 или 10 и 11 для труб-оболочек твэлов, 3 и 2 или 7 и 8 для котельных труб).

Но наиболее существенным недостатком методов ГОСТ 5639 является невозможность достоверно судить о разности зерен металла готового изделия, так как все они сводятся к определению средних значений площади сечения зерна –  $a$  и его диаметра –  $d_m$ , но в то же время п. 3.3.6. ГОСТа предписывает оценивать разность зерен «...двумя или более номерами...».

Простым примером можно показать, что, взяв совершенно разные по степени разности структуры, можно получить одни и те же средние значения как площади сечения ( $a$ ), так и диаметра ( $d_m$ ) зерна, и, следовательно, их необходимо оценивать только одним номером.

Возьмем для расчета структуру, состоящую на плоскости из совершенно одинаковых 64 квадратов, приняв занимаемую ими площадь за 1 мм<sup>2</sup> (рис.1, а). В соответствии с п.3.4 ГОСТ 5639-52, так как число зерен на такой площади  $m = 64$ , средний диаметр  $d_m$  будет равен:  $d_m = \frac{1}{\sqrt{64}} = 0,125$  мм, что соответствует номеру **G3**.

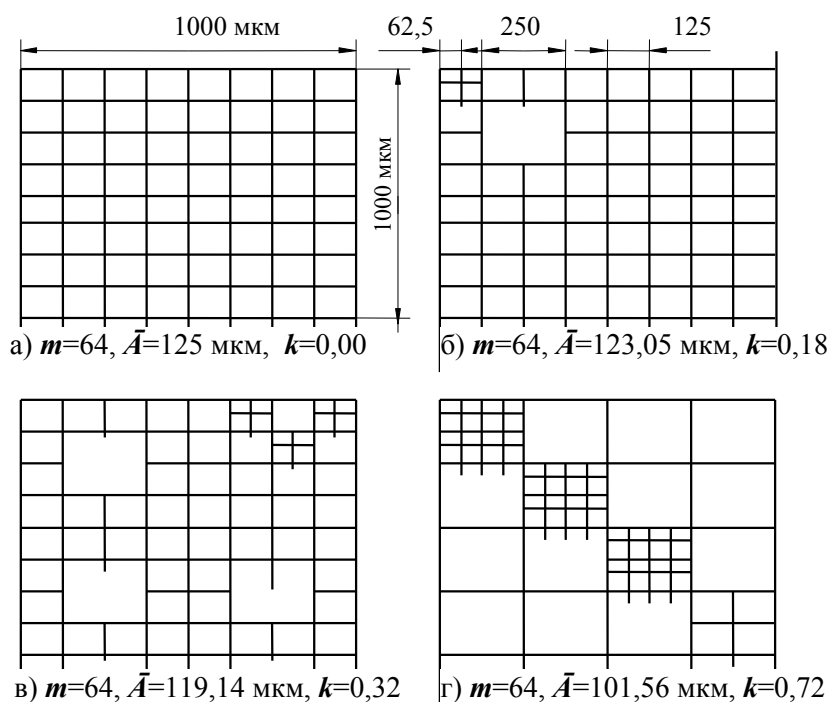


Рис.1. Иллюстрация оценки разности структур

по ГОСТ 5639 ( $m$ -число объектов;  $\bar{A}$ - средний размер объектов;  $k$ - коэффициент вариации)

Изменяя на этой же площади размеры условных зерен (квадратов), но не изменяя их общего количества (см. рис.1,б, в, г), получаем соответственно средний размер зерна, который находим из соотношения:

$$\bar{A} = \sum_{i=1}^{n_i} A_i \cdot P_i,$$

где  $A_i$  – размеры зерен на единице площади;  $P_i$  – доля  $i$ -го размера в общем количестве объектов плоского среза.

$\bar{A}$  равно 0,123 мм (см. рис.1, б); 0,119 мм (см. рис.1, в) и 0,102 мм (см. рис.1, г), что также соответствует номеру **G3** (табл.1). Однако эта оценка совершенно не отражает разность зерен, которая возникла в результате укрупнения и измельчения отдельных зерен в исследуемом конгломерате.

