

ЧУГУН С ВЕРМИКУЛЯРНЫМ ГРАФИТОМ

- 1. Введение**
- 2. Стандарты и структура**
- 3. Управление ходом реакции**
- 4. Выбор модификаторов**
- 5. Модификаторы производства Toyo Denka Kogyo**

1. ВВЕДЕНИЕ

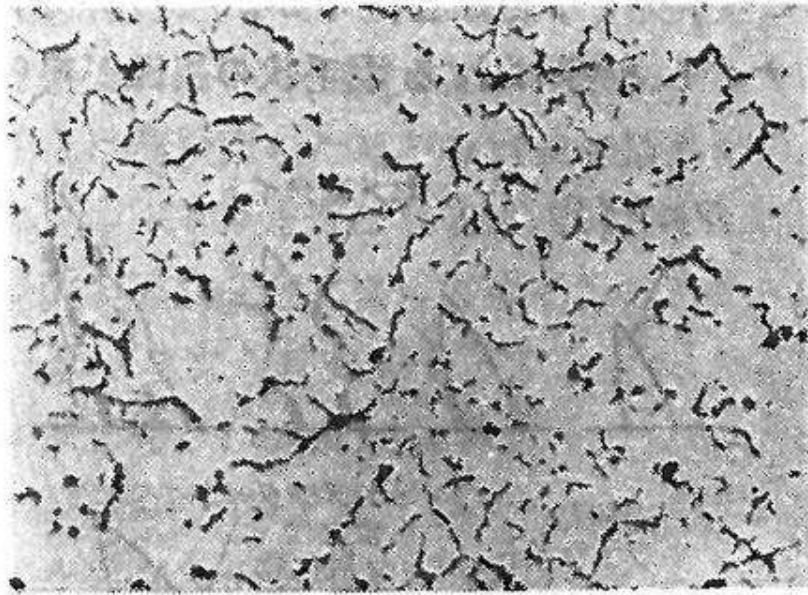


Рис. 1. Промежуточная структура графита
(сопротивление на разрыв 407 МПа, коэф. удлинения 6,2%)
(X50 б/травления)

Как известно, первые образцы вермикулярной структуры графита в чугунах были получены при экспериментах над переходными формами графита между пластинчатым и шарообразным состояниями, [Рис. 1](#). Незавершенность реакции образования сферроподобных структур в различных случаях может быть объяснено как химсоставом модификаторов, так и определенными условиями реакции. Подобные промежуточные структурные формы графита получили наименование вермикулярных (vermicular- «червеобразный») или «компактных». Преимуществами чугуна с промежуточными формами (вермикулярного) графита (ЧВГ) являются как сопротивление разрыву не менее 300 МПа, достаточно удовлетворительный коэффициент удлинения, так и хорошая отливаемость (малое число раковин, малая пористость).

Современные стандарты на ЧВГ были установлены в 1979 г. Международным технологическим литейным комитетом. С того же года к разработке собственных стандартов и оптимальных способов производства ЧВГ приступила Японская ассоциация литейных производств.

ФОРМИРОВАНИЕ ВЕРМИКУЛЯРНОГО ГРАФИТА

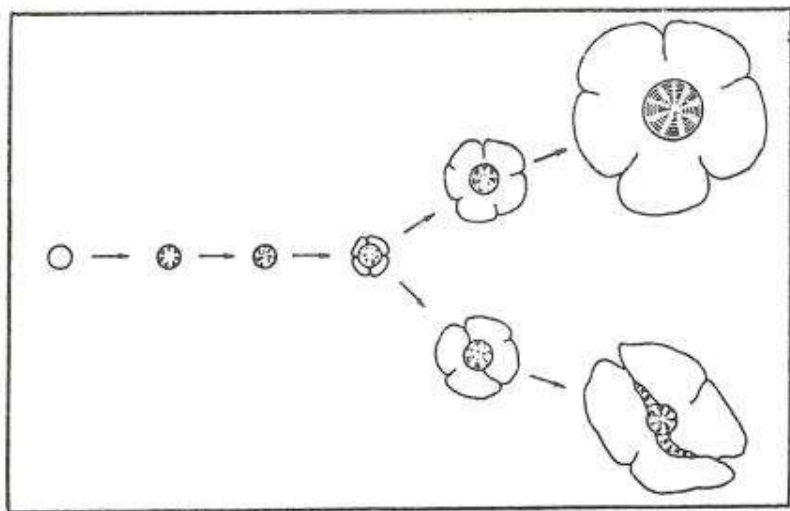


Рис. 2. Примерный ход процесса формирования вермикулярных структур

Как видно из Рис. 2, в момент начала модификации структура графита одинакова во всех местах расплава. При контакте графитового зерна с гамма-железом (γ -Fe) возникает эффект «окружения» зерна частицами гамма-железа и изоляции от основной массы расплава.

Содержащиеся в расплаве молекулы алюминия, титана, серы и других понижающих температуру плавления элементов образуют на границах гамма-решетки легкоплавкие зоны, через которые шарообразная структура контактирует с соседней. В результате эффекта «протекания» образуются длинные (червеобразные) цепочки.

Процесс формирования вермикулярного графита на первоначальном этапе сходен с процессом формирования шарообразной структуры, но из-за особенностей строения гамма-решетки железа процесс приводит к плоским вытянутым (червеобразным) формам графитной структуры.

2. СТАНДАРТЫ И СТРУКТУРА

Табл.1 Обозначение марок чугунов с вермикулярным графитом в различных стандартах.

ISO 16112 ^[1]	ASTM A842-11 ^[2]	EN 16079 ^[3]	JIS G 5505 ^[4]	GB/T 26655-2011 ^[5]	SAE J1887 ^[6]	GOST 28394-89 ^[7]
ISO 16112/JV/300	300	EN-GJV-300	FCV 300	RuT300A	C300	ЧВГ30
ISO 16112/JV/350	350	EN-GJV-350	FCV 350	RuT350A	C350	ЧВГ35
ISO 16112/JV/400	400	EN-GJV-400	FCV 400	RuT400A	C400	ЧВГ40
ISO 16112/JV/450	450	EN-GJV-450	FCV 450	RuT450A	C450	ЧВГ45
ISO 16112/JV/500	-	EN-GJV-500	FCV 500	RuT500A	-	-

[1] ISO 16112, *Compacted (vermicular) graphite cast irons — Classification*

[2] ASTM A842-11, *Standard specification for compacted graphite iron castings*

[3] EN 16079, *Founding — Compacted (vermicular) graphite cast irons*

[4] JIS G 5505, *Compacted (vermicular) graphite cast irons*

[5] GB/T 26655-2011, *Compacted (vermicular) graphite cast irons*

[6] SAE J1887, *Automotive compacted graphite iron castings*

[7] GOST 28394-89, *Vermicular graphite iron for castings. Grades*

Таблица 2. Стандартные нормы механических свойств чугуна с вермикулчрным графитом

Стандарт	Марки	Сопротивление на разрыв, МПа	Предел текучести, МПа	Коэффициент Удлинения %	Твердость, НВ	Диаметр отпечатка по Бринеллю
ISO 16112 ^[1]	-	-	-	-	-	-
ASTM A842-11 ^[2]	Grade 250	250	175	3,0	179 макс.	4.50 мин.
JIS G 5505 ^[4]	FCV 250	-	-	-	-	-
GOST 28394-89 ^[7]	ЧВГ 25	-	-	-	-	-
ISO 16112	JV/300	300	210	2,0	140~210	-
ASTM A842-11	Grade 300	300	210	1,5	143~207	5.0 ~ 4.2
JIS G 5505	FCV 300	300	210	2,0	140~210	-
GOST 28394-89	ЧВГ 30	300	240	3,0	130~180	-
ISO 16112	JV/350	350	245	1,5	160~220	-
ASTM A842-11	Grade 350	350	245	1,0	163~229	4.7~4.0
JIS G 5505	FCV 350	350	245	1,5	150~220	-
GOST 28394-89	ЧВГ 35	350	260	2,0	140~190	-
ISO 16112	JV/400	400	280	1,0	180 ~ 240	-
ASTM A842-11	Grade 400	400	280	1,0	197 ~ 255	4.3 ~ 3.8
JIS G 5505	FCV 400	400	280	1,0	160 ~ 240	-
GOST 28394-89	ЧВГ 40	400	320	1,5	170 ~ 220	-
ISO 16112	JV/450	450	315	1,0	200~250	-
ASTM A842-11	Grade 450	450	315	1,0	207~269	4.2 ~ 3.7
JIS G 5505	FCV 450	450	315	1,0	170~250	-
GOST 28394-89	ЧВГ 45	450	380	0,8	190~250	-
ISO 16112	JV/500	500	350	0,5	220~260	-
ASTM A842-11	-	-	-	-	-	-
JIS G 5505	FCV 500	500	360	0,5	180~260	-
GOST 28394-89	-	-	-	-	-	-

СОРТА ВЕРМИКУЛЯРНОГО ГРАФИТА.

FCV250

FCV300

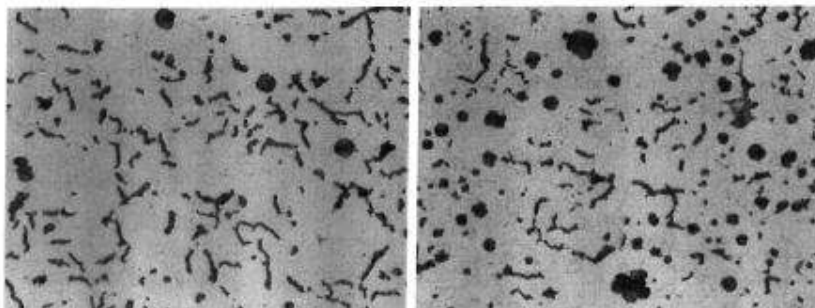


Рис.3

Рис. 4

	Стандарт	Образец	Фотография							
Рис. 3	FCV250	ФормаУ ТипВ 900°С × 2Н, охлажд. печи	× 100	Травление 3% нитал						
Рис. 4	FCV300	ФормаУ ТипВ	× 100	Травление 3% нитал						
	Коэффициент модификации (%)	Зернистость на 1 кв. мм.	Размер зерна, мкм	Площадь графита, %	Площадь перлита, %					
					Р	Рf				
Рис. 3	40	192	39	12,0	0	0				
Рис. 4	45	222	47	13,9	3,2	3,7				
	Хим. состав						Сопр-ние на разрыв, МПа	Проверочные напряжения МПа	Коэф. Удлинения, %	Прочность НВ
	С	Si	Mn	P	S	Mg				
Рис. 3	3,63	2,33	0,20	0,019	0,009	0,018	304	192	13,0	148
Рис. 4	3,65	2,75	0,20	0,020	0,009	0,016	334	205	11,8	166

СОРТА ВЕРМИКУЛЯРНОГО ГРАФИТА.

