

**ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ МОДИФИКАТОРОВ НА СТРУКТУРУ  
СЕРЫХ И ОТБЕЛЕННЫХ ЧУГУНОВ**

*Изучено влияние комплексных модификаторов на структуру и свойства чугунов. Установлено, что модифицирование РЗМ позволяет в широких пределах изменять структуру, твердость и физико-механические свойства белых и половинчатых валковых чугунов. Оптимальное содержание РЗМ для рабочего слоя отбеленных валков – 0,20-0,35% ΣРЗМ. Установлено, что использование Се и La при модифицировании доэвтектоидного чугуна рабочего слоя при содержании 0,064-0,105% ΣРЗМ способствует формированию графита вермикулярной формы. При содержании 0,122-0,315% ΣРЗМ формируется компактный и вермикулярный граф. Показано, что модифицирование РЗМ не обеспечивает получение графита шаровидной формы для серого чугуна сердцевины, как при модифицировании магнием.*

**Ключевые слова:** белый чугун, серый чугун, химический состав, модифицирование, структура, магний, редко-земельные металлы, технологические параметры.

**Слынько Г.И. Вплив комплексних модифікаторів на структуру сірих і вибілених чугунів.** Показано, що одним з перспективних напрямів підвищення якості та експлуатаційної стійкості прокатних валків за рахунок поліпшення структури і властивостей всіх зон масивних виливків, що використовуються для їх виробництва, є модифікування чавуну. Істотне поліпшення структури і властивостей білих чавунів забезпечується при модифікуванні їх рідкісноземельними металами, а сірих – рідкісноземельними металами і магнієм. Дана інформація про те, що рідкісноземельні метали і комплексні модифікатори на їх основі отримують все більш широке застосування при виробництві валків. Наголошено на необхідності в проведенні досліджень впливу комплексних модифікаторів на отримання формуючих інструментів зі стабільною структурою і включеннями кулястого графіту. Вивчено вплив комплексних модифікаторів на структуру і властивості чавунів. Викладено методику проведення досліджень. Досліджено вплив кількості уведеного комплексного модифікатора на структуру вибіленого (з 0,94-1,01% Si) і сірого (з 1,58-1,66% Si) чавунів. Встановлено, що модифікування рідкісноземельними металами дозволяє в широких межах змінювати структуру, твердість і фізико-механічні властивості білих і половинчастих чавунів. Виконані металографічні дослідження показують, що оптимальною кількістю комплексного модифікатора з вмістом не менше 40,6% рідкісноземельних металів при обробці чавунів є 1,5-2,0%, що відповідає засвоюваності 0,25-0,30% рідкісноземельних металів. У сірому чавуні при литві в кокіл кількість цементиту знаходиться в межах 25,3-27,2%. У вибілених чавунах кількість цементиту зростає від 29,0 до 31,4%, а графіту відсутня. У структурі вибілених чавунів, відлитої в піцано-глинисті форми, частка цементиту знаходиться в межах від 27,7 до 30,0%. Встановлено, що використання Се і La при модифікуванні доэвтектоїдного чавуну робочого шару при утриманні 0,064-0,105% рідкісноземельних металів сприяють формуванню графіту вермикулярної форми. При утриманні 0,122-0,315% рідкісноземельних металів формується компактний і вермикулярний графіт. Показано, що модифікування рідкісноземельними металами не забезпечує отримання графіту кулястої форми для сірого чавуну серцевини, як при модифікуванні магнієм.

**Ключові слова:** білий чавун, сірий чавун, хімічний склад, модифікування, структура, магній, рідкісноземельні метали, технологічні параметри.

\* д-р техн. наук, профессор, Запорожский национальный технический университет, [kafedra\\_tg@zntu.edu.ua](mailto:kafedra_tg@zntu.edu.ua)

*G.I. Slynko. Effects of complex modifiers on the structure of gray and bleached cast irons. It is shown that one of the promising directions for improving the quality and serviceability of rolling rolls due to the improvement of the structure and properties of all zones of massive castings used for their production is the modification of cast iron. A significant improvement in the structure and properties of white cast iron is ensured by modifying them with rare-earth metals (REM), and gray ones by REM and magnesium. There is information that REM and complex modifiers on their basis are increasingly used in rolling production. The need for studies of the influence of complex modifiers on the preparation of forming tools with a stable structure and inclusions of globular graphite was noted. The effect of complex modifiers on the structure and properties of cast irons was studied. The methodology of research is outlined. Investigation of the influence of the amount of complex modifier introduced on the structure of cast iron (from 0,94-1,01% Si) and gray (with 1,58-1,66% Si) cast iron. It is established that the modification of REM allows a wide variation in the structure, hardness, and physico-mechanical properties of white and half-rolled cast iron. The metallographic studies performed show that the optimal amount of the complex modifier with a content of at least 40,6% REM in the treatment of cast iron is 1,5-2,0%, which corresponds to the assimilability of 0,25-0,30%  $\Sigma$ REM. In gray cast iron, the amount of cementite is in the range 25,3-27,2% when casting into a chill. In bleached pig iron, the amount of cementite increases from 29,0 to 31,4%, and there is no graphite. In the structure of bleached cast iron casted in sandy-argillaceous forms, the proportion of cementite is in the range from 27,7 to 30,0%. It has been established that the use of Ce and La in the modification of the pre-eutectoid cast iron of the working layer at a content of 0,064-0,105%  $\Sigma$ REM promotes the formation of graphite of the vermicular form. With a content of 0,122-0,315%  $\Sigma$ REM, a compact and vermicular graph is formed. It is shown that modifying the REM does not ensure the production of graphite of a spherical shape for gray iron in the core, as in the case of magnesium modification.*

**Keywords:** white cast iron, gray cast iron, chemical composition, modification, structure, magnesium, rare earth metals, technological parameters.