Таблица 1

Оценка разности структур

$m$	Количество объектов $m_i$ , шт			Количество объектов, %			Средний размер объекта $\bar{A}$ , мм	Среднеквадратичное отклонение $\sigma_p$ , мкм	Коэффициент вариации $k = \frac{\sigma_p}{\bar{A}}$
	В том числе объектов размерами, мм								
	62,5	125	250	62,5	125	250			
64	0	64	0	0,00	100,0	0,00	125,00	0,00	0,00
64	4	59	1	6,25	92,19	2,56	123,05	22,01	0,18
64	12	49	3	18,75	76,56	4,69	119,14	37,82	0,32
64	48	4	12	75,0	6,25	18,75	101,56	72,87	0,72

В этом примере коэффициент вариации  $k$ , представляющий отношение среднеквадратичного отклонения  $\overline{\sigma_A}$  к среднему значению сторон квадрата  $\overline{A}$  и характеризующий неравномерность (разнозернистость) структуры, изменяется от  $k=0$  до  $k=0,72$ .

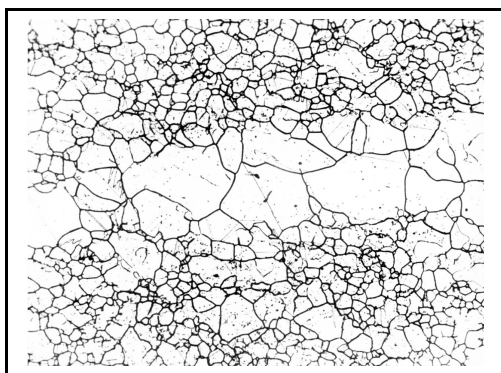
Таким образом, положенный в основу стандарта ряд чисел геометрической прогрессии  $m$ , устанавливающий количество зерен в единице площади шлифа и определяющий средний диаметр  $d_m = \frac{1}{\sqrt{m}}$  для всех вариантов, остается равным 125 мкм. Он совершенно не характеризует разнозернистость структуры плоского среза и, следовательно, не может служить методом достоверной оценки разнозернистости структур, подобных встречающимся в реальных трубах из аустенитных сталей (рис.2).

Из стереологии известно, что случайное сечение любой абсолютно однородной структуры, например,

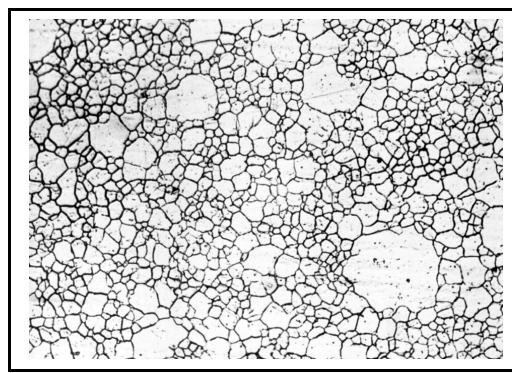
состоящей из одинаковых шаров или кубов, дает на плоскости сечения в виде кругов или многоугольников различной конфигурации и различных размеров в диапазоне от максимального, т.е. соответствующего размеру в объеме, до минимального, т.е. до 0. При этом количество таких сечений в каждой размерной группе зависит от угла наклона случайной секущей плоскости по отношению к плоскости максимальных диаметров в объеме.

Поэтому известные методы оценки разнозернистости [4-8] базируются на построении кривых распределения по размерам одной из следующих величин: хорд  $Pl_i = f(l)$ ; диаметров плоских сечений зерен  $Pd_i = f(d)$ ; диаметров зерен в объеме изделия  $PD_i = f(D)$ .