FCV300

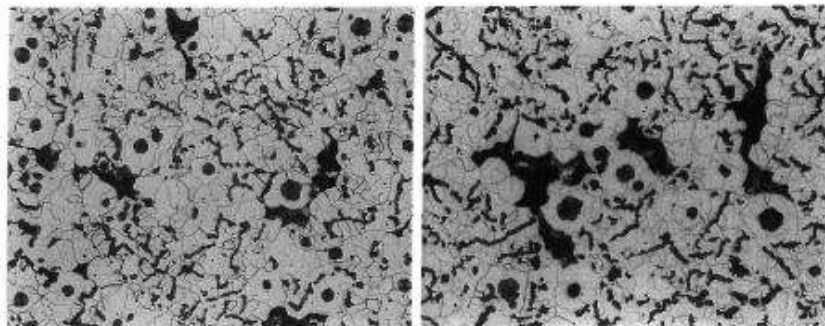


Рис.5

Рис. 6

	Стандарт	Образец	Фотография	
Рис. 5	FCV300	ФормаУ ТипВ	× 100	Травление 3% нитал
Рис. 6	FCV300	ФормаУ ТипВ	× 100	Травление 3% нитал

	Коэффициент модификации (%)	Зернистость на 1 кв. мм.	Размер зерна, мкм	Площадь графита, %	Площадь перлита, %	
					P	Pf
Рис. 5	37	308	40	13,6	6,7	7,3
Рис. 6	32	180	33	13,2	8,7	10,0

	Хим. состав						Сопр-ние на разрыв, МПа	Проверочные напряжения, МПа	Коэф. Удлинения, %	Прочность НВ
	C	Si	Mn	P	S	Mg				
Рис. 5	3, 65	2,80	0,21	0,028	0,011	0,014	350	279	6,4	161
Рис. 6	3, 60	2,68	0,20	0,038	0,014	0,015	329	233	4,4	163

СОРТА ВЕРМИКУЛЯРНОГО ГРАФИТА.

FCV350

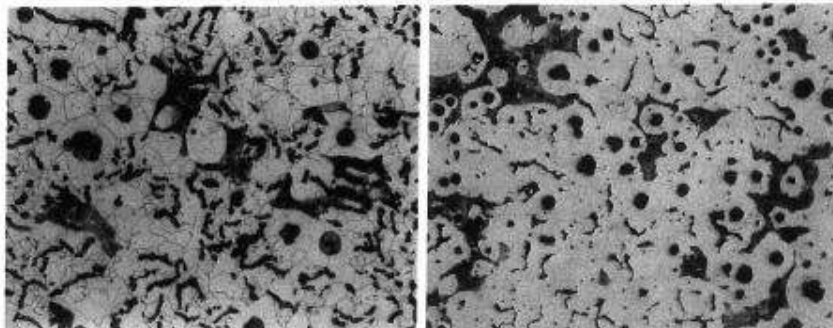
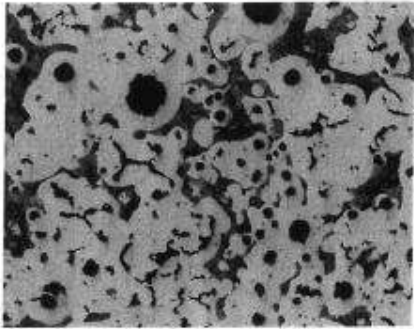
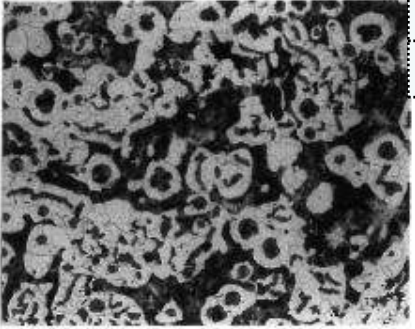


Рис. 7

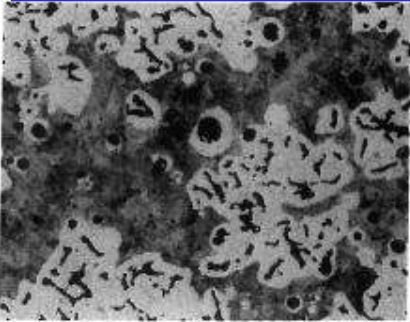
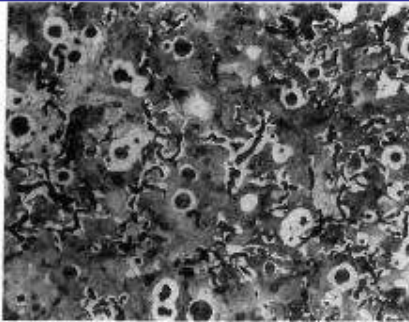
Рис. 8

	Стандарт	Образец	Фотография							
			Увеличение	Травление	Метод	Масштаб				
Рис. 7	FCV350	ФормаУ ТипВ	× 100	Травление 3% нитал						
Рис. 8	FCV350	Приливная заготовка ø25	× 100	Травление 4% пикрал						
	Коэффициент модификации (%)	Зернистость на 1 кв. мм.	Размер зерна, мкм	Площадь графита, %	Площадь перлита, %					
					P	Pf				
Рис. 7	44	206	41	13,5	14,0	16,3				
Рис. 8	74(60)	196	-	20,5	28,6	36,0				
	Хим. состав						Сопр-ние на разрыв, МПа	Проверочные напряжения МПа	Коэф. Удлинения, %	Прочность НВ
	C	Si	Mn	P	S	Mg				
Рис. 7	3,69	2,71	0,20	0,019	0,009	0,017	371	223	10,6	170
Рис. 8	3,69	2,57	0,46	0,045	0,012	0,012	416	269	6	159

СОРТА ВЕРМИКУЛЯРНОГО ГРАФИТА.

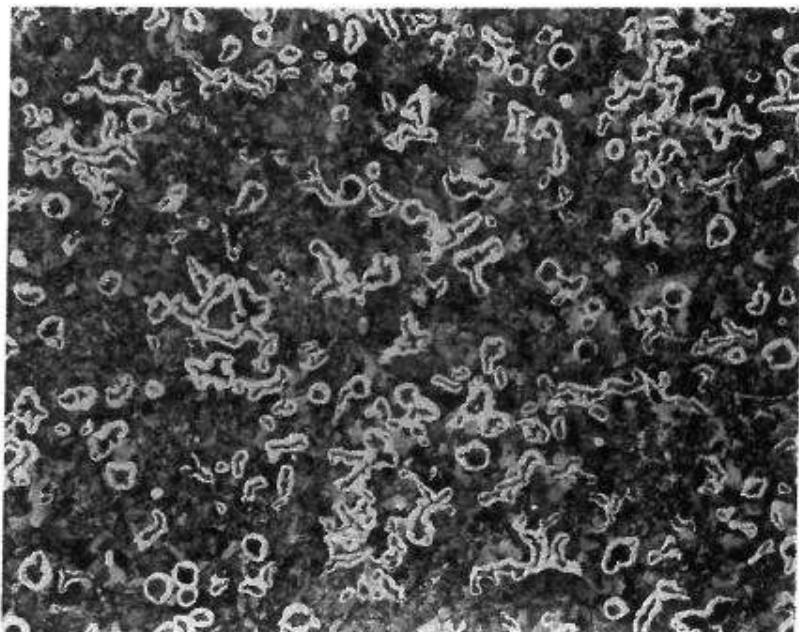
FCV350		FCV400		Стандарт	Образец	Фотография						
 ×100	 ×100	Рис. 9	FCV350	Приливная заготовка ø25	× 100	Травление 4% пикрал						
		Рис. 10	FCV400	ФормаУ ТипВ	× 100	Травление 3% нитал						
			Коэффициент модификации (%)	Зернистость на 1 кв. мм.	Размер зерна, мкм	Площадь графита, %	Площадь перлита, %					
		Рис. 9	58(46)	168	-	14,1	Р	Pf				
		Рис. 10	41	261	30	12,0	38,0	43,0				
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> Рис. 9 Рис. 10 </div>		Хим. состав				Сопр-ние на разрыв, МПа	Проверочные напряжения МПа	Коэф. Удлинения %	Прочность НВ			
		C	Si	Mn	P					S	Mg	Ca
Рис. 9		3,86	2,57	0,52	0,045	0,012	0,014	-	409	263	7	170
Рис. 10		3,73	2,72	0,20	0,019	0,008	0,019	0,49	438	266	6,4	196

СОРТА ВЕРМИКУЛЯРНОГО ГРАФИТА.

