

УДК669.162.275

**В. Б. Бубликов**, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., зав. отделом,  
e-mail: otdel.vch@gmail.com

**Ю. Д. Бачинский**, науч. сотр., e-mail: 909\_bach@ukr.net

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА ПО ПЛАВКАМ

*В статье приведены данные по распределению механических свойств (временного сопротивления разрыву, относительного удлинения и ударной вязкости) высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, модифицированного в ковше комплексным модификатором ЖКМК-4Р. Построены кривые Гаусса и проанализировано рассеивание средних для 40 плавок результатов испытаний и распределение показателей механических свойств всех испытаний (по 120 литых и отожженных образцов, соответственно). Указаны перспективные направления совершенствования технологии для повышения механических свойств высокопрочного чугуна.*

**Ключевые слова:** высокопрочный чугун, механические свойства, ковшовое модифицирование, комплексный модификатор, распределение, кривая Гаусса.

Процесс получения высокопрочного чугуна с шаровидным графитом (ВЧ) представляет собой сложную систему, подвергаемую влиянию многочисленных технологических, производственных и других факторов, характер и степень воздействия которых определяют формирование структуры и механических свойств литых изделий. Вследствие неизбежных колебаний значений как контролируемых, так и неконтролируемых факторов производственного процесса наблюдается рассеивание значений механических свойств, которые являются основным показателем качества высокопрочного чугуна. Принятая в стандартах маркировка по минимальному уровню механических свойств (временного сопротивления при разрыве  $\sigma_b$  и относительного удлинения  $\delta$ ) дает неполное представление о высокопрочном чугуне как конструкционном материале. Более полную характеристику механических свойств дает закон распределения, устанавливающий взаимосвязь между возможными значениями показателей и соответствующими им вероятностями [1].

Значительный научный и прикладной интерес представляют данные о распределении значений нерегламентированного стандартом показателя ударной вязкости КС на образцах без надреза по плавкам и о влиянии термической обработки (низкотемпературного графитизирующего отжига) на изменение характера рас-

пределения механических свойств высокопрочного чугуна. С учетом изложенного очевидна актуальность исследования методами статистического анализа механических свойств высокопрочного чугуна в условиях конкретного производственного процесса.

*Цель работы* – исследование закономерностей распределения механических свойств высокопрочного чугуна по плавкам и определение перспективных направлений совершенствования технологии для повышения качества литых изделий.

Методами статистического анализа проанализированы результаты 40 промышленных плавков высокопрочного чугуна. Проведена оценка резко выделяющихся данных, определены границы доверительных интервалов, рассчитаны статистические характеристики, построены гистограммы эмпирических распределений и проведено их сравнение с теоретическими распределениями, которые описываются кривыми Гаусса [1, 2].

Выплавку чугуна проводили в дуговой электропечи ДС-0,5. Шихта состояла из 50 % передельного и литейного чушковых чугунов обычного качества с содержанием 0,02–0,03 % S и 50 % оборотного высокопрочного чугуна. Сфероидизирующее модифицирование чугуна проводили в ковше комплексным модификатором марки ЖКМК-4Р, содержащим (в %мас.): 6,8 Mg; 6,4 Ca; 1,7 PЗМ; 48,3 Si; Fe – остальное. Расход ЖКМК-4Р фракцией 5–20 мм составлял 2,5 % от массы модифицируемого жидкого металла (800 кг). Содержание химических элементов в высокопрочном чугуне регламентировалось в следующих пределах (%мас.): 3,2–3,6 C; 2,4–3,2 Si; ≤0,5 Mn; ≤0,15 Cr; <0,1 P; ≤0,02 S; ≥0,035 Mg. Из металла каждой плавки отливали стандартную клиновидную пробу (с толщиной у основания 25 мм) для определения химического состава, микроструктуры и механических свойств высокопрочного чугуна в литом состоянии и после термической обработки (ферритизирующего отжига) отливок одной плавки совместно с клиновидной пробой. Из полученных в литом состоянии и после отжига клиновидных проб изготавливали по 3 образца для испытаний на растяжение и ударную вязкость. Ферритизирующий отжиг обеспечил увеличение количества феррита в металлической основе до 90–95 %.

На основе представленных в табл. 1–3 данных по рассеиванию значений показателей механических свойств 40 плавков высокопрочного чугуна проанализировано внутриплавочное рассеивание результатов и распределение показателей механических свойств всех испытаний (по 120 образцов для литого и отожженного состояния, соответственно).

