

Т. П. Даниленко /к. т. н./

Государственный экономико-технологический университет транспорта

## К вопросу об определении величины зерна в исследованиях металлических структур

*Анализ зеренных структур, представленных на эталонах G4, G5, G6 ГОСТ 5639-82 показал, что совокупность плоских зерен каждого эталона представлена в основном зернами трех номеров (82...87 %), а именно тех, что соответствуют диапазону этого эталона и двух соседних с ним. Стереологически реконструированные объемные структуры, плоские сечения которых соответствовали бы эталонам G4, G5, G6 ГОСТ 5639-82, являются более однородными, представлены в основном зернами двух номеров (81...87 %) и имеют больший (на 13...17 %) средний диаметр, чем их плоские срезы, представленные эталонами. (Ил. 2. Табл. 5. Библиогр.: 10 назв.).*

**Ключевые слова:** зеренные структуры, величина зерна, эталоны ГОСТ 5639-82, стереологическая реконструкция объемной зеренной структуры

*Analysis of the grain structures shown on the reference G4, G5, G6 GOST 5639-82 showed that the set of flat grains each standard is represented mainly grains of three groups (82 ... 87 %) – namely, those that correspond to the range of this group and two neighboring it. Stereological reconstructed three-dimensional structure, plane sections which correspond to the standards G4, G5, G6 GOST 5639-82 are more homogeneous, represented mainly grains of two groups (81 ... 87 %) and have a larger (13 ... 17 %) the average diameter than their plane sections presented standards.*

**Key words:** grain structure, grain size, the standards GOST 5639-82, stereological reconstruction of three-dimensional grain structure

Величина зерна является регламентируемой для многих видов металлопродукции, поскольку зеренная структура в значительной мере определяет ряд свойств, в том числе механических. В стандартах для определения величины зерна ГОСТ 5639-82 [1], ISO 643:2012 [2] зернами металлов названы отдельные кристаллы поликристаллического конгломерата, т. е. зерна рассматривают как трехмерные объекты, и при этом известно, что они имеют форму неправильных многогранников [3]. В то же время «величина зерна» по ГОСТ 5639-82 – это «средняя величина случайных сечений зерен в плоскости металлографического шлифа», т. е. в понятие величины зерна вкладывается только среднее ее значение и только в применении к плоским сечениям трехмерных зерен (назовем эти сечения плоскими зернами).

Однако очевидно, что на свойства изделия оказывает влияние именно объемная трехмерная структура, а не ее двумерный срез на металлографическом шлифе. Вопросами соотношений параметров трехмерной структуры и ее плоского среза занимается наука стереология, и основным объектом стереологического анализа полидисперсных зеренных структур является распределение размеров зерен и связанные с ним распределения размеров плоских и линей-

ных сечений зерен. Установив распределение размеров зерен, можно рассчитать все необходимые количественные характеристики объемной зеренной структуры: средний размер зерен, количество зерен в единице объема, характеристики неоднородности структуры и т. д.

Однако в настоящее время общепринятым продолжает оставаться исследование зеренной структуры на металлографическом шлифе, и в действующих стандартах [1; 2] одним из наиболее распространенных методов определения величины плоских зерен является метод визуального сравнения видимых под микроскопом совокупностей плоских зерен с эталонами шкал, представленных в виде схематизированной сетки, ограничивающей размеры зерен.

В данной работе были поставлены задачи:

1) проанализировать некоторые эталоны шкал ГОСТ 5639-82, а именно эталоны номеров G4, G5, G6, с целью установления распределения в относительных долях  $P_k(d)$  размеров плоских зерен в эталонах, т. е. установления – плоские зерна каких именно размеров составляют эталон и каковы количественные характеристики этой совокупности плоских зерен;

2) исходя из установленного  $P_k(d)$ , реконструировать с помощью стереологического метода распределение в относительных долях  $P(D_k)$  раз-

меров трехмерных зерен, плоские сечения которых соответствовали бы исследуемым эталонам;

3) определить и сравнить характеристики реконструированной объемной зеренной структуры и ее плоского среза на эталонах с целью оценки степени их различия.