FCV450		Стандарт	Образец	Фотография									
		Рис. 11	FCV450	Форма Y Тип В	× 100	Травление 3% нитал							
		Рис. 12	FCV450	Форма Y Тип В 900°C × 2Н, охлаж. воздухом	× 100	Травление 3% нитал							
			Коэффициент модификации (%)	Зернистость на 1 кв. мм.	Размер зерна, мкм	Площадь графита, %	Площадь перлита, %						
		Рис. 11	46	186	28	11,8	Р	Рf					
		Рис. 12	45	215	28	12,1	71	80					
Рис. 11	Рис. 12	Хим. состав							Сопр-ние на разрыв, МПа	Проверочные напряжения, МПа	Коэф. Удлинения, %	Прочность НВ	
		С	Si	Mn	P	S	Mg	Ca					Sn
Рис. 11		3,62	2,92	0,26	0,024	0,005	0,019	-	0,040	481	322	2,8	206
Рис. 12		3,73	2,61	0,20	0,026	0,010	0,019	0,49	0,045	558	435	3,4	237

СОРТА ВЕРМИКУЛЯРНОГО ГРАФИТА.

FCV450



× 100

Рис. 13

	Стандарт	Образец	Фотография									
Рис. 13	FCV450	ФормаУ ТипВ	× 100	Травление 3% нитал								
	Коэффициент модификации (%)	Зернистость на 1 кв. мм.	Размер зерна, мкм	Площадь графита, %	Площадь перлита, %							
Рис. 13	41	268	30	11,6	Р	Рf						
	Хим. состав											
	С	Si	Mn	P	S	Mg	Ca	Sn	Сопр-ние на разрыв, МПа	Проверочные напряжения МПа	Коэф. Удлинения, %	Прочность НВ
Рис. 13	3,73	2,72	0,20	0,019	0,008	0,019	1,08	0,044	538	317	2,2	265

Таблица 3. Диапазон изменения химического состава ЧВГ в ГОСТ и химический состав показанных ранее образцов.

Марка чугуна	Массовая доля элементов, %							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	$\frac{Mg^*}{\Sigma RE}$
ЧВГ 30	3,5~3,8	2,2~3,0	0,2~0,6	До 0,08	До 0,025	До 0,15	-	$\frac{0,015~0,028}{0,10~0,20}$
FCV 300	3,60~3,65	2,68~2,80	0,20~0,21	0,020~0,038	0,009~0,014	-	-	0,014~0,016
ЧВГ 35	3,5~3,8	2,2~2,8	0,2~0,6	До 0,08	До 0,025	До 0,15	-	$\frac{0,020~0,028}{0,10~0,20}$
FCV 350	3,69~3,86	2,57~2,71	0,20~0,52	0,019~0,045	0,009~0,012	-	-	0,012~0,017
ЧВГ 40	3,1~3,5	2,0~2,5	0,4~1,0	До 0,08	До 0,025	До 0,20	0,4~0,6	$\frac{0,020~0,028}{0,10~0,20}$
FCV 400	3,73	2,72	0,20	0,019	0,008	-	-	0,019
ЧВГ 45**	3,1~3,5	2,0~2,5	0,8~1,2	До 0,05	До 0,025	До 0,30	0,8~1,0	$\frac{0,020~0,028}{0,10~0,20}$
FCV 450	3,62~3,73	2,61~2,92	0,20~0,26	0,020~0,026	0,005~0,010	-	-	0,019

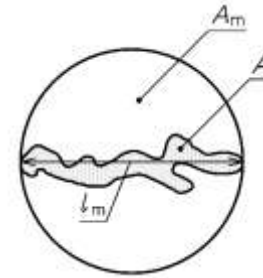
*Цифры в числителе соответствуют содержанию остаточного магния в чугуне, в знаменателе – остаточному содержанию суммы редкоземельных элементов.

**Для получения износостойкого и теплостойкого перлитного ЧВГ допускается легирование чугуна марки ЧВГ 45 0,8~1,2% никеля и 0,2~0,4% молибдена.

Таблица 4. Классификация форм графита в ГОСТ, JIS, ISO.

Форма графита	Обозначение эталона в ГОСТ 3343-87	Формы графита JIS G 5505	Shape factor η	Rang of graphite form of roundness-shape factor (R) by the image analysis equipment.	Степень шаровидности графита ISO 16112 2017	
Пластинчатая прямолинейная	ПГф1	I flake	0,0	0,00 до 0,10	больше 0 до 0,10	Compacted
Гнездообразная	ПГф4	II	0,05	0,11 до 0,20	больше/равно 0,10 до 0,40	
Червеобразная	ВГф2	III	0,20	0,21 до 0,30	больше/равно 0,40 до 0,525	
Нитевидная	КГф1	IV	0,40	0,31 до 0,55	больше/равно 0,525 до/вкл. 0,625	Intermediate
Компактная	КГф3	V	0,90	0,56 до 0,85	больше 0,625 до/вкл. 0,80	Nodules
Шаровидная	ШГф5	VI Spheroidal	1,0	0,86 до 1,00	больше 0,80 до 1,0	

Рис. 14 Определение степени шаровидности графита ISO 16112:2017, JIS G 5505:2013, GOST 3443-87



$$R = A/A_m = (4xA)/(\pi \times l_m^2)$$

Метод вычисления процентной степени шаровидности графита, R_{sg} .

ISO 16112:2017

$$R_{sg} = 100 \times (\sum A_{nodules} + 0,5 \times \sum A_{intermediates}) / \sum A_{all}$$

где $A_{nodules}$ - площадь частиц ($l_m \geq 10$ мкм) классифицируемых как шаровидный графит;

$A_{intermediates}$ - площадь частиц ($l_m \geq 10$ мкм) классифицируемых промежуточная форма графита;

A_{all} - площадь частиц больше чем или равной 10 мкм.

JIS G 5505:2013

$$R_{sg} = 100 \times (\eta^I \times N_g^I + \eta^{II} \times N_h^{II} + \eta^{III} \times N_i^{III} + \eta_{IV} \times N_j^{IV} + \eta_V \times N_k^V + \eta_{VI} \times N_l^{VI}) / N^{All}$$

где η^i - степень шаровидности графитовых частиц группы i ,

N^i - число графитовых частиц группы i ,

i - форма графита, группы I, II, III, IV, V or VI.

GOST 3443-87

Количество шаровидного графита в процентах в структуре чугуна с вермикулярным графитом оценивается по Табл. 4 и шкале 2В.

Таблица 5. Доля шаровидного графита по отношению к вермикулярному оценивается средним процентом площади, занятой указанным графитом на шлифе.

Обозначение	Площадь занятая шаровидным графитом, %
ВГ100	0
ВГ98	До 5
ВГ92	От 5 до 10
ВГ85	От 10 до 20
ВГ70	От 20 до 40

СТРУКТУРА ГРАФИТА И ПРОЧНОСТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ

Табл. 6. Показатели прочности различных сортов чугуна

Сорт	СЕ %	Предел текучести (0,1%)	Предел Прочности кг/мм ²	Коэф. удлинения
ASTM A48-74 кл. 25	4,4	10,5	17.5	< 1
то же кл. 3 0	4.2	14,0	21.1	то же
то же кл. 4 5	3,6	17,5	31.6	то же
ЧВГ	4.2	2 3,2 ~ 2 8,8	3 3.7 ~ 4 0.1	3~5
ВЧ	4.2	2 6,7 ~ 3 3,0	4 2.2 ~ 49.2	7~12

Табл. 7. Механические свойства чугуна в зависимости от структуры графита

Структура графита	Механические свойства графитового зерна (цепочки)			Механические свойства чугуна	
	Длина мкм	Толщина мкм	Отношение	Предел прочности кг/кв. мм	Коэф. удлинения
I	20	10	2 ~ 4	30 ~ 45	2 ~ 5
II	150	50	2 ~ 5	35 ~ 50	3 ~ 9
III	150	20	3 ~ 10	30 ~ 45	1,0 ~ 3,5

ТРЕБУЕМАЯ ТОЛЩИНА ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЧВГ

Табл. 8. Взаимотношение размеров и твердости деталей из ЧВГ

	СЕ	Структура	Толщина/диаметр (мм)			
			30	53	44,5 (кильблок)	200
Твердость [НВ] (10/3000)	4,3	Ферритная	140 ~ 155	135 ~ 150	120 ~ 130	120 ~ 130
			180 ~ 205	170 ~ 180	135 ~ 145	130 ~ 140
	4,0	Перлитная	225 ~ 245	175 ~ 245	195 ~ 205	160 ~ 180
			210 ~ 260	175 ~ 240	195 ~ 215	160 ~ 190

Металлическая основа близка к структуре ВЧ и имеет в своем составе большой процент ферритных структур.

Средняя прочность составляет до 40 кгс/кв. мм, однако существует возможность повысить ее до 50 кгс/кв. мм увеличением доли содержания перлита путем добавления в расплав меди.

ВОПРОСЫ УСАДКИ

ЧВГ имеет преимущество перед ВЧ и СЧ30 (и выше) по показателям текучести и усадки, благодаря повышенному содержанию кремния.