*Предел прочности при растяжении  $\sigma_B$* . Внутриплавочное рассеивание оценивали по числу интервалов между минимальным и максимальным значениями данного показателя. Вариационный ряд значений  $\sigma_B$  в литом состоянии (от 440 до 620 МПа) был разделен на 9 интервалов шириной 20 МПа каждый. Среднее значение  $\sigma_{Bcp}$  составило 535,3 МПа. Для 30 плавков получено незначительное внутриплавочное рассеивание  $\sigma_B$  в пределах 1–3 интервалов, в четырех плавках рассеивание составило 4 интервала, в трех – 5, в двух – 6, и в одной – 8 интервалов. Таким образом, большая часть плавков в литом состоянии характеризуется незначительным внутриплавочным рассеиванием значений  $\sigma_B$ , но в отдельных случаях оно имеет тот же порядок, что и межплавочное.

В результате ферритизирующего отжига диапазон рассеивания  $\sigma_B$  (460–560 МПа,  $\sigma_{Bcp,отж.} = 503,0$  МПа) уменьшился до 5 интервалов. В трех случаях внутриплавочное рассеивание было равно предельным значениям межплавочного. Остальные плавки характеризуются весьма близкими значениями внутри- и межплавочного рассеиваний. Это свидетельствует, что в результате ферритизирующего отжига зависимость показателя  $\sigma_B$  от колебаний в плавках технологических параметров значительно уменьшается.

*Относительное удлинение  $\delta$* . Вариационный ряд значений  $\delta$  в литом состоянии (3–23 %) был разделен на 10 интервалов шириной 2 % каждый. Среднее значение  $\delta_{cp}$  составило 12,2 %. В 25 плавках получено рассеивание в пределах 1–3 интервалов, в четырех плавках рассеивание составило 4 интервала, в шести – 5, в двух – 6, в одной – 8, и в двух – 9 интервалов. Если сравнивать рассеивание значений  $\sigma_B$  и  $\delta$ ,

Таблица 1  
Распределение значений временного сопротивления разрыву  $\sigma_B$

Но- мер пла- вки	Количество* образцов в интервале значений прочности $\sigma_B$ , МПа								
	440–460	460–480	480–500	500–520	520–540	540–560	560–580	580–600	600–620
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	–	–	0/3	–	–	3/0	–	–	–
2	–	–	–	0/1	1/0	0/2	–	2/0	–
3	–	0/1	–	1/1	2/1	–	–	–	–
4	–	0/1	1/1	0/1	1/0	1/0	–	–	–
5	–	–	0/1	1/1	1/1	1/0	–	–	–
6	–	0/1	0/1	3/0	0/1	–	–	–	–
7	–	–	0/1	–	3/2	–	–	–	–
8	1/0	–	0/1	1/1	0/1	1/0	–	–	–
9	–	–	0/1	2/1	1/0	0/1	–	–	–
10	–	0/2	1/1	1/0	1/0	–	–	–	–
11	–	–	0/1	0/1	1/0	2/1	–	–	–
12	–	0/1	0/2	–	3/0	–	–	–	–
13	–	0/1	–	2/1	1/1	–	–	–	–
14	–	–	0/1	1/1	1/1	1/0	–	–	–
15	–	0/2	0/1	–	2/0	1/0	–	–	–
16	–	0/3	–	–	1/0	1/0	1/0	–	–
17	–	0/2	0/1	–	3/0	–	–	–	–
18	1/0	0/1	–	0/1	–	1/1	–	1/0	–
19	–	0/2	0/1	–	–	1/0	1/0	1/0	–
20	–	–	0/2	0/1	–	–	–	1/0	2/0
21	–	–	1/0	2/2	0/1	–	–	–	–
22	–	–	0/3	–	2/0	1/0	–	–	–
23	–	–	0/3	–	2/0	1/0	–	–	–
24	–	–	1/1	0/2	1/0	1/0	–	–	–
25	–	–	–	–	0/3	1/0	1/0	1/0	–
26	–	–	–	–	1/2	0/1	–	2/0	–
27	–	–	–	0/3	1/0	–	1/0	–	1/0
28	–	–	–	0/3	1/0	–	2/0	–	–
29	–	–	0/1	0/2	3/0	–	–	–	–
30	–	0/1	0/2	1/0	1/0	1/0	–	–	–
31	–	–	0/1	–	3/2	–	–	–	–
32	–	–	0/1	0/1	3/1	–	–	–	–
33	–	–	–	0/1	3/2	–	–	–	–
34	–	0/1	–	–	0/2	3/0	–	–	–
35	–	–	–	3/1	0/1	0/1	–	–	–