Номер зерна  $G$  по ГОСТ 5639-82 характеризуется средней площадью плоских зерен  $a$  и средним диаметром  $d_m$ , который определяют из соотношения  $d_m = 1/\sqrt{m}$  (где  $m$  – количество зерен на  $1 \text{ мм}^2$  площади шлифа) или, если выразить  $d_m$  через  $a$ , то  $d_m = 1/\sqrt{1/a} = \sqrt{a}$ . В то же время в работе [4] было показано, что диаметр конкретного плоского зерна-многоугольника корректно определять как диаметр равновеликого этому плоскому зерну круга  $d_s$ . Тогда, если на произвольной площади  $S$  (которая, как вариант, может составлять  $1 \text{ мм}^2$ ) количество подсчитанных зерен равно  $n$ , то среднюю площадь зерен можно найти из соотношения  $a_s = S/n$ , а средний диаметр – из соотношения  $d_s = \sqrt{4a_s/\pi} = 1,1287\sqrt{a_s}$ .

Следовательно,  $d_m$  в 1,1287 раза меньше  $d_s$ , т. е. различие между ними составляет порядка 13 %, при этом именно  $d_s$  является объективной геометрической характеристикой линейных размеров плоского зерна [4], что следует учитывать при определении величины зерна в соответствии с ГОСТ 5639-82.

В соответствии с поставленной задачей анализ эталонов ГОСТ 5639-82 предполагал измерение площади каждого плоского зерна в эталоне, вычисление его диаметра  $d$  и распределение

диаметров по размерам, т. е. установление  $P_k(d)$  для каждого эталона. При этом определяли как  $d_s$ , так и  $d_m$ .

Поскольку номер зерна  $G$  характеризуется не только средней площадью плоских зерен  $a$  и средним диаметром  $d_m$ , но также и минимальным, средним и максимальным числом зерен на  $1 \text{ мм}^2$ , то в данном исследовании были определены минимальный, средний и максимальный диаметры  $d_m$  и  $d_s$  зерен, составляющих конкретный эталон. Результаты расчетов, приведенные в табл. 1, показали, что в каждом эталоне к реальному среднему диаметру  $d_s$  наиболее близким является максимальное значение  $d_m$ , допустимое в эталоне.

Далее в компьютерной программе «Компас» были созданы схемы выбранных для анализа эталонов номеров  $G4$ ,  $G5$  и  $G6$ , куда для большей статистики были включены как зерна, полностью входящие в пределы ограничивающего круга диаметром  $79,8 \text{ мм}$ , принятого в ГОСТ для эталонов, так и пересеченные этим кругом, но границы которых четко видны на эталоне. На рис. 1 представлена схема эталона номера  $G5$ .

Зерна эталонов были пронумерованы, и с помощью программы «Компас» измерены их площади, а затем определен диаметр  $d_s$  каждого зерна как диаметр равновеликого круга, и диаметры распределены по размерам в шкале, рассчитанной для  $d_s$ , т. е. были приняты размерные интервалы (5,1...7,2 мкм); (7,2...10,2 мкм);...; (115,2...163 мкм) (табл. 1).

Таблица 1

Результаты расчетов диаметров зерен  $d_m$  и  $d_s$  эталонов ГОСТ 5639-82

Номер зерна $G$	Диаметр зерна $d_m$ , мкм			Диаметр зерна $d_s$ , мкм		
	Минимальный	Средний	Максимальный	Минимальный	Средний	Максимальный
-3	817	1000	1155	922	1129	1304
-2	577	707	817	651	798	922
-1	408	500	577	461	564	651
0	289	354	408	326	400	461
1	204	250	289	230	282	326
2	144	177	204	163	200	230
3	102,1	125	144	115,2	141	163
4	72,2	88,4	102,1	81,5	99,8	115,2
5	51,0	62,5	72,2	57,6	70,5	81,5
6	36,1	44,2	51,0	40,7	49,9	57,6
7	25,5	31,2	36,1	28,8	35,2	40,7
8	18,0	22,1	25,5	20,3	24,9	28,8
9	12,8	15,6	18,0	14,4	17,6	20,3
10	9,0	11,0	12,8	10,2	12,4	14,4
11	6,4	7,8	9,0	7,2	8,8	10,2
12	4,5	5,5	6,4	5,1	6,2	7,2
13	3,2	3,9	4,5	3,6	4,4	5,1
14	2,3	2,8	3,2	2,6	3,2	3,6