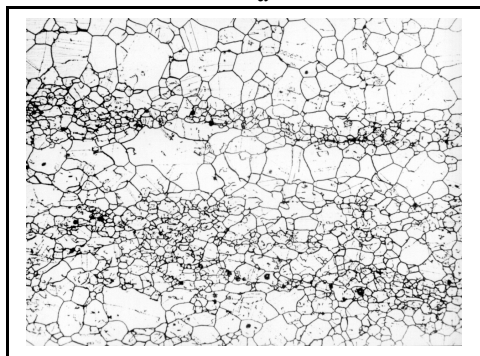
Последняя величина определяется методом реконструкции [5, 6]. Разнозернистость оценивается по коэффициенту вариации, полученному на основании данных кривой распределения.



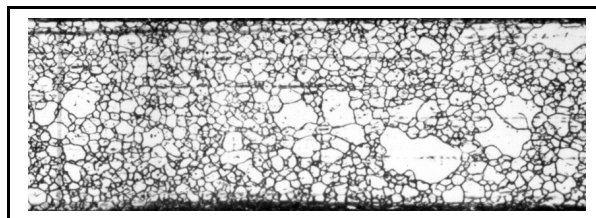
а



б



в



г

Рис. 2. Разнозернистость в реальных горячекатаных (а, б) и холоднокатаных (в, г) трубах из аустенитных сталей при увеличении  $\times 100$

Следовательно, определение величины разнозернистости методом ГОСТ 5639 п. 3.3.6 «... двумя и более номерами ...» некорректно как по форме, так и по содержанию.

Некорректно по форме, так как расчеты показывают [7], что плоский срез пространственной структуры, состоящий из абсолютно одинаковых шаров, будет иметь 28% диаметров плоских сечений зерен размерами в интервале от  $D$  до 0. В то же время ГОСТ 5639 предписывает оценивать структуру двумя и более номерами в случае, если на исследуемой поверхности шлифа имеются зерна, «... отличающиеся от основного (преобладающего) номера, соответствующего определенному эталону шкалы, более чем на 1 номер и занимающую на шлифе площадь более 10%».

По содержанию некорректно, так как прямой эксперимент показывает значительное расхождение между оценкой одной и той же структуры способом сравнения с фотоэталонами (см. п. 3.3.6 ГОСТ 5639-82) и «Примером оценки величины зерен в разнозернистой структуре методом измерения длин хорд» (см. Приложение 5 стр. 18 ГОСТ 5639-82).

Для анализа были взяты образцы труб размером  $\varnothing 7 \times 0,3$  мм из стали 026X16H15M3Б, изготовленные на Никопольском Южно-трубном заводе и оцененные контролерами ОТК в соответствии с требованиями технических условий способом сравнения с фотоэталонами ГОСТ 5639. Результаты оценки приведены во второй колонке табл. 2.

Таблица 2

Результаты оценки величины зерна аустенита в металле труб Ø7×0,3 мм из стали O26X16H15M3Б

Величина зерна по результатам визуальной оценки и значения в соответствии с ГОСТ 5639	Номер зерна G по ГОСТ 5639-82								Расчетная величина зерна	Коэффициент вариации, $k$	
	14	12	10	9	8	7	6	5			
	Значения диаметров, соответствующих предельным значениям, допустимым данным номером										
	0,0022	0,0044	0,0088	0,0125	0,0177	0,0250	0,0354	0,050			
	-	-	-	-	-	-	-	-0,070			
	0,0032	0,0062	0,0125	0,0177	0,0250	0,0354	0,050	7			
	Относительная доля длин хорд, занимаемых данной размерной группой, %								<b>G</b>	$d_L$ , мкм	
G10, G7	10,8	33,2	24,2	15,1	9,7	6,5	0,5	-	10	10,4	0,7
G6, G9	14,6	29,9	27,6	12,9	5,5	7,6	1,9	-	10	10,5	0,8
G11, G8	14	38,0	31,7	8,6	4,1	3,6	-	-	11	8,3	0,7
G11, G8	14,6	42,7	28,6	7,9	3,0	3,0	-	0,2	11	8,0	0,75
G11, G8	9,9	38,8	28,4	11,4	6,7	4,4	0,4	-	10	9,4	0,7
G11, G8	11,5	28,6	34,0	17,2	5,4	3,1	0,2	-	10	9,6	0,6
G11, G9	5,5	49,4	26,8	11,0	3,5	3,8	-	-	11	8,6	0,6
G11, G9	6,0	46,6	27,9	7,8	6,8	4,9	-	-	10	9,1	0,7