**Продолжение таблицы 1**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
36	–	1 / 1	1 / 0	–	0 / 1	1 / 1	–	–	–
37	1 / 0	0 / 1	1 / 0	–	1 / 0	0 / 2	–	–	–
38	1 / 0	–	0 / 3	–	–	1 / 0	–	1 / 0	–
39	–	0 / 2	0 / 1	–	–	–	2 / 0	1 / 0	–
40	–	0 / 1	0 / 2	–	3 / 0	–	–	–	–
Σ	4 / 0	1 / 24	6 / 37	18 / 26	47 / 23	23 / 10	8 / 0	10 / 0	3 / 0

\*в числителе – количество значений в литом состоянии, в знаменателе – после отжига

**Таблица 2**

**Распределение значений относительного удлинения  $\delta$**

Но- мер- плав- ки	Количество образцов в интервале значений пластичности $\delta$ , %										
	3,0– 5,0	5,0– 7,0	7,0– 9,0	9,0– 11,0	11,0– 13,0	13,0– 15,0	15,0– 17,0	17,0– 19,0	19,0– 21,0	21,0– 23,0	23,0– 25,0
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	–	–	–	1 / 0	2 / 0	0 / 1	0 / 1	–	0 / 1	–	–
2	–	1 / 1	–	0 / 1	1 / 1	1 / 0	–	–	–	–	–
3	–	–	–	–	1 / 0	–	–	0 / 1	1 / 1	1 / 1	–
4	–	–	–	1 / 0	1 / 2	0 / 1	–	–	1 / 0	–	–
5	–	–	–	–	1 / 0	1 / 2	1 / 0	0 / 1	–	–	–
6	–	–	–	–	–	1 / 1	1 / 0	1 / 1	–	0 / 1	–
7	–	–	–	–	1 / 1	1 / 0	–	1 / 0	0 / 1	0 / 1	–
8	–	1 / 0	–	–	1 / 1	1 / 0	0 / 2	–	–	–	–
9	–	–	3 / 1	–	0 / 1	–	–	0 / 1	–	–	–
10	–	–	1 / 1	–	1 / 1	–	1 / 1	–	–	–	–
11	–	–	–	1 / 0	0 / 1	2 / 0	0 / 1	–	–	0 / 1	–
12	–	–	–	0 / 1	–	1 / 0	1 / 1	1 / 1	–	–	–
13	–	–	–	3 / 0	–	0 / 1	–	–	0 / 2	–	–
14	–	–	–	1 / 0	1 / 0	1 / 0	0 / 1	–	–	0 / 1	0 / 1
15	–	1 / 0	2 / 0	0 / 1	0 / 1	–	0 / 1	–	–	–	–
16	–	–	1 / 0	1 / 0	–	0 / 3	1 / 0	–	–	–	–
17	–	–	1 / 0	–	0 / 1	1 / 1	1 / 0	–	0 / 1	–	–
18	–	2 / 0	–	1 / 0	0 / 1	–	0 / 1	0 / 1	–	–	–
19	–	–	–	1 / 0	1 / 0	–	1 / 0	0 / 1	0 / 1	0 / 1	–
20	1 / 0	1 / 0	–	–	–	–	0 / 1	–	1 / 2	–	–
21	–	–	–	–	2 / 0	0 / 2	1 / 1	–	–	–	–
22	–	–	–	–	3 / 0	0 / 1	–	0 / 1	0 / 1	–	–
23	–	–	–	2 / 0	1 / 1	0 / 2	–	–	–	–	–
24	–	–	–	–	2 / 2	1 / 0	0 / 1	–	–	–	–
25	–	–	–	–	2 / 0	1 / 0	–	0 / 1	0 / 1	0 / 1	–
26	–	1 / 0	–	1 / 0	1 / 0	0 / 1	0 / 1	1 / 0	–	–	–