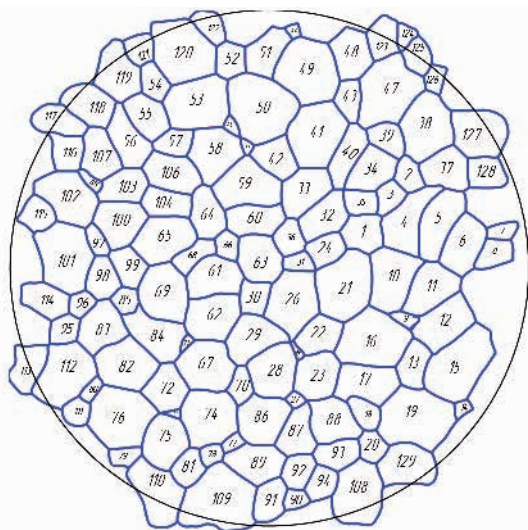


Рис. 1. Схема эталона G5 ГОСТ 5639-82 с пронумерованными зёрнами

Было установлено, что в анализируемых эталонах наблюдается следующий диапазон диаметров плоских зёрен: в эталоне G4 – от G3 до G7; в эталоне G5 – от G4 до G9; в эталоне G6 – от G5 до G12. Полученные распределения диаметров плоских зёрен  $P_k(d)$ , приведенные в табл. 2, показали, что количество плоских зёрен, имеющих размер, укладывающийся в диапазон номера (соответственно, G4, G5, G6), составляет 35,2...39,6 %; зёрен, попавших в предыдущий интервал с более крупными зёрнами (например, G3 для номера G4) – 24,5...25,7 %, а зёрен более мелких из последующего интервала (например,

G5 для номера G4) – 20,7...23,3 %; остальные зёрна более мелкие. Таким образом, совокупность плоских зёрен каждого эталона представлена в основном зёрнами трех номеров (82...87 %), а именно тех, что соответствуют диапазону этого эталона и двух соседних с ним.

На основе полученных распределений  $P_k(d)$  был рассчитан средний диаметр совокупности плоских зёрен каждого эталона  $d_{cp}$  по формуле:

$$d_{cp} = \sum_k^n d_{sk} P_k(d), \quad (1)$$

при этом за  $d_{sk}$  принимали среднее значение размерного интервала (например, 141 мкм для интервала, соответствующего G3). Рассчитанные  $d_{cp}$  близки к среднему значению  $d_s$  анализируемого номера G (табл. 1) и при этом  $d_{cp}$  меньше чем  $d_s$  на 3,0...4,2 мкм; в то же время  $d_{cp}$  больше чем  $d_m$  на 2,7...8 мкм. Число плоских зёрен на 1 мм<sup>2</sup> близко к среднему значению  $m$  по ГОСТ, но несколько (на 7...13 %) его превышает по всем эталонам, что, очевидно, объясняется тем, что при расчете  $d_{cp}$  значения  $d_{si}$  каждого интервала относили к середине интервала.

Были также рассчитаны параметры, характеризующие степень однородности структуры – среднее квадратичное отклонение  $\sigma_d$  и коэффициент вариации  $K_{dv}$ , которые показали достаточную однородность структур.

Для выполнения указанных и всех последующих расчетов была разработана и использована компьютерная программа.

Таблица 2

Распределения диаметров  $d_s$  плоских зёрен в эталонах ГОСТ 5639-82 и параметры структур

Номер зерна G	Диапазон диаметров $d_s$ в интервале, мкм	Распределение диаметров в эталоне G4		Распределение диаметров в эталоне G5*		Распределение диаметров в эталоне G6	
		шт.	$P_k(d)$	шт.	$P_k(d)^*$	шт.	$P_k(d)$
3	115,2...163	13	0,245	-	-	-	-
4	81,5...115,2	21	0,396	32	0,248062	-	-
5	57,6...81,5	12	0,226	46	0,356589	67	0,257
6	40,7...57,6	6	0,113	30	0,232558	92	0,353
7	28,8...40,7	1	0,019	12	0,093023	54	0,207
8	20,3...28,8	-	-	6	0,046512	30	0,115
9	14,4...20,3	-	-	3	0,023256	11	0,042
10	10,2...14,4	-	-	-	-	4	0,015
11	7,2...10,2	-	-	-	-	2	0,008
12	5,1...7,2	-	-	-	-	1	0,004
Средний диаметр зёрен эталона $d_{cp}$ , мкм		96,4		66,3		46,9	
Среднеквадратичное отклонение $\sigma_d$ , мкм		31,0		23,9		17,4	
Коэффициент вариации $K_{dv}$ , %		32,2		36,1		37,1	
Число плоских зёрен на 1 мм <sup>2</sup>		137		290		579	
Число плоских зёрен на 1 мм <sup>2</sup> по ГОСТ		128		256		512	