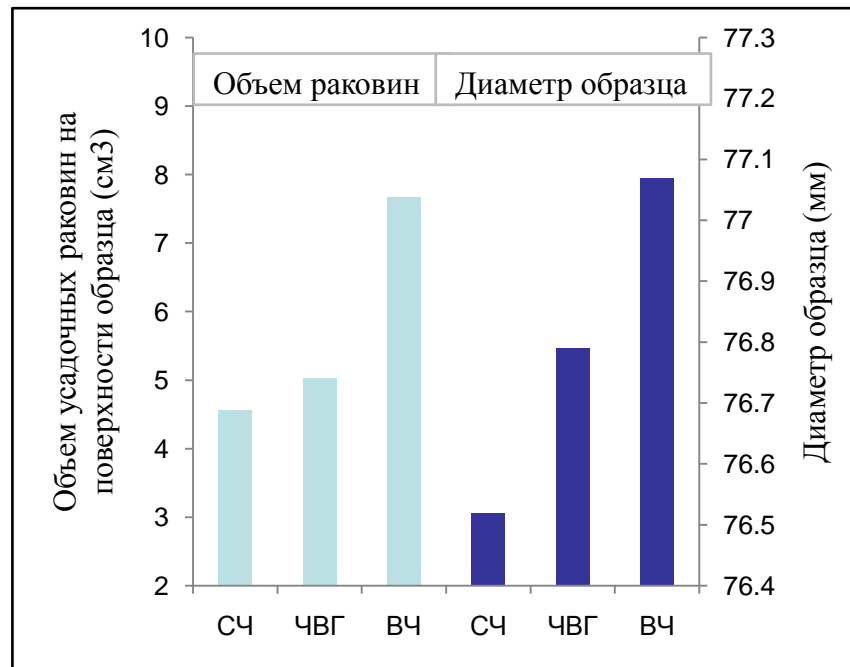



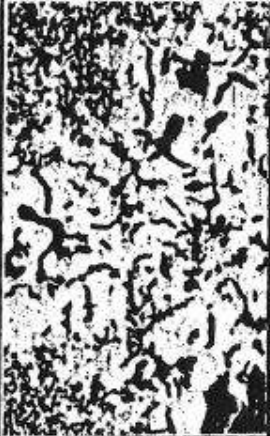



Рис. 15. Соотношение объема усадочных раковин на поверхности и диаметра образца (сферическая отливка $\phi 76$ мм)

ОТБЕЛИВАНИЕ

Таблица 9. Показатели отбеливания различных сортов чугуна

СЕ	Серый чугун			ЧВГ			Высокопрочный чугун		
	3 мм	6 мм	9 мм	3 мм	6 мм	9 мм	3 мм	6 мм	9 мм
4,3	СЧ	СЧ	СЧ	18 мм	3 мм	СЧ	Цементит	14 мм	3 мм
4,1	СЧ	СЧ	СЧ	21 мм	8 мм	СЧ	22 мм	16 мм	СЧ
3,8	СЧ	СЧ	СЧ	Цементит	15 мм	СЧ	Цементит	Цементит	3 мм

По содержанию цементита имеет преимущество перед СЧ, но уступает ВЧ.

x100						
	Сорт	СЧ	СЧ/ЧВГ	ЧВГ	ВЧ/ЧВГ	ВЧ
	Сфероидизация	0	18	34	59	81
	Растяжение кг/м	10.5	26.9	36.5	45.4	49.1
	Удлинение	0.8	1.2	5.4	7.6	19.6
Твердость НВ	90	130	145	156	157	

× 60%

Рис. 16 Графитная структура и механические свойства чугунов

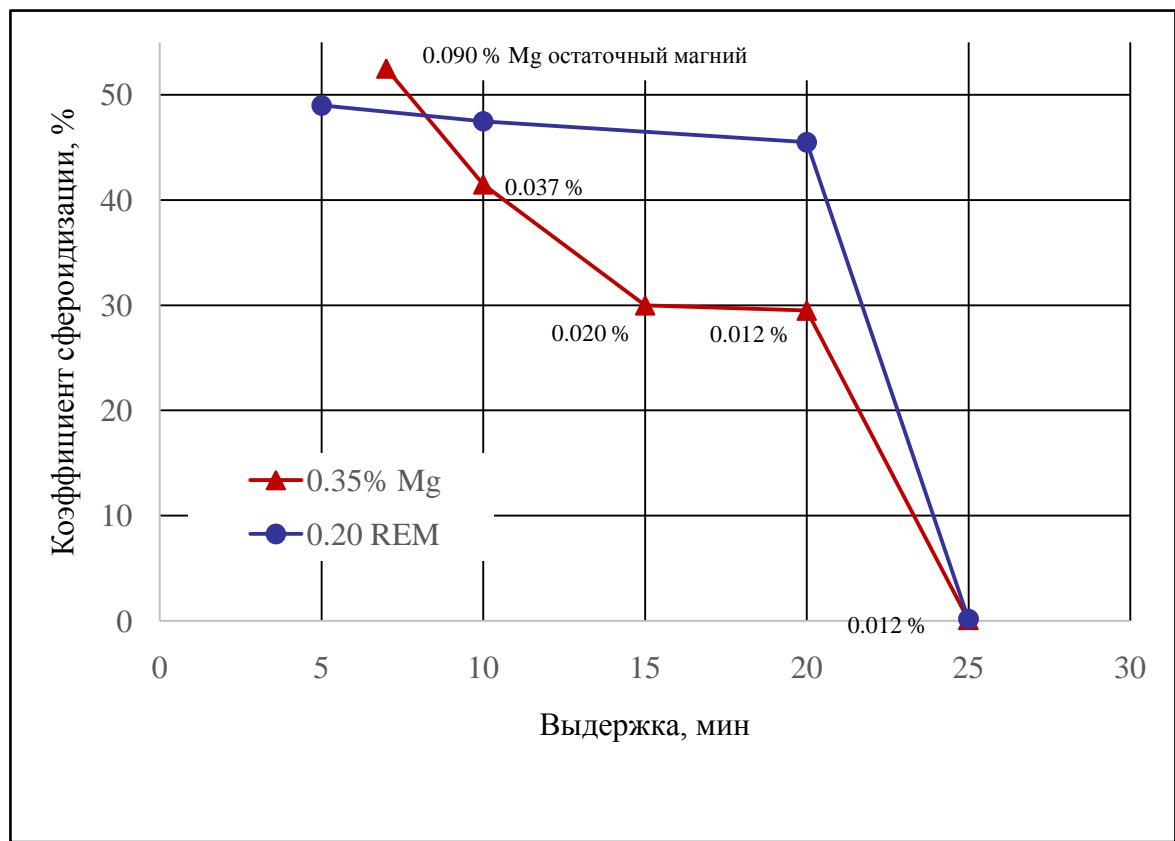


Рис. 17

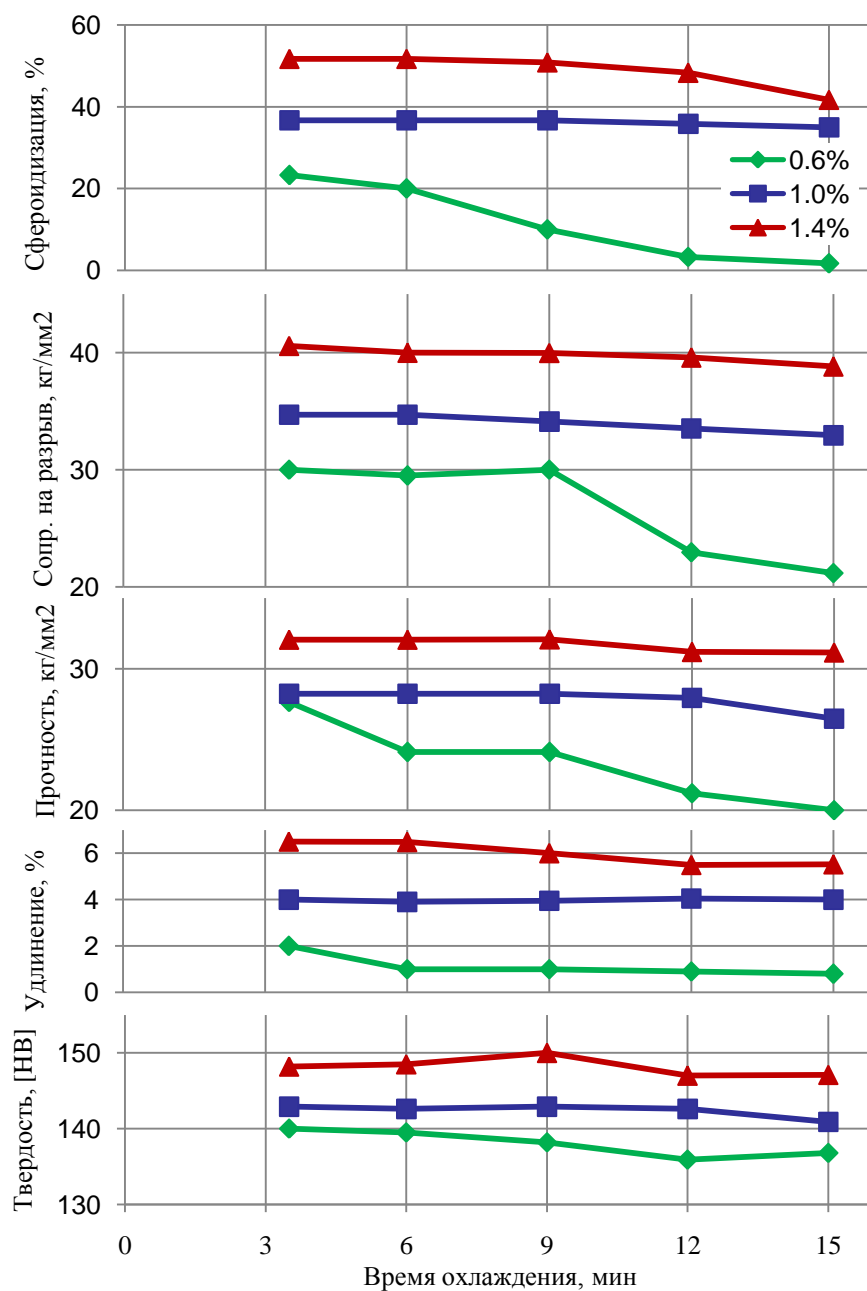


Рис. 18. Время охлаждения и механические свойства чугуна

3. УПРАВЛЕНИЕ ХОДОМ РЕАКЦИИ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ЧВГ

- 1) Ограничение сфероидизации магнием
- При недостатке магния в расплаве при начале и в ходе реакции сфероидизации сферичность графитной структуры нарушается. Используя статистику и формулы расчетов скорости сфероидизации существует возможность управления степенью сфероидизации путем сокращения доли магния в добавляемом модификаторе. Наиболее эффективным агентом для регулировки влияния магния на графитную структуру является сера. При обеспечении требуемого соотношения магния и серы в модификаторе и четкого контроля уровня серы в расплаве имеется возможность замедлять ход сфероидизации и добиваться получения промежуточных графитных структур. Допустимый в модификаторе для ЧВГ баланс объема магния крайне узок, что усложняет как расчеты состава, так и массовое производство такого модификатора.