**Продолжение таблицы 2**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
27	1/0	-	-	1/0	-	0/1	-	1/0	0/1	0/1	-
28	-	-	-	1/0	-	1/1	1/0	0/1	-	0/1	-
29	-	-	-	-	1/2	1/0	1/1	-	-	-	-
30	-	-	0/1	1/0	2/2	-	-	-	-	-	-
31	-	-	-	0/1	-	-	-	-	2/0	1/2	-
32	-	-	0/1	-	-	-	-	-	1/2	2/0	-
33	-	-	0/1	0/1	-	2/0	1/0	-	-	-	0/1
34	-	1/0	-	1/0	-	0/1	-	0/1	0/1	1/0	-
35	-	1/0	2/0	-	0/3	-	-	-	-	-	-
36	-	0/1	-	3/0	-	0/2	-	-	-	-	-
37	-	-	1/0	1/0	-	1/3	-	-	-	-	-
38	-	-	-	1/0	2/2	0/1	-	-	-	-	-
39	-	-	2/0	1/0	0/1	0/1	0/1	-	-	-	-
40	-	1/0	1/0	1/0	0/1	0/1	-	-	-	-	-
Σ	2/0	10/2	14/5	23/6	27/25	18/26	11/15	4/12	6/15	5/12	0/2

**Таблица 3**

**Распределение значений ударной вязкости КС**

Но- мер плав- ки	Количество образцов в интервале значений ударной вязкости КС, Дж/см <sup>2</sup>													
	10- 20	20- 30	30- 40	40- 50	50- 60	60- 70	70- 80	80- 90	90- 100	100- 110	110- 120	120- 130	130- 140	140- 150
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13	13	14	15
1	3/0	-	-	-	-	-	-	-	0/1	-	-	0/1	-	0/1
2	-	1/0	1/0	1/0	-	-	0/2	0/1	-	-	-	-	-	-
3	-	-	1/0	1/0	-	1/0	-	-	-	-	0/3	-	-	-
4	-	1/0	2/0	-	-	-	-	0/1	0/2	-	-	-	-	-
5	-	-	2/0	1/0	-	-	-	0/1	0/1	-	0/1	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	2/1	-	1/0	-	0/1	-	0/1	-
7	-	-	-	1/0	-	1/0	-	-	1/0	-	0/2	0/1	-	-
8	-	1/0	-	2/0	-	-	-	0/1	0/2	-	-	-	-	-
9	-	-	1/0	2/0	-	-	-	0/1	0/2	-	-	-	-	-
10	-	2/0	1/0	-	-	-	-	-	0/2	0/1	-	-	-	-
11	1/0	2/0	-	-	-	-	-	0/1	0/1	0/1	-	-	-	-
12	2/0	1/0	-	-	-	-	-	-	-	-	0/1	0/2	-	-
13	-	-	-	3/0	-	-	-	-	-	0/1	-	-	0/2	-
14	-	-	1/0	1/0	1/0	-	-	-	-	0/1	0/1	-	0/1	-
15	-	2/0	1/0	-	-	-	-	-	-	0/2	0/1	-	-	-
16	1/0	-	2/0	-	-	-	0/1	-	0/1	0/1	-	-	-	-
17	-	2/0	1/0	-	-	0/1	0/1	0/1	-	-	-	-	-	-
18	2/0	-	1/0	0/1	0/2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	2/0	1/0	-	-	-	-	-	0/1	0/2	-	-	-	-	-

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
20	3/0	-	-	-	0/1	-	-	0/2	-	-	-	-	-	-
21	-	-	1/0	1/0	1/0	-	-	-	-	0/1	0/2	-	-	-
22	-	1/0	-	2/0	-	-	-	-	-	-	0/2	0/1	-	-
23	1/0	2/0	-	-	-	-	-	0/1	0/1	-	-	0/1	-	-
24	-	-	3/0	-	-	0/1	0/1	0/1	-	-	-	-	-	-
25	-	2/0	1/0	-	-	0/1	0/1	0/1	-	-	-	-	-	-
26	1/0	2/0	-	-	-	-	-	0/2	0/1	-	-	-	-	-
27	-	1/0	2/0	-	-	0/1	-	0/2	-	-	-	-	-	-
28	-	1/0	1/0	1/1	0/1	0/1	-	-	-	-	-	-	-	-
29	1/0	-	2/0	0/1	-	-	0/1	0/1	-	-	-	-	-	-
30	1/0	-	2/0	-	-	-	0/1	0/1	-	-	0/1	-	-	-
31	-	-	1/0	1/1	1/1	0/1	-	-	-	-	-	-	-	-
32	-	-	1/0	2/1	-	0/1	-	0/1	-	-	-	-	-	-
33	1/0	1/0	-	1/0	-	-	0/3	-	-	-	-	-	-	-
34	3/0	-	-	-	-	-	-	-	-	0/3	-	-	-	-
35	1/0	2/0	-	0/2	0/1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
36	-	1/0	-	2/1	0/1	-	-	0/1	-	-	-	-	-	-
37	2/0	1/0	-	0/1	0/2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
38	2/0	1/0	-	-	-	-	0/1	-	-	0/2	-	-	-	-
39	1/0	-	-	2/0	-	0/1	-	0/2	-	-	-	-	-	-
40	3/0	-	-	0/3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Σ	31/0	28/0	28/0	24/12	3/9	2/8	2/13	0/23	2/16	0/13	0/15	0/6	0/4	0/1