\*Для эталона G5 даны  $P_k(d)$  с повышенной точностью, поскольку они будут в дальнейшем использованы в расчетах.



Далее, используя установленные  $P_k(d)$  в качестве исходной информации, выполнили реконструкцию распределения размеров трехмерных зерен  $P(D_k)$ , плоские сечения которых соответствовали бы исследуемым эталонам. Для этого был применен новый метод определения основных параметров объемной структуры металлических материалов [5–10], который позволяет выполнить указанную реконструкцию. В методе в качестве исходной информации для реконструкции можно использовать как распределение диаметров плоских зерен  $P_k(d)$ , так и распределение линейных сечений (хорд)  $P_k(l)$ , получаемых в результате нанесения на изображение структуры секущих линий и пересечения их с границами плоских зерен. Для распределений  $P(D_k)$ ,  $P_k(d)$ ,  $P_k(l)$  используется одна и та же размерная шкала с  $n$  интервалами.

Рабочие формулы метода для неравномерной размерной шкалы, соответствующей шкале действующих стандартов [1; 2] и представляющей собой геометрический ряд с множителем  $\sqrt{2}$  имеют вид:

$$P_k(d) = \alpha_1 P(D_k) \sqrt{D_k^2 - d_{k-1}^2} + \alpha_2 P(D_{k+1}) (\sqrt{D_{k+1}^2 - d_{k-1}^2} - \sqrt{D_{k+1}^2 - d_k^2}) + \dots + \alpha_n P(D_n) (\sqrt{D_n^2 - d_{k-1}^2} - \sqrt{D_n^2 - d_k^2}) \quad (2)$$

$$P_k(l) = \beta_1 P(d_k) \sqrt{d_k^2 - l_{k-1}^2} + \beta_2 P(d_{k+1}) (\sqrt{d_{k+1}^2 - l_{k-1}^2} - \sqrt{d_k^2 - l_k^2}) + \dots + \beta_n P(d_n) (\sqrt{d_n^2 - l_{k-1}^2} - \sqrt{d_n^2 - l_k^2}) \quad (3)$$

где:  $\alpha_i$ ;  $\alpha_2$ ; ...;  $\alpha_n$  – коэффициенты формы трехмерных зерен, учитывающие отличие полиэдрической формы среднестатистического зерна от формы сферы, в соответствии с соотношением:  $\alpha_k = P_k(d)_{\text{зерна}} / P_k(d)_{\text{сферы}}$ ;  $\beta_i$ ;  $\beta_2$ ; ...;  $\beta_n$  – коэффициенты формы плоских зерен, учитывающие отличие формы среднестатистического плоского зерна от формы круга в соответствии с соотношением:  $\beta_k = P_k(l)_{\text{плоского зерна}} / P_k(l)_{\text{круга}}$ .

Коэффициенты формы  $\alpha$  и  $\beta$  в работе [5] были установлены для аустенитных рекристаллизованных структур для указанной размерной шкалы из 20 интервалов. Если принять максимальное значение в этой шкале равным 1 условной единице длины (усл. ед.), то в относительном виде шкала принимает следующий вид:

0,0010; 0,0014; 0,0020; 0,0028; 0,0039; 0,0055; 0,0078;  
0,0110; 0,0156; 0,0221; 0,0312; 0,0442; 0,0625; 0,0884;  
0,125; 0,177; 0,25; 0,354; 0,5; 0,707; 1.