Пример ①: Примерные соотношения остаточного содержания Mg и S в модифицированном расплаве :

- Диапазон серы (S) 0,017 ~ 0,018% 0,019 ~ 0,020% 0,021 ~ 0,022% 0,025 ~ 0,026%
- Диапазон магния (Mg) 0,020 ~ 0,021% 0,022 ~ 0,023% 0,024 ~ 0,025% 0,026 ~ 0,027%

• 2) Ограничение сфероидизации титаном

- Для ограничения реакции сфероидизации графита в чугунах в присутствии Mg могут использоваться специальные ингибиторы сфероидизации, наиболее популярным из которых является Ti. Оптимальные соотношения Mg и вспомогательных ингибиторов для получения промежуточных структур определенного вида устанавливаются большинством производителей модификаторов экспериментально. Немаловажным моментом является способность остаточного Ti накапливаться в расплаве и влиять на свойства металла, в связи с чем желателен дополнительный технический контроль его содержания в готовом металле. Ниже приведена одна из стандартных формул исчисления объема титанового ингибитора в модификаторе:

- $K2 = K1 / \text{остаток магния (стандартное значение } K2 - 10 \sim 20)$
- или
- $K2 = (4,4Ti + 2,0As + 2,3Sn + 5,0Sb + 290Pb + 370Bi + 1,6Al) / \text{остаток Mg,}$

- где $K1$ – степень влияния ингибитора на реакцию.
- Влияние титановых ингибиторов становится заметным при значениях $K1 = 1,0 - 2,0$. Важным моментом является тенденция к накоплению Ti и его соединений и необходимость дополнительного лабораторного контроля его содержания в возврате. По мнению производителей модификаторов, максимально допустимое содержание остаточного титана в расплаве для ЧВГ составляет не более 0,2% массы.

- **Пример ①** Применение магни-титанового модификатора (Fe-Si—Mg—Ti—Al)

Объем модификатора 0,5 ~ 2,0%

Диапазон магния (Mg) 0,015 ~ 0,030%

Диапазон серы (S) 0,01 ~ 0,03%

- **Пример ②** :

Химсостав модификатора (Mg 4,0 ~ 5,0%, Ti 8,5 ~ 10,5%, Ce 0,2 ~ 0,35% Ca 4,0 ~ 5,5%, Al 1,0 ~ 1,5%, Si 48,0 ~ 52,0%)

Навеска: 0,30 ~ 0,45%

Химсостав расплава C 3,45 ~ 3,78%, Si 2,01 ~ 2,68%, Mn 0,43 ~ 0,49%, P 0,019 ~ 0,045%, S 0,010 ~ 0,017%

- 3) Ограничение сфероидизации РЗМ (в т. ч. церием (Ce))
- РЗМ обладают слабой степенью влияния на процессы образования шаровидных графитных структур, нежели магний. При получении промежуточных структур графита слабая реакция с РЗМ-добавками дает возможность регулировки их содержания в широком диапазоне для получения промежуточных графитовых структур.
- **Пример ①** Магний-цериевый (Fe-Si-Ce-Mg)
- Химсостав модификатора: Ce 2.5 ~ 7,5%, Mg 1 ~ 2%, Si 45 ~ 50%
- Химсостав расплава: C 3,6%, Si 2.6%, Mn 0.3%, P 0,06% S 0,02%
- Навеска: 1%
- **Пример ②**: РЗМ-модификаторы
- Химсостав модификатора: РЗМ 30,9% Si 33,2% Fe 32,2%
- Химсостав расплава: Si 2,0%, РЗМ 4,2 ~ 4,4%
- Навеска: 0,35%
- **Пример ③**: Сложный модификатор для вагранки
- Химсостав присадок:
- ХТ-Mg 18-8 (РЗМ 18,55%, Ca 2,70% Mg 8.39%, Si 39.40%)
- ХТ- 2 7 (РЗМ 27,70%, Ca 4,32%, Mg 0,37%, Si 40,79%)
- NF-8 (Mg 8,22%, Si 46,10%)
- Химсостав расплава: C 3,25 ~ 3,40%, Si 1,7 ~ 2,0%, P 0,05 ~ 0,07% S 0,07 ~ 0,09% Cr 0,02 ~ 0,05%
- Навеска: ХТ-Mg 18-8 (0,77%) + науглероживатель 0,5% + FeSi 0,6% (сэндвич-процесс)

- 4) Ограничение сфероидизации кальцием
- Как и РЗМ, кальций обладает малой степенью влияния на процессы сфероидизации и представляет интерес в получении промежуточных структур графита. Следует отметить, что присутствие ограниченного объема магния в кальций-кремниевом расплаве положительно влияет на формирование промежуточных структур. Как известно, применение кальция ведет к образованию скорее хлопьевидных, нежели чисто шаровидных графитовых структур, что дает возможность также использовать его в качестве добавки-ингибитора в модификаторах для ЧВГ. Преимущество кальциевых добавок также в достаточно широкой возможности регулировки объема промежуточных структур.
- **Пример①** Кальциевый модификатор для ЧВГ
Химсостав модификатора: Ca-Si 2 5 %
- Навеска: 1% (в ковш)
- Химсостав расплава: C 3,5 %, Si 2,5%

Табл. 10. Условия реакции

Печи	Вагранка 4т/низкочастотная 3т
Десульфуризация	Непрерывная в ковше с пористой пробкой
Шихта	Чугун 43 %, возврат 55 %
Масса плавки	600 кг
Температура разливки	1470 °С
Модификатор	Химсостав: Fe·Si - 1,18%, Mg - 8,8%, Ce - 4,4% Доля модификатора: 0,8%
Графитизация	Химсостав: ферросилиций 75% Доля модификатора: 0,4%
Температура в форме	1470 °С

Табл. 11. Соотношение химсостава

C	Si	Mn	P	S	Cu
3,70	2,70	0,60	0,040	0,011~ 0,023	0,50

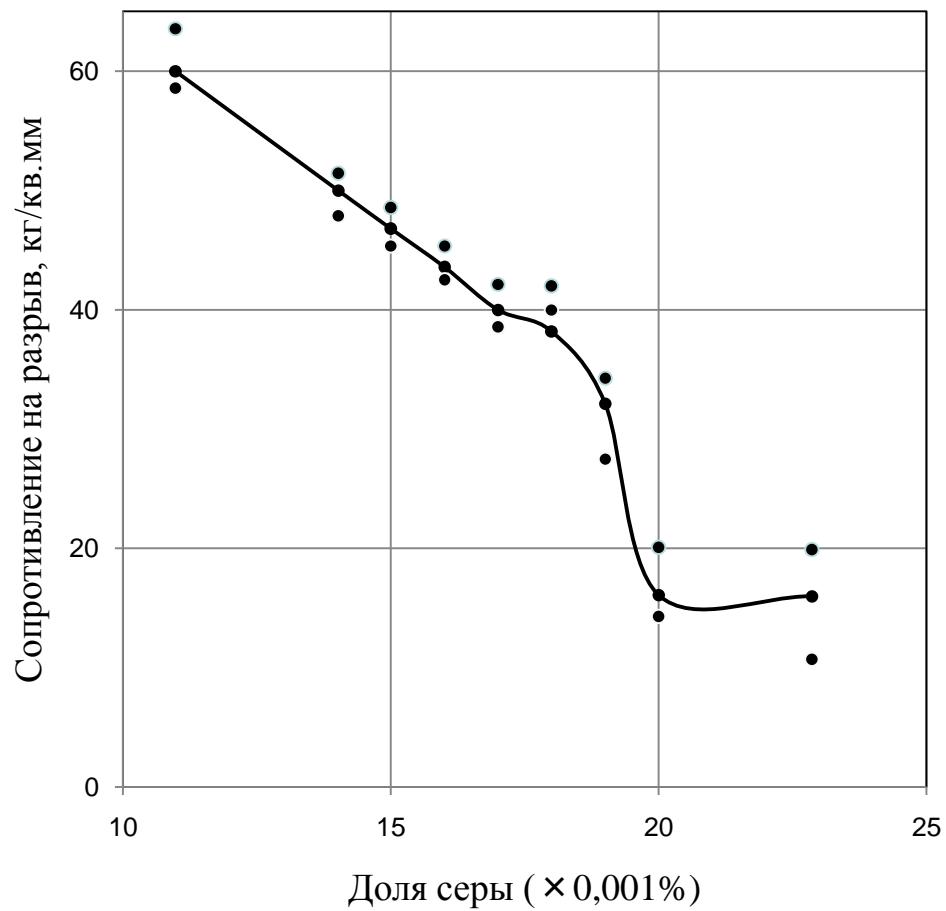


Рис. 19 Доля серы и сопротивление на разрыв
(доля модификатора 0,8%)