то последнее характеризуется большими внутриплавочными отклонениями и менее выраженным группированием результатов испытаний в средних интервалах вариационного ряда.

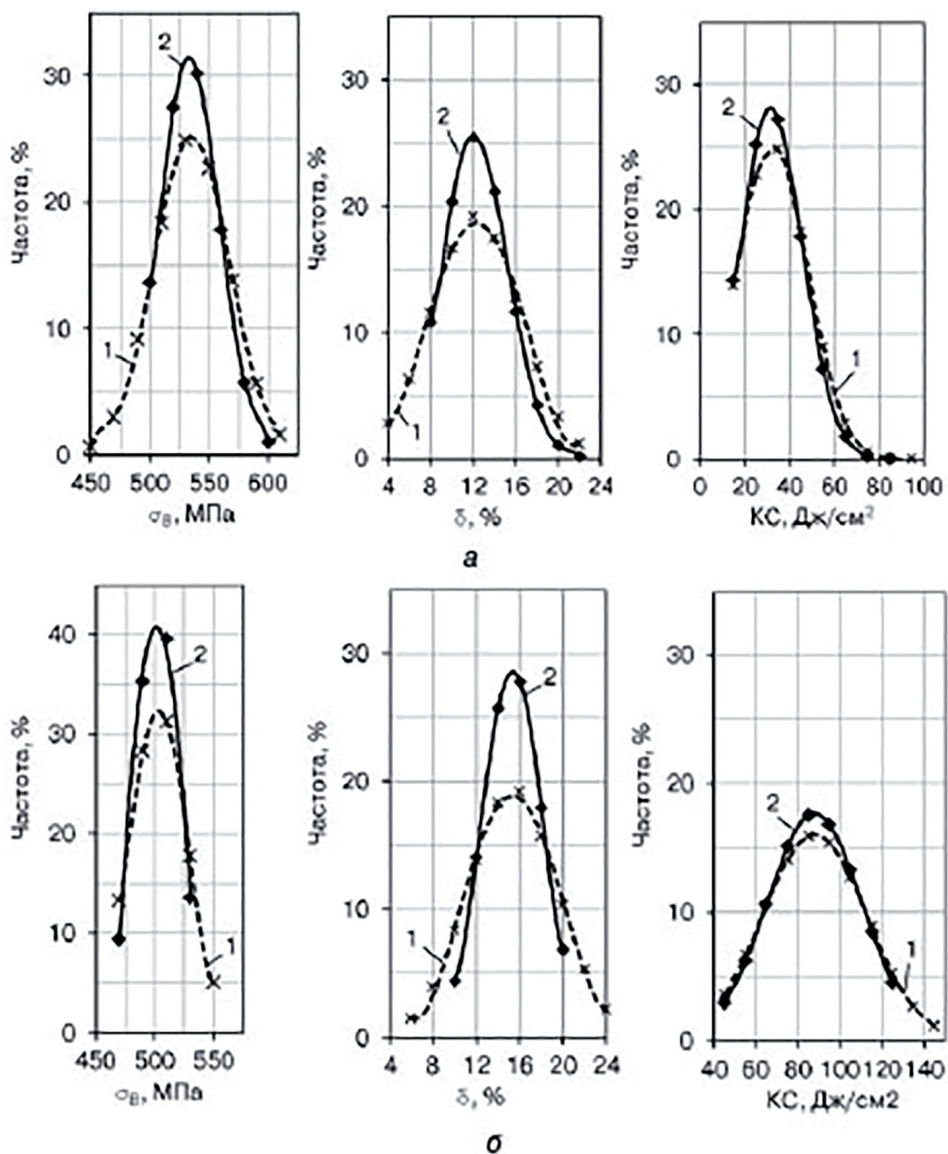
После отжига относительное удлинение увеличилось. Диапазон рассеивания составил 5–25 %, а  $\delta_{\text{ср.отж}} = 15,4$  %. Увеличилось также внутриплавочное рассеивание: в 26 плавках рассеивание значений  $\delta$  находилось в пределах 3–5 интервалов, в трех плавках – разброс в пределах 1 интервала, в четырех – 2, в четырех – 6, в двух – 7, в одной – 9. Наблюдаемое значительное рассеивание полученных значений  $\delta$  очевидно обусловлено не только влиянием колебаний факторов производственного процесса, но и, в значительной мере, природой высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, как особого вида железоуглеродистого сплава со специфичным механизмом разрушения, по сравнению со сталью. Если при испытаниях на растяжение стали металл под действием приложенной нагрузки «течет» (образует характерную суживающуюся шейку), то при испытаниях ВЧ, наряду с появлением определенной (но значительно меньшей, чем у стали) текучести, начинается процесс зарождения и развития трещин, обусловленный присутствием в структуре включений шаровидного графита. После разрушения образцов в изломе обнаруживаются трещины, степень развития которых к моменту разрушения образца, видимо, и определяет значительное рассеивание значений  $\delta$ .