Распределения  $P_k(d)_{\text{сферы}}$  и  $P_k(l)_{\text{круга}}$  идентичны, что следует из простых геометрических соотношений сферы и круга. Эти распределения были рассчитаны для круга диаметром, равным 1 усл. ед. в соответствии с формулой:

$$P_k(l) = \sqrt{1 - l_{k-1}^2} - \sqrt{1 - l_k^2} \quad (4)$$

Распределения  $P_k(l)_{\text{плоского зерна}}$  и  $P_k(d)_{\text{зерна}}$  были установлены экспериментально, первое – на 40 типичных по форме плоских зернах разного размера; а второе – на 20 типичных по форме плоских зернах, но максимальных размеров, наблюдаемых на шлифе, принимая при этом, что каждое из них является максимальным плоским сечением для того зерна, от которого оно получено. На изображения каждого зерна в программе «Компас» нанесли под равным углом друг к другу 8 групп параллельных равноудаленных секущих линий, как показано на рис. 2 (достаточность такого количества секущих показана в работах [5; 6]); измерили хорды, полученные в результате пересечения линий границами зерен; определили максимальную хорду  $l_{\text{max}}$ ; составили размерную шкалу в относительном виде ( $l_1 / l_{\text{max}}$ ;  $l_2 / l_{\text{max}}$ ; ...  $l_k / l_{\text{max}}$ ; ...  $l_n / l_{\text{max}}$ ) и распределили хорды в относительных долях по размерным интервалам шкалы. Далее для каждого размерного интервала рассчитали средние относительные доли хорд  $P_k(l)_{\text{плоского зерна}}$  по, соответственно, 40 и 20 плоским

зернам и рассчитали коэффициенты формы  $\beta$  и  $\alpha$ .

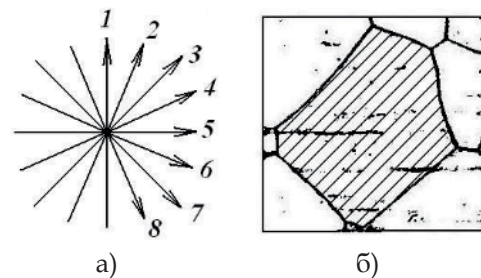


Рис. 2. Направления (1–8) нанесения на плоское зерно восьми групп параллельных равноудаленных секущих (а) и пример (б) нанесения секущих направления 3 на зерно для установления распределения  $P_k(l)$

При этом для расчета коэффициентов формы  $\alpha$  среднестатистическое распределение  $P_k(l)_{\text{плоского зерна}}$  установленное на 20 типичных по форме плоских зернах максимальных размеров, наблюдаемых на шлифе, принимали за распределение  $P_k(d)_{\text{зерна}}$ , поскольку, как было показано в работах автора [5; 6; 8], для установления распределения диаметров плоских сечений  $P_k(d)$  от зерна-полиэдра достаточно установить распределение хорд  $P_k(l)$  на максимальном плоском сечении этого зерна и принять его за  $P_k(d)$ .

Коэффициенты формы  $\beta$  и  $a$  для аустенитных рекристаллизованных структур представлены в табл. 3 и 4.

На основе приведенной рабочей формулы (2) для эталона G5, в котором плоские зерна представлены в 6 размерных интервалах, были составлены уравнения для каждого  $P_k(d)$ , при этом значения  $D$  и  $d$  соответствовали средним значениям размерных интервалов из табл. 1, т. е., например, все плоские сечения интервала (81,5...115,2 мкм) относили к размеру 99,8 мкм.

$P_k(d)$  являлись известными членами уравнений (табл. 2). Неизвестные  $P(D_k)$  были рассчитаны в результате решения системы составленных уравнений:

$$\begin{cases} P_6(d) = \alpha_1 P_6(D) \sqrt{D_6^2 - d_5^2}; \\ P_5(d) = \alpha_1 P_5(D) \sqrt{D_5^2 - d_4^2} + \alpha_2 P_6(D) (\sqrt{D_6^2 - d_4^2} - \sqrt{D_6^2 - d_5^2}); \\ P_4(d) = \alpha_1 P_4(D) \sqrt{D_4^2 - d_3^2} + \alpha_2 P_5(D) (\sqrt{D_5^2 - d_3^2} - \sqrt{D_5^2 - d_4^2}) + \alpha_3 P_6(D) (\sqrt{D_6^2 - d_3^2} - \sqrt{D_6^2 - d_4^2}); \\ \dots \\ P_1(d) = \alpha_1 P_1(D) \sqrt{D_1^2 - d_0^2} + \alpha_2 P_2(D) (\sqrt{D_2^2 - d_0^2} - \sqrt{D_2^2 - d_1^2}) + \dots + \alpha_6 P_6(D) (\sqrt{D_6^2 - d_0^2} - \sqrt{D_6^2 - d_1^2}). \end{cases} \quad (5)$$