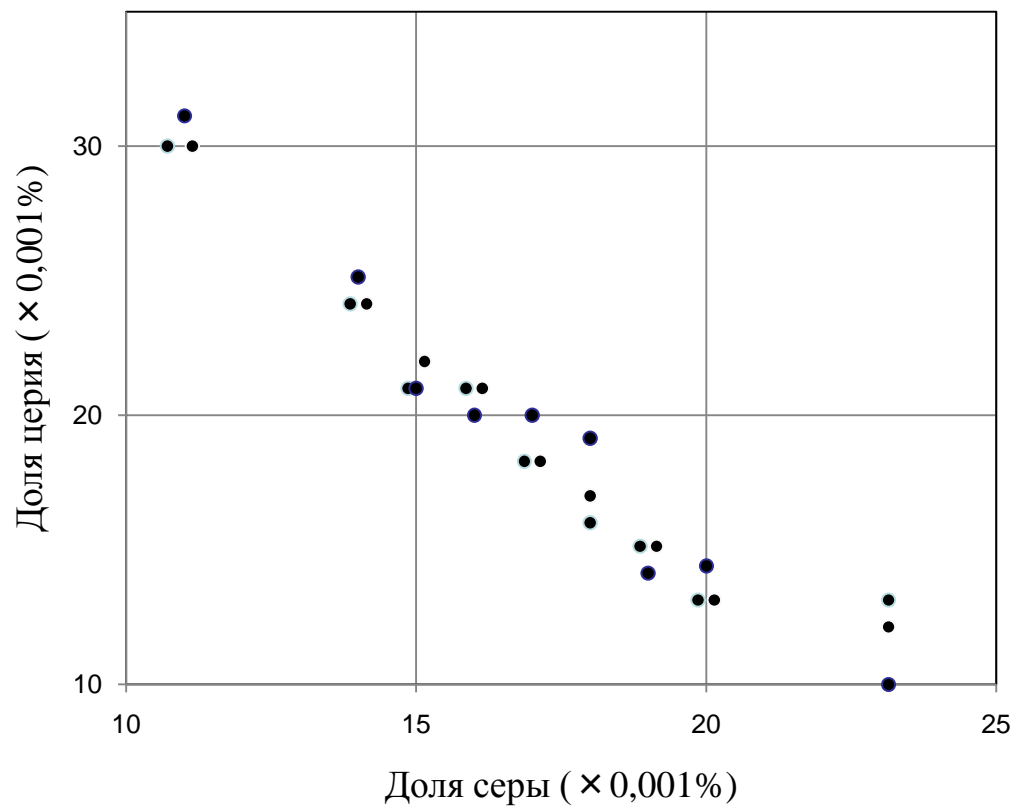


Рис. 20 Доля серы и остаточный церий (доля модификатора 0,8%)

4. ВЫБОР МОДИФИКАТОРОВ ДЛЯ ЧВГ

Возможные способы замедления процесса сфероидизации

1. Снижение доли магния
2. Введение титанового ингибитора
3. Введение РЗМ-ингибитора
4. Введение кальциевого ингибитора

Таблица 12. Примеры состава рыночных модификаторов для ЧВГ (%)

Химсостав	Mg	Ti	РЗМ/Ce	Ca	Si	Остаток
Пример А	4,0 ~ 5,0	8,5 ~ 10,5	0,20 ~ 0,35	4,0 ~ 5,5	48,0 ~ 52,0	Al 1,0 ~ 1,5; ост. Fe
	4,5 ~ 5,5	8,0 ~ 10,0	0,30 ~ 0,40	До 1,0	50,0 ~ 54,0	Al 1,0 ~ 1,5; ост. Fe
Пример В	3,0 ~ 4,0	-	7,5 ~ 8,5	1,5 ~ 2,5	43,0 ~ 57,0	остальное Fe
	6,0 ~ 8,0	-	1,0 ~ 3,0	5,0 ~ 7,0	43,0 ~ 47,0	остальное Fe
Пример С	4,5	-	4,0	1,0 ~ 1,5	50,0	остальное Fe
	4,0	-	7 ~ 8	1,0 ~ 1,5	45,0	остальное Fe
Пример D	1,7 ~ 2,0	-	8,0 ~ 9,0	-	45,0	остальное Fe

Рис. 21 Высокоплотные чугуны vs. ЧВГ

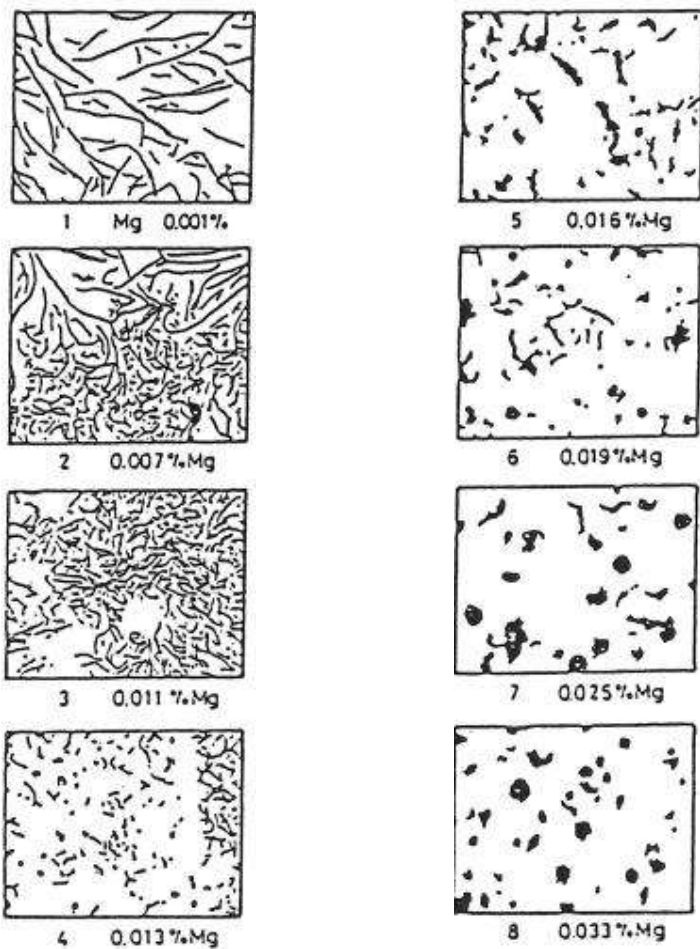


Рис. 22 СТРУКТУРА ЧУГУНА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ДОЛИ ЦЕРИЯ (1)

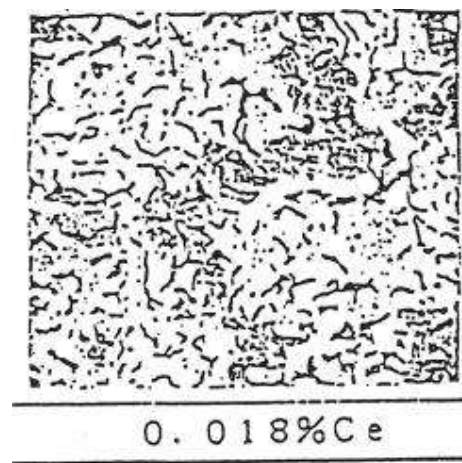
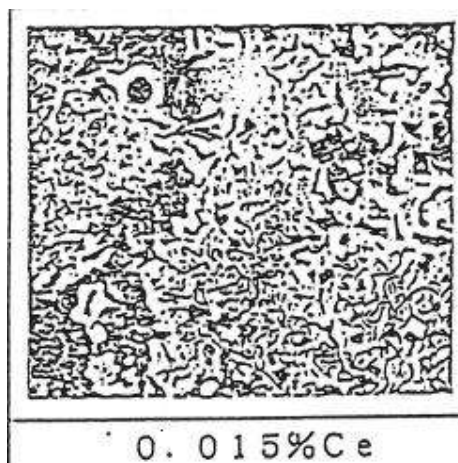
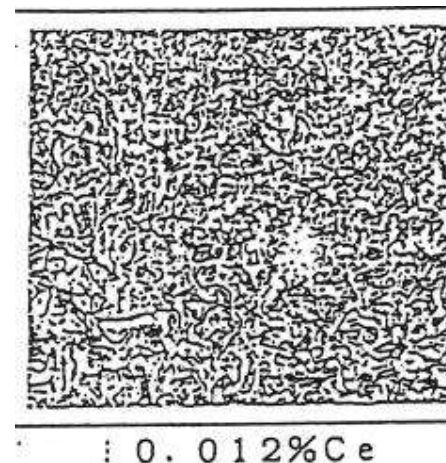
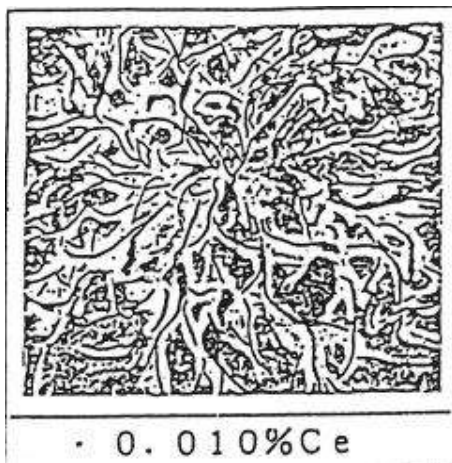
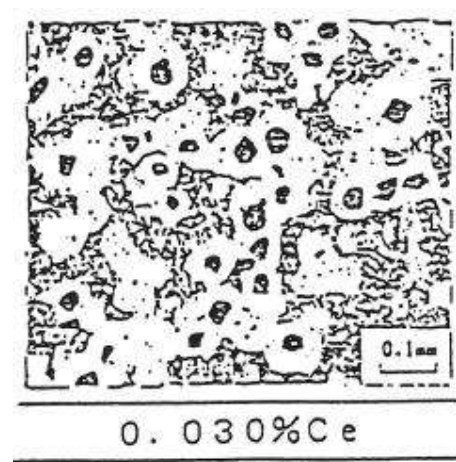
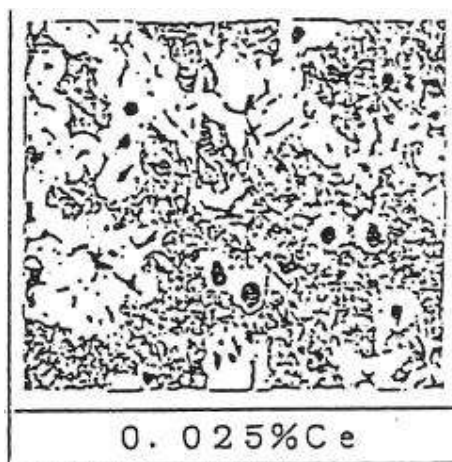
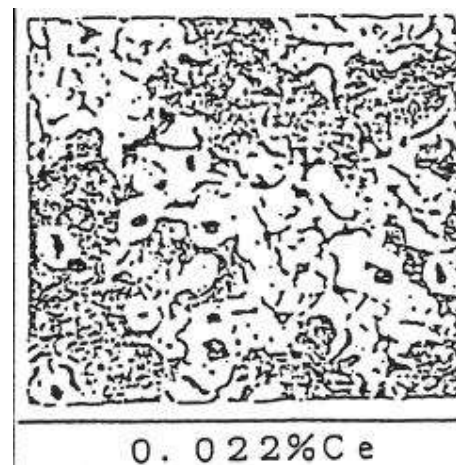
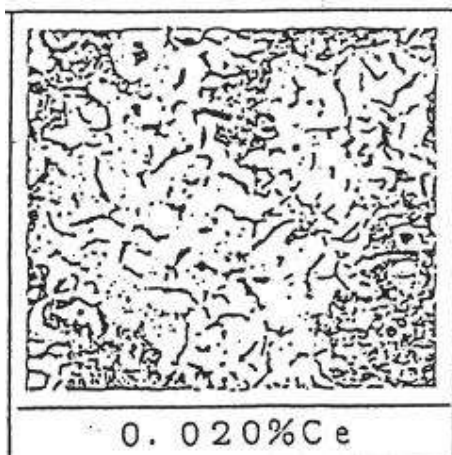