Ударная вязкость КС. Вариационный ряд полученных значений КС в литом состоянии (10–100 Дж/см<sup>2</sup>) был разделен на 9 интервалов шириной 10 Дж/см<sup>2</sup>. Среднее значение КС<sub>ср</sub> составило 32,2 Дж/см<sup>2</sup>. Для 36 плавков получено незначительное внутриплавочное рассеивание КС в пределах 1–3 интервалов, в одной плавке рассеивание составило 6 интервалов, в трех – 4 интервала. Наблюдается тесное

группирование значений в первых четырех интервалах вариационного ряда, то есть с невысокими значениями ударной вязкости.

В результате отжига ударная вязкость значительно увеличилась, диапазон рассеивания составил 40–150 Дж/см<sup>2</sup>, а  $KC_{\text{ср.отж.}} = 87,8 \text{ Дж/см}^2$  (в 2,7 раза выше по сравнению с литым состоянием). Внутриплавочное рассеивание возросло. Для 27 плавков характерно рассеивание в пределах 1–3 интервалов. Максимальное внутриплавочное рассеивание составило 7 интервалов. Существенно увеличилось и межплавочное рассеивание. Из изложенного следует, что величина ударной вязкости высокопрочного чугуна после ферритизирующего отжига в значительной мере зависит от колебаний технологических факторов, определяющих металлургическое качество исходного расплава и стабильность результатов его модифицирующей обработки.

На рисунке представлены кривые нормального распределения (кривые Гаусса) показателей механических свойств в литом и отожженном состоянии



Кривые нормального распределения механических свойств высокопрочного чугуна в литом состоянии (а) и после отжига (б): 1 – для всех результатов испытаний; 2 – для средних по плавкам значений

всех испытанных образцов (120 разрывных и 120 ударных). Для сравнения также представлены кривые нормального распределения среднего арифметического (по результатам испытаний трех образцов) показателя механических свойств по каждой плавке.

Анализ полученных закономерностей показывает, что в результате усреднения результатов испытаний литых образцов диапазон рассеивания сужается и значительно увеличиваются минимальные значения показателей  $\sigma_B$  и  $\delta$ . В результате отжига достигается дальнейшее сужение интервала рассеивания этих показателей и повышение минимального значения относительного удлинения  $\delta$  до 9%. Распределения значений ударной вязкости КС всех испытаний и средних по плавке отличаются незначительно.

Перспективными направлениями совершенствования технологии для повышения механических свойств высокопрочного чугуна являются:

- улучшение качества исходного расплава путем применения низкосернистых шихтовых материалов (рафинированных, литейных, передельных чугунов, стальных отходов с содержанием серы менее 0,015 %) и проведения предмодифицирующей обработки графитизирующими реагентами;
- применение высокоэффективного внутриформенного модифицирования для повышения степени инокуляции и графитизации, а также однородности структуры отливок.