После подстановки значений известных составляющих уравнений получили систему:

$$\begin{cases} 0,248062 = 0,676 P(D_6) \sqrt{99,8^2 - 70,5^2}; \\ 0,356589 = 0,676 P(D_5) \sqrt{70,5^2 - 49,9^2} + 1,638 P(D_6) (\sqrt{99,8^2 - 49,9^2} - \sqrt{99,8^2 - 70,5^2}); \\ 0,232558 = 0,676 P(D_4) \sqrt{49,9^2 - 35,2^2} + 1,638 P(D_5) (\sqrt{70,5^2 - 35,2^2} - \sqrt{70,5^2 - 49,9^2}) + \\ + 1,503 P(D_6) (\sqrt{99,8^2 - 35,2^2} - \sqrt{99,8^2 - 49,9^2}); \\ \dots \\ 0,023256 = 0,676 P(D_1) \sqrt{17,2^2 - 12,4^2} + 1,638 P(D_2) (\sqrt{24,9^2 - 12,4^2} - \sqrt{24,9^2 - 17,6^2}) + \\ + 1,503 P(D_3) (\sqrt{35,2^2 - 12,4^2} - \sqrt{35,2^2 - 17,6^2}) + 1,572 P(D_4) (\sqrt{49,9^2 - 12,4^2} - \sqrt{49,9^2 - 17,6^2}) + \\ + 2,038 P(D_5) (\sqrt{70,5^2 - 12,4^2} - \sqrt{70,5^2 - 17,6^2}) + 3,253 P(D_6) (\sqrt{99,8^2 - 12,4^2} - \sqrt{99,8^2 - 17,6^2}). \end{cases}$$

Из первого уравнения приведенной системы рассчитали  $P(D_6)$  и далее последовательно все остальные  $P(D_k)$ . При этом  $P(D_k)$ , имеющие отрицательные значения, а такими оказались  $P(D_3)$ ,  $P(D_4)$ ,  $P(D_5)$ , принимали равными нулю.

Рассчитанные  $P(D_k)$ , согласно методу [8], были нормированы в соответствии с формулой:

Результаты расчетов, приведенные в табл. 5, показали, что в реконструированных объемных структурах номеров G4 и G6 зерна присутствуют только в четырех размерных интервалах, в структуре G5 – в трех, тогда как на их плоских срезах, т. е. на эталонах, диапазон размеров плоских зерен охватывает от пяти (для G4) до восьми (для G6) размерных интервалов (табл. 2). Количество плоских зерен, имеющих размер, укладывающийся в диапазон номера (соответственно, G4, G5, G6), больше, чем для совокупности их плоских сечений на эталоне и со-

ставляет 43,3...52,0 %; зерен, попавших в предыдущий интервал с более крупными зернами тоже больше, чем их плоских сечений в эталоне – 34,5...37,3 %; а зерен более мелких из следующего интервала существенно меньше – 8,7...16,6 %; и еще меньше их в последнем интервале с самыми мелкими зернами. Таким об-

Таблица 3

**Значения коэффициентов формы  $\alpha$  трехмерных зерен**

$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$\alpha_6$	$\alpha_7$	$\alpha_8$	$\alpha_9$	$\alpha_{10}$	$\alpha_{11}$	$\alpha_{12}$	$\alpha_{13}$	$\alpha_{14}$	$\alpha_{15}$	$\alpha_{16}$	$\alpha_{17}$	$\alpha_{18}$	$\alpha_{19}$	$\alpha_{20}$
0,676	1,638	1,503	1,572	2,038	3,253	4,752	5,988	8,240	6,128	6,996	9,936	14,924	20,240	29,843	40,480	61,187	79,281	111,912	158,542