Сравнение этих данных с результатами расчетов в соответствии с «Примером...» (см. третью колонку таблицы) показало значительное расхождение между величиной зерна в одном и том же образце, но определенной двумя методами одного и того же ГОСТа. При этом расхождение тем больше, чем больше разнотерность анализируемого образца. Так, фактическая разнотерность, характеризующая коэффициентом вариации  $k$ , составляет 0,75 и 0,8 у образцов, имеющих небольшое количество крупных зерен ( $G6=1,9\%$  и  $G5=0,2\%$ ), т.е. вдвое больше теоретической (0,28), а визуально она оценена неверно, так как преобладающим номером, судя по его процентному содержанию во всех образцах, кроме  $G6$ , является  $G12$ .

Тем не менее, при оценке качества труб ответственного назначения, каковыми являются трубы оболочки твэлов, метод визуального сравнения с фотоэталоном ГОСТ 5639 является основным, следовательно, труба, от которой был взят образец №2, будет забракована, а трубы, в которых присутствует недопустимый по техническим условиям номер  $G6$ , но в количестве 0,2...0,4% и тем более номер  $G5$  – 0,2%, по результатам оценки методом сравнения с

фотоэталоном ГОСТ 5639, будут признаны годными.

Такая ситуация может возникать еще по той причине, что фотоэталоны ГОСТа, представляющие случайное сечение якобы однородной в объеме структуры со средним диаметром соответствующего номера, на самом деле содержат различное количество зерен диаметрами, соответствующими другим номерам. При этом содержание зерен других размеров (номеров) колеблется в достаточно широких пределах и не подчиняется никакой закономерности (табл.3). Поэтому оценивать структуру двумя и более номерами по фотоэталонам, приведенным в «Приложениях...» к стандарту, практически невозможно, так как в каждом номере фотоэталоны уже заложено более 10% соседних номеров, а содержание зерен размерами, соответствующими собственно номеру (см. среднюю колонку табл.3), колеблется в пределах 24,6...63,7%.

Компьютерный анализ тех же фотоэталонных показывает еще меньшее их содержание. Оно колеблется в пределах 17...27%, что еще раз подтверждает невозможность использования ГОСТ 5639 для

оценки величины зерна в изделиях из сталей и спла-

вов, склонных к разнотерности, в особенности тех, в которых структура строго регламентируется.

Таблица 3

**Результаты количественной оценки фотоэталонных ГОСТ 5639 (шкала № 3)**

Количество зерен, присутствующих в фотоэталоне данного номера, %			
мельче данного номера, <G	собственно данного номера, G	крупнее данного номера, >G	других номеров
1 - 41,3	24,6	32,8	74,1
2 - 27,9	45,4	26,0	53,9
3 - 48,0	23,9	27,3	75,3
4 - 26,9	62,4	10,5	37,4
5 - 35,3	30,5	33,7	69,0
6 - 28,6	44,1	26,9	55,5
7 - 34,3	29,7	36,1	59,4
8 - 32,8	40,4	26,4	59,2
9 - 24,3	62,1	14,3	38,6
10 - 51,4	41,8	6,5	52,8
11 - 24,6	63,3	11,7	36,3
12 - 38,9	56,9	3,9	42,8

А.Г. Спектор [4] предлагает оценивать разнотерность по показателю, характеризующему удельную долю зерен, имеющих в сечении размеры, отличающиеся от средних:

$$\Delta D / \bar{D} = \left[ \left( \sum_{i=1}^{K_{max}} |\bar{D} - D_i| N_i \right) / \bar{D} N \right] 100\%,$$

где  $K_{max}$  – общее число групп зерен разных размеров.

Для однородных (не разнотерных) структур это отношение, по мнению автора, лежит в пределах 30...35%, а значения, превышающие эти величины, свидетельствуют о разнотерности. Однако этот критерий ничего не говорит ни о максимальной величине зерна  $D_{max}$ , ни о статистически наиболее вероятном размере зерна  $D_e$ , в то время как именно эти характеристики структуры оказывают наиболее сильное влияние на свойства готового изделия.