Реализация предлагаемых технологических мероприятий обеспечит улучшение структурообразования и значительное повышение механических свойств изделий из высокопрочного чугуна (в первую очередь относительного удлинения и ударной вязкости), позволит значительно сузить диапазон рассеивания результатов испытаний. Наряду с этим, повышение качества исходного расплава позволит также снизить расход комплексного модификатора в 1,5–2,0 раза.

### Выводы

В литом состоянии большая часть плавков характеризуется незначительным внутриплавочным рассеиванием значений временного сопротивления разрыву  $\sigma_B$ , но в ряде случаев оно имеет тот же порядок, что и межплавочное. После отжига рассеивание  $\sigma_B$  уменьшается почти в 2 раза, внутриплавочное рассеивание приближается к межплавочному. Это свидетельствует о том, что рассеивание результатов испытаний в данном случае мало зависит от колебаний производственных факторов.

В отличие от  $\sigma_B$ , относительное удлинение  $\delta$  в литом состоянии характеризуется широким диапазоном внутриплавочного рассеивания и менее выраженным группированием результатов в средних интервалах вариационного ряда. После отжига среднее значение  $\delta$  повышается в 1,3 раза при одновременном увеличении внутриплавочного рассеивания. Это явление связано с различными механизмами разрушения чугуна с шаровидным графитом и стали.

Большая часть плавков в литом состоянии характеризуется незначительным рассеиванием ударной вязкости КС и тесным группированием результатов в интервалах с невысокими значениями. В результате отжига ударная вязкость возрастает в среднем в 2,7 раза, по сравнению с литым состоянием, при этом увеличивается как внутриплавочное, так и межплавочное рассеивание.

### Список литературы

1. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. – М.: Наука, 1969. – 512 с., ил.
2. Степнов М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с., ил.

Поступила 10.08.2018



## References

1. Smirnov, N.V., Dunin-Barkovskij, I.V. (1969). Course of probability theory and mathematical statistics for technical applications. Moscow: Nauka. [in Russian].
2. Stepanov, M.N. (1985). Statistical methods of mechanical test results processing: Handbook. Moscow: Mashinostroenie. [in Russian].

Received 10.08.2018

**В. Б. Бубликов**, д-р техн. наук, ст. наук. співр., зав. відділу,  
e-mail: ot.del.vch@gmail.com

**Ю. Д. Бачинский**, наук. співр., e-mail: 909\_bach@ukr.net  
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

## ОСОБЛИВОСТІ РОЗПОДІЛУ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ ПО ПЛАВКАХ

*У статті наведено дані щодо розподілу механічних властивостей (тимчасового опору розриву, відносного подовження і ударної в'язкості) високоміцного чавуну з кулястим графітом, модифікованого у ковші комплексним модифікатором ЖКМК-4Р. Побудовано криві Гауса і проаналізовано розсіювання середніх для 40 плавок результатів випробувань і розподіл показників механічних властивостей усіх випробувань (по 120 литих і відпалених зразків, відповідно). Вказані перспективні напрями вдосконалення технології для підвищення механічних властивостей високоміцного чавуну.*

**Ключові слова:** високоміцний чавун, механічні властивості, ковшове модифікування, комплексний модифікатор, розподіл, крива Гауса.

**V. B. Bublikov**, Doctor of Technical Sciences, Senior Research Fellow, Department Chair, e-mail: ot.del.vch@gmail.com

**Yu. D. Bachynskyi**, Research Fellow, e-mail: 909\_bach@ukr.net

Physico-technological Institute of Metals and Alloys NAS of Ukraine, Kyiv

## FEATURES OF DUCTILE CAST IRON MECHANICAL PROPERTIES DISTRIBUTION IN MELTS

*Data on the distribution of mechanical properties (tensile strength, elongation and impact strength) of nodular graphite cast iron modified in the ladle with the complex modifier ЖКМК-4Р (FeSiMg-Ca-4RE) are given in the article. The Gaussian curves are constructed and the scattering of 40 melts average test results and the mechanical properties distribution of all the tests (120 cast and annealed samples, respectively) are analyzed. Prospective directions of technology improving for increasing of ductile cast iron mechanical properties are indicated.*

**Keywords:** ductile cast iron, mechanical properties, ladle modifying, complex modifier, distribution, Gaussian curve.