Таблица 4

**Значения коэффициентов формы  $\beta$  плоских зерен**

$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$	$\beta_6$	$\beta_7$	$\beta_8$	$\beta_9$	$\beta_{10}$	$\beta_{11}$	$\beta_{12}$	$\beta_{13}$	$\beta_{14}$	$\beta_{15}$	$\beta_{16}$	$\beta_{17}$	$\beta_{18}$	$\beta_{19}$	$\beta_{20}$
0,600	1,857	1,609	1,821	2,508	3,474	4,543	5,765	7,169	7,588	10,021	14,015	19,864	28,110	37,995	59,734	78,770	110,099	155,608	220,229

Реконструированные распределения диаметров  $P'(D)$  объемных зерен, соответствующие совокупности плоских зерен эталонов ГОСТ 5639-82 и параметры объемных структур

Номер зерна G	Диапазон диаметров $D$ в интервале, мкм	Распределение диаметров $P'(D)$ , рассчитанное по эталону G4	Распределение диаметров $P'(D)$ , рассчитанное по эталону G5	Распределение диаметров $P'(D)$ , рассчитанное по эталону G6
3	115,2...163	0,345	-	-
4	81,5...115,2	0,520	0,367	-
5	57,6...81,5	0,087	0,467	0,373
6	40,7...57,6	0,048	0,166	0,433
7	28,8...40,7	-	-	0,107
8	20,3...28,8	-	-	0,087
9	14,4...20,3	-	-	-
10	10,2...14,4	-	-	-
11	7,2...10,2	-	-	-
12	5,1...7,2	-	-	-
Средний диаметр $D_{cp}$ , мкм		109,1	77,8	53,8
Среднеквадратичное отклонение $\sigma_D$ , мкм		26,4	18,2	14,8
Коэффициент вариации $K_D$ , %		24,2	23,4	27,6
Число зерен в $1 \text{ мм}^3$ , шт.		1471	4058	12271
Среднее число зерен в $1 \text{ мм}^3$ по ГОСТ, $N_v$ , шт.		1448	4096	11585

разом, реконструированная совокупность объемных зерен представлена в основном зернами двух номеров (81...87 %), а именно тех, что соответствуют диапазону этого номера зерна и номера с более крупными зернами.

Средний диаметр совокупности объемных зерен  $D_{cp}$  превышает средний диаметр их плоских сечений  $d_{cp}$  на 13...17 % и очень близок к верхней границе диапазона диаметров эталона, а показатели разнотерности существенно меньше для объемной структуры по сравнению с плоскостной структурой эталонов: среднеквадратичное отклонение меньше на 15...24 %, коэффициент вариации – на 25...35 %, т. е. объемная структура значительно однороднее, чем видимая на плоском срезе.

По числу зерен в  $1 \text{ мм}^3$  объемные структуры всех эталонов близки к аналогичному параметру  $N_v$  ГОСТ 5639-82 (табл. 5), отличие составляет 1...6 %.

Таким образом, выполненные исследования показали следующее:

- при определении величины зерна по ГОСТ 5639-82 следует учитывать, что средний диаметр зерен  $d_m$  в 1,1287 раза (т. е. на ~13 %) меньше эффективного диаметра  $d_s$  равновеликого среднему зерну круга;

- реконструированные объемные структуры, плоские сечения которых соответствовали бы эталонам G4, G5, G6 ГОСТ 5639-82, являются более однородными и имеют больший (на 13...17 %) средний диаметр, чем их плоские срезы, представленные эталонами, что необходимо

учитывать в исследованиях, устанавливающих влияние величины зерна на свойства металлопродукции.

#### Библиографический список

1. ГОСТ 5639-82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 22 с.
2. ISO 643:2012. Steels. Micrographic determination of the apparent grain size. – ISO, 2013. – 44 p.
3. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография / С. А. Салтыков. – М.: Металлургия, 1976. – 375 с.
4. Даниленко Т. П. Аналіз понять величини і діаметра зерна в дослідженнях металевих структур / Т. П. Даниленко // Металознавство та обробка металів. – 2014. – № 1. – С. 45–51.
5. Даниленко Т. П. Оптимизация режимов термической обработки на основе разработки нового метода определения параметров пространственной зеренной структуры: дис. канд. ... техн. наук / Т. П. Даниленко; ДМетИ. – Днепропетровск, 1988. – 227 с.
6. А.с. 1397832 СССР. Способ определения распределения размеров плоских сечений зерна металлографических образцов / Е. Я. Лезинская, Т. П. Даниленко // Бюл. изобретений. – 1988. – № 19.
7. Danilenko T. New method for stereological reconstruction of nontransparent materials space structures / T. Danilenko // Proc. 1-st Int. Conf. «Development, Testing and Application of Materials». – Croatia, 1996. – P. 89–95.