С.С. Горелик [8] предлагает разнотерность оценивать величиной, характеризующей степень асимметричности кривой распределения  $D_{max}/D_e$ .

Следует отметить, что наиболее полно разнотерность структуры металла характеризуют кривая распределения зерен по размерам и ее числовые характеристики. При этом необходимо учитывать, что в рассмотренных методах разнотерность определяется на основании данных, полученных из анализа плоского среза структуры, в то время как истинная разнотерность характеризуется параметрами объемной структуры, полученной методом реконструкции [6].

Объективную оценку разнотерности и реальных размеров зерен в металле труб ответственного назначения необходимо осуществлять на основании

анализа характеристик объемной структуры – распределения, максимального и среднего диаметров, коэффициента вариации, которые можно получать с помощью компьютера по специально разработанной программе.

Анализ существующих методов компьютерной оценки зеренной структуры (ASTM E1382, SIAMS 600 и других) показал невозможность применения их для оценки разнотерных структур.

### ЛИТЕРАТУРА

- 1.М.Л. Бернштейн, В.А. Займовский. *Структура и механические свойства металлов*. М.: «Металлургия», 1970, 471 с.
- 2.В. Гутман. *Высокотемпературные механические свойства коррозионно-стойкой стали для атомной техники* /Под ред. С.Б. Масленкова. М.: «Металлургия», 1987, с. 210–223.
- 3.*Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна*. ГОСТ 5639-82 (СТ СЭВ 1959-79). М.: «Издательство стандартов», 1983, 20 с.
- 4.А.Г. Спектор. Дисперсионный анализ сферических частиц в непрозрачных структурах // *Заводская лаборатория*. 1950, т. 16, № 2, с. 173–177.
- 5.С.А. Салтыков. *Стереометрическая металлография*. М.: «Металлургия», 1970, 376 с.
- 6.К.С. Чернявский. *Стереология в металловедении*. М.: «Металлургия», 1977, 250 с.
- 7.М.Н. Бодяко, Е.Я. Лезинская, В.П. Касичев. Метод оценки разнотерности однофазных сплавов // *Известия АН БССР. Серия физ.-техн.-наук*. 1974, № 2, с. 22–27.
- 8.С.С. Горелик. *Рекристаллизация металлов и сплавов*. М.: «Металлургия», 1978, 567 с.

## МЕТОДИ ОЦІНКИ СТРУКТУРНОЇ НЕОДНОРІДНОСТІ СТАЛЕЙ І СПЛАВІВ МЕТАЛУ ТРУБ-ОБОЛОНОК ТВЕЛ ТА ЧОХЛІВ ТВЗ З КОРОЗІЙНО-СТІЙКИХ СТАЛЕЙ ТА СПЛАВІВ

О.Я. Лезинська

Проведено аналіз методів оцінки різнотерності у металі труб із аустенітних сталей марок 08X18H10, 08X18H10T, ASTM304 та 347, що широко застосовуються як матеріали оболонок твелів та інших деталей ТВЗ. Доказана

необґрунтованість стандартного методу оцінки різнозернистості по ГОСТ5639. Показана доцільність використання кількісних методів оцінки та реконструкції структури із застосуванням математичної статистики та комп'ютерної техніки.

**EVALUATION METHODS FOR STRUCTURE NON UNIFORMITY OF METAL FOR CLADDING  
TUBES AND WRAPPER OF CORROSION-RESISTANT STEELS AND ALLOYS**

*E.Ya. Lezinskaya*

The analysis of methods of evaluation of different graininess in the tube metal of austenite steels 08Cr18Ni10, 08Cr18Ni10Ti, ASTM304 and 347, that are widely used as the fuel element casing material and as the material of other parts of the fuel assembly. It is demonstrated that the use of the standard method for the evaluation of different graininess on GOST5639 is inconsistent. The expediency of quantitative methods of structure evaluation and reconstruction is demonstrated with the use of mathematical statistics and computer procedure.