Рис. 23 СТРУКТУРА ЧУГУНА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ДОЛИ ЦЕРИЯ (2)



5. МОДИФИКАТОРЫ Toyo Denka ДЛЯ ЧВГ

Таблица 13. Модификаторы серии Vermicalloy

Наименование	Si (%)	Mg (%)	Ca (%)	RE (%)	Al (%)	Гранулярность
Varmicalloy	47	1,8	0,2	8,7	1,0	2 ~ 12
Varmicalloy S	60	2,4	0,3	5,5	1,0	2 ~ 12
Varmicalloy D	45	1,9	0,4	8,8	1,0	3 ~ 12
Varmicalloy HM	47	2,5	0,3	9,0	1,0	2 ~ 12
VA-T-3	47	1,7	0,4	5,5	1,0	1 ~ 10
VA-33A	45	3,2	0,22	3,1	1,0	2 ~ 12
VA-39 (K)	45	3,0	0,6	9,0	1,0	2 ~ 20
TDCR-2HR-D	45	2,2	0,6	2,5	1,0	2 ~ 10
TDCR-2HR-H	45	1,9	0,4	5,7	1,0	2 ~ 10
TDCR-3HR	45	3,3	1,5	4,1	1,0	2 ~ 12

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Модификатор Vermicalloy является стандартным освоенным продуктом в номенклатуре модификаторов для ЧВГ Toyo Denka Kogyo.

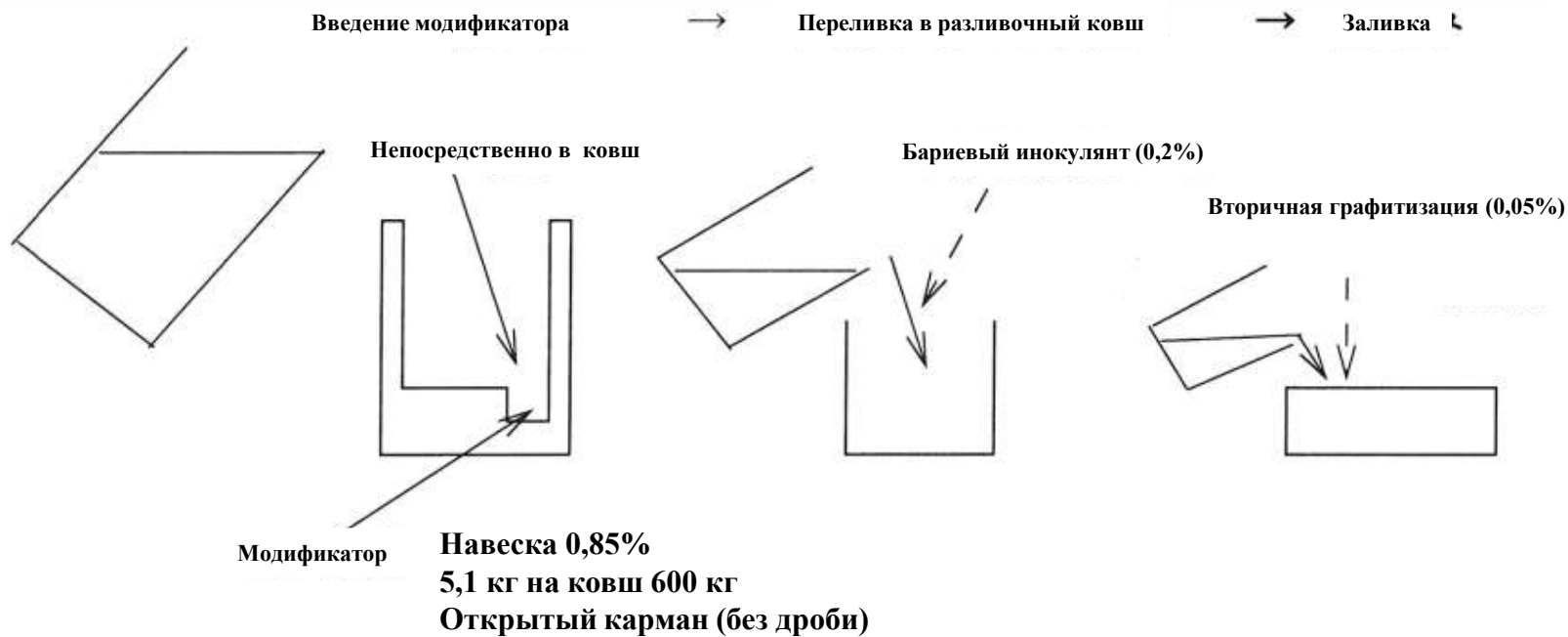
- Vermicalloy (Mg 1,8%, PЗМ 8.7%)

Несколько лет назад был разработан новый сорт модификатора для ЧВГ VA-T-3 с пониженным содержанием PЗМ. Необходимость в новом типе модификатора была обусловлена ростом относительного объема шаровидных структур в ЧВГ массового производства.

- VA-T-3 (Mg 1,7%, PЗМ 5.5%)

Одновременно снижением концентрации PЗМ было достигнуто предотвращение образования цементита и отбеленного слоя без первичной графитизации (с экономией расхода инокулянта).

Рис. 24. Примеры модификации



В связи с низким содержанием магния рекомендуется добавление модификатора непосредственно в ковш

Химический состав и эффективность графитизации

Таблица 14. Расплав

C	Si	Mn	P	S	Mg	Эф Mg	Cu	Cr	Mo	Ni	Al	V	Ti	Sn	Pb	Sb	Nb	Zn	Ce	B	V1 зв.	V2 зв.	T°C
3,78	2,14	0,40	0,018	0,008	0,000		0,02	0,03	0,01	0,02	0,0046	0,0000	0,0125	0,0018	0,0000	0,0018	0,0023	0,0467	0,0002	0,0004			

Таблица 15. После модификации Vermicalloy (доля Mg 0,015725)

мин	C	Si	Mn	P	S	Mg	Эф Mg	Cu	Cr	Mo	Ni	Al	V	Ti	Sn	Pb	Sb	Nb	Zn	Ce	B	V1 зв.	V2 зв.	T°C
3	3,78	2,84	0,40	0,019	0,009	0,006	38,2%	0,03	0,03	0,01	0,02	0,0168	0,0000	0,0135	0,0019	0,0000	0,0017	0,0024	0,0335	0,0201	0,0003	5469	5482	1435
8	3,59	2,83	0,40	0,019	0,008	0,005	31,8%	0,03	0,03	0,01	0,02	0,0143	0,0000	0,0136	0,0021	0,0000	0,0021	0,0024	0,0314	0,0177	0,0005	5489	5429	1368
13	3,51	2,81	0,40	0,019	0,009	0,004	25,4%	0,03	0,03	0,01	0,02	0,0121	0,0000	0,0135	0,0021	0,0000	0,0025	0,0022	0,0281	0,0170	0,0005	5523	5464	-

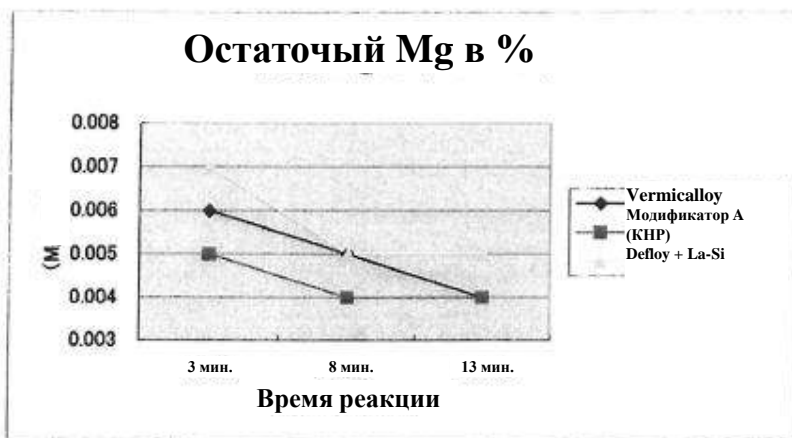


Рис. 25

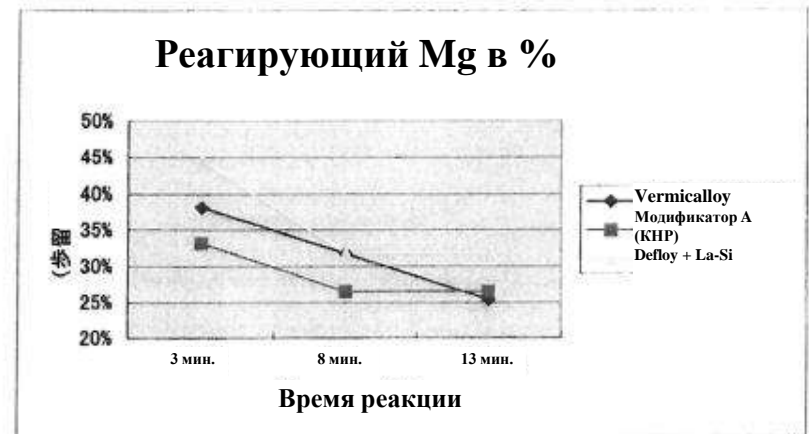


Рис. 26

Примечание: ввиду сложности характера влияния скорости охлаждения на прочность металла выражения зависимостей времени и мех. свойств отливки справедливы для определенного диапазона химических составов, толщин отливок и условий производства

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Таблица 16.