8. Патент на винахід № 97453 Україна. Спосіб визначення основних параметрів об'ємної структури металевих матеріалів / Т. П. Даніленко, Е. І. Даніленко // Промислова власність. – 2012. – № 3.

9. Даніленко Т. П. Застосування стереології до аналізу металевих зерених структур /

Т. П. Даніленко // Металознавство та обробка металів. – 2010. – № 3. – С. 35–42.

10. Даніленко Т. П. Визначення параметрів об'ємної зеренної структури металевих матеріалів / Т. П. Даніленко // Металознавство та обробка металів. – 2013. – № 1. – С. 38–47.

**Поступила 03.04.2015**



УДК 669.245.018.044:620.193.53

Наука

**С. В. Гайдук /к. т. н./**  
Запорожский НТУ

**Т. В. Тихомирова**  
Запорожское машиностроительное  
КБ «Ивченко – Прогресс»

## **Применение CALPHAD-метода для расчета количества $\gamma'$ -фазы и прогнозирования длительной прочности литейных жаропрочных никелевых сплавов**

*Выполнен анализ экспериментальных данных по количеству  $\gamma'$ -фазы и 100-часовой длительной прочности для 32 известных литейных жаропрочных никелевых сплавов с различным уровнем легирования. Для этих же сплавов представлены результаты расчетов количества  $\gamma'$ -фазы и 100-часовой длительной прочности при разных температурах, полученные методом CALPHAD. Получены оптимальные аппроксимирующие математические модели, обеспечивающие высокую достоверность прогнозирования уровня прочностных характеристик для широкой номенклатуры литейных жаропрочных никелевых сплавов. (Ил. 6. Библиогр.: 7 назв.)*

**Ключевые слова:** литейные жаропрочные никелевые сплавы, легирование, количество  $\gamma'$ -фазы, длительная прочность, математическая модель

*The experimental data on the number of  $\gamma'$ -phase and a 100-hour ductility for the 32 known cast Ni-based superalloys, which has different levels of alloying is analyzed. For these alloys the results of calculations the  $\gamma'$ -phase amount and a 100-hour ductility at various temperatures is presented which was obtained by the CALPHAD method. There is received the optimal approximating mathematical models which can be used to ensure high reliability of predicting the strength characteristics for a wide range of Ni-based superalloys.*

**Key words:** casting Ni-based superalloys, alloying,  $\gamma$ -matrix,  $\gamma'$ -phase, parameters of phases stabilities, mathematics' model

### **Введение**

Успешная реализация ряда основных положений теории легирования литейных жаропрочных никелевых сплавов для ответственных деталей газовых турбин в значительной степени связана с точностью определения объемного содержания основной упрочняющей  $\gamma'$ -фазы при разных температурах. Современный подход с использованием аналитических методов расчета по оптимизации составов перспективных сплавов [1–3] и расчета уровня их прочностных характеристик без проведения многочисленных экспериментальных испытаний придает научным исследованиям большую эффективность и экономичность. Поэтому работы в

данном направлении являются перспективными и актуальными.

В настоящее время исследований, посвященных указанной проблеме, недостаточно. В работах многих авторов приводятся экспериментальные данные по количеству  $\gamma'$ -фазы и прочностным характеристикам для большинства известных отечественных и зарубежных литейных жаропрочных никелевых сплавов, например ЖС6К, ЖС6У, ЖС-26, ЖС-32, ВЖМ1, ВЖМ4, PWA1480, CMSX-4, CMSX-10, CMSX-11B, CMSX-11C, Rene N5, N6, TMS-71 и др.

Вместе с тем достоверность прогнозирования характеристик длительной прочности сплавов для разных температур во многом зависит от