	Vermicalloy			
Время охлаждения	3 мин.	8 мин.	13 мин	В самозатвердевающей форме
Предел на растяжение, МПа	395	400	396	382
Удлинение, %	7,8	8,4	9,3	5,8
Твердость, HVD	4,65	4,65	4,70	4,70
Твердость, HB	167	167	163	163
V звука	5482	5429	5464	5413



Рис. 27

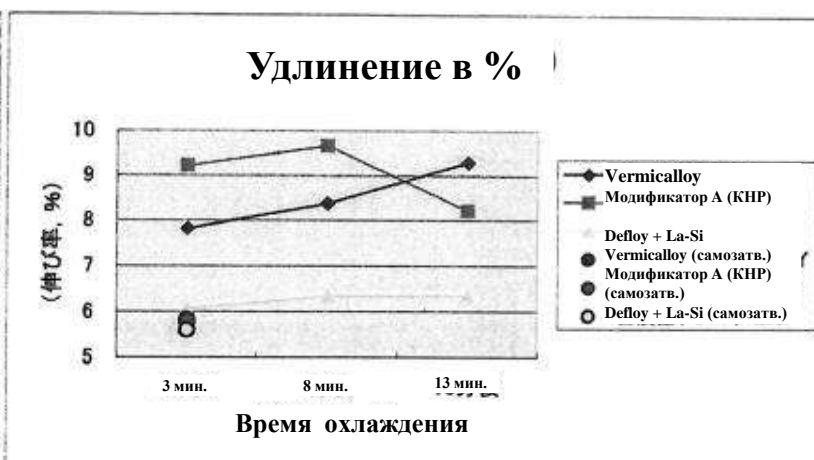


Рис. 28

Примечание: ввиду сложности характера влияния скорости охлаждения на прочность металла выражения зависимостей времени и мех. свойств отливки справедливы для определенного диапазона химических составов, толщин отливок и условий производства

СТРУКТУРНЫЙ КОНТРОЛЬ

Диапазон скоростей :5400~5630 м/сек

(замеры 5400~5550 м/сек)

Доля Mg :0,005~0,015% (замеры 0,006~0,01%)

Сопротивление на растяг

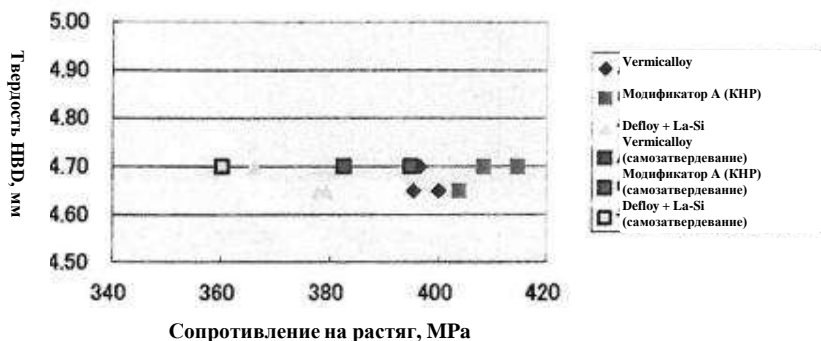


Рис. 29

Коэффициент удлинения

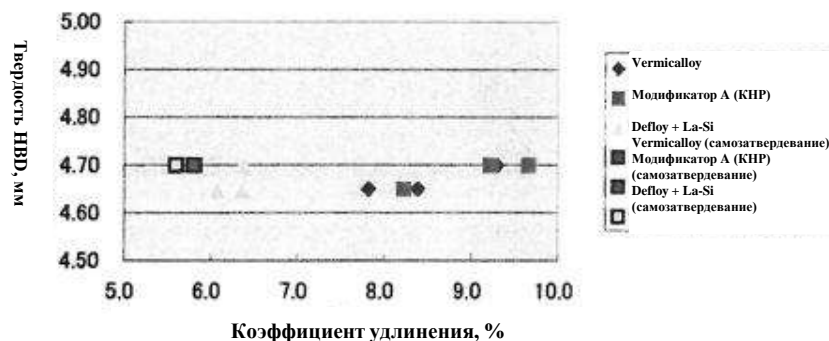


Рис. 30

УЗ-контроль затуханием

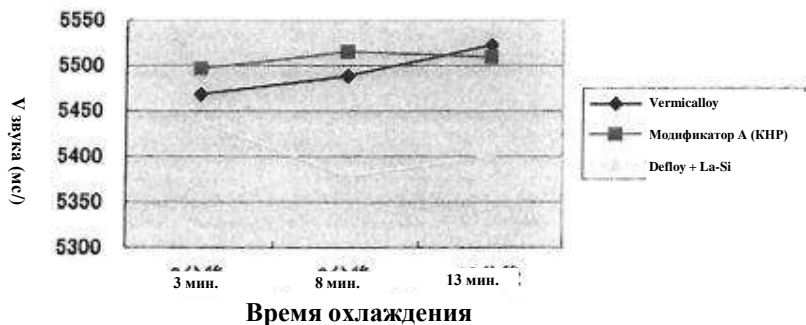


Рис. 31

УЗ-контроль затуханием (Y-образный образец)



Рис. 32

Примечание: ввиду сложности характера влияния скорости охлаждения на прочность металла выражения зависимостей времени и мех. свойств отливки справедливы для определенного диапазона химических составов, толщин отливок и условий производства

УЗ-КОНТРОЛЬ ЗАТУХАНИЕМ

Скорость звука при УЗ-контроле чугунов рассчитывается по формуле

$$V = \alpha(E/\rho)^{1/2},$$

где ρ - плотность, E – модуль Юнга, α - константа.

табл. 14 приведены показатели плотности, модуля Юнга и скорости звука стандартных материалов, из которых видно возрастание этих показателей от СЧ к ВЧ.

Табл. 17. Средние показатели механических свойств металлов

	Плотность, г/куб.см	Модуль Юнга, ГПа	V звука, м/с	Примечания
СЧ	7,0 ~ 7,5	73,5 ~ 127,4	< 5000	Для СЧ15 – СЧ35
ЧВГ	7,0 ~ 7,2	140 ~ 155	5000 ~ 5500	
ВЧ	7,1 ~ 7,3	165 ~ 185	5550 ~ 5720	Для ВЧ40 – ВЧ80
СТАЛЬ	7,8	205,8	5920	

СОДЕРЖАНИЕ РЗМ И СТРУКТУРА ОТЛИВКИ

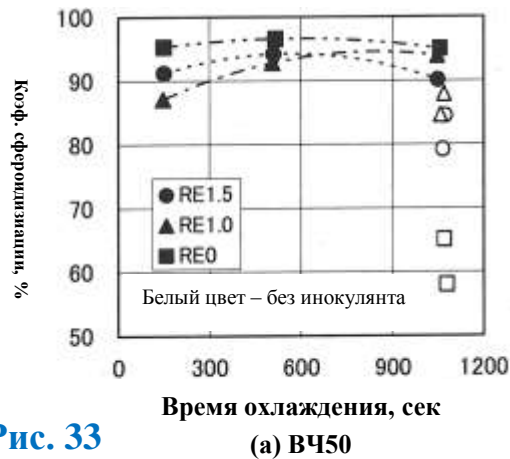


Рис. 33

Время охлаждения, сек
(а) ВЧ50

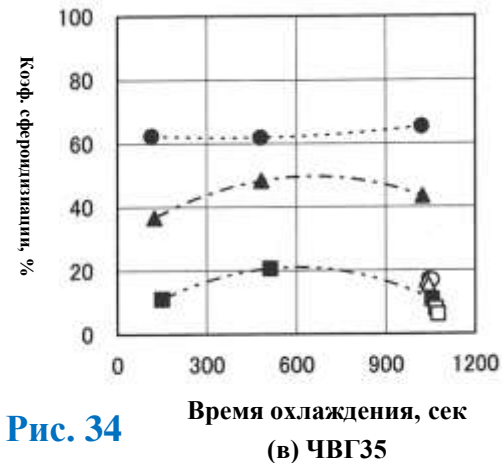


Рис. 34

Время охлаждения, сек
(в) ЧВГ35

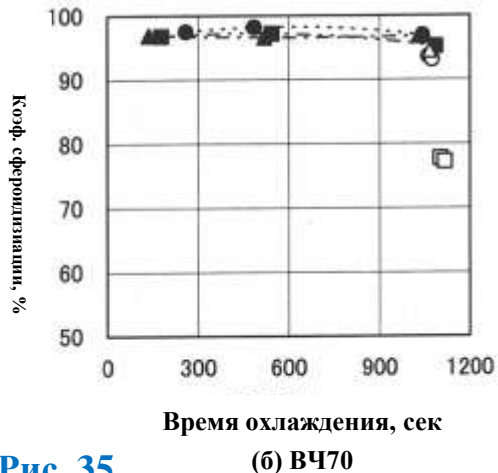


Рис. 35

Время охлаждения, сек
(б) ВЧ70

Для ВЧ50-70: процесс сфероидизации не получает ощутимого замедления после разливки в форму, и присутствие РЗМ в расплаве не оказывает серьезного влияния на формирование промежуточных структур. При нулевом содержании РЗМ в модификаторе коэффициент сфероидизации составлял до 80%.

Замедления сфероидизации удалось добиться отказом от первичной модификации барием.

Для ЧВГ35: в отсутствие РЗМ характерна структура СЧ-ВЧ (практически без промежуточных структур).