**Постановка проблеми.** В качестве основных формующих инструментов на листопрокатных и сортопрокатных станах нашли применение чугунные прокатные валки. В значительной степени эксплуатационные свойства валков зависят от твердости и износостойкости рабочего слоя, а также прочности бочек, шеек и трещин.

Одним из перспективных направлений повышения качества и эксплуатационной стойкости прокатных валков за счет улучшения структуры и свойств всех зон массивных отливок, используемых для их производства, является модифицирование чугуна.

В качестве основных модификаторов в вальцелитейном производстве применяются преимущественно металлический магний, а в ряде случаев – магниевые лигатуры с кремнием и кальцием или магниесодержащие лигатуры с РЗМ (редкоземельными металлами). Следует отметить, что до настоящего времени нет единого научно-обоснованного мнения о составе и доле вводимых РЗМ при модифицировании отбеленных и серых чугунов для отливок большой массы.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В настоящее время при производстве валков из чугуна с шаровидным графитом применяют, в основном, модифицирование металлическим магнием в открытых 15-30-тонных ковшах. Магний и его сплавы остаются наиболее доступными и экономичными сфероидизаторами [1].

Магний применяется как в чистом виде, так и в составе смесей, брикетов [2]. Модифицирование одним металлическим магнием является в современных условиях весьма ограниченным как с точки зрения качества прокатных валков, так и особенно охраны окружающей среды. Существенное улучшение структуры и свойств белых чугунов обеспечивается при модифицировании их РЗМ, а серых – РЗМ и магнием. РЗМ и комплексные модификаторы на их основе получают все более широкое применение [3, 4]. Однако технологические параметры модифицирования расплавов определены недостаточно четко из-за изменчивости химического состава валковых чугунов. В последние годы для модифицирования валковых расплавов осваивают новое поколение модифицирующих присадок, которые одновременно используют как для от-

беленных, так и высокопрочных чугунов [5]. В практике литейного производства находят применение сплавы РЗМ с добавками церия или иттрия. Это комплексные модификаторы Reseed® (Rd) Inoculant норвежской фирмы [6] и лигатуры типа Сцемиш и Сиитмиш (в настоящее время ФСЗОРЗМ30) [7]. Однако следует отметить, что модификатор Reseed® (Rd) Inoculant – дорогостоящий и неоднозначно оказывает влияние на получение высокопрочного чугуна с регулируемой долей карбидной фазы. Наибольший интерес представляет изучение использования в отечественном вальцелательном производстве лигатур типа Сцемиш.

Перспективность и технологическая необходимость совершенствования производства валков из модифицированных чугунов требуют более глубокого и системного исследования влияния комплексных модификаторов на получение формующих инструментов со стабильной структурой и включениями шаровидного графита.

**Цель работы** – изучить влияние комплексных модификаторов на структуру и свойства белых и серых чугунов, используемых при производстве прокатных валков.

**Изложение основного материала.** При проведении исследований плавку опытных образцов производили в индукционной печи ЛПЗ-67 с кислой футеровкой. Металл в печи перегревали до 1440-1450°C. Для модифицирования применяли дробленый модификатор фракции 5-10 мм, погружаемый в тигель перед заливкой с помощью колокольчика из фольги на штанге. Состав комплексного модификатора приведен в табл. 1. Заливку чугуна производили при температуре 1300-1310°C одновременно в кокильную и сухую песчано-глинистые цилиндрические формы с внутренним диаметром 60 мм и длиной 250 мм. В формы для измерения и записи температурных кривых по сечению в процессе затвердевания отливки устанавливали термодпары ВР-5/20, которые подключали к устройству ТРМ 151. Подвод металла осуществляли снизу.

Таблица 1

Химический состав используемой лигатуры

Сумма РЗМ не менее%	Химический состав, %						
	Ce	Y	Si	Ca	Al	C	Fe
40,6	20-22	18-20,6	41	-	4,8	-	ост

Исследование влияния количества введенного комплексного модификатора на структуру отбеленного и серого чугунов проводили на образцах, вырезанных из середины цилиндрических проб. Состав исследованных чугунов приведен в табл. 2.

Таблица 2

Химический состав опытных образцов и количество введенного модификатора

№ проб	Величина при- садки модифи- катора, %	Химический состав чугунов, %					
		C	Si	Mn	P	S	□РЗМ
0	-	3,09	0,94	0,54	0,056	0,039	-
1	0,5	3,14	0,97	0,50	0,044	0,030	0,09
2	1,0	3,01	1,01	0,56	0,055	0,129	0,20
3	1,5	3,10	0,97	0,61	0,051	0,020	0,35
4	2,0	3,14	0,95	0,64	0,049	0,018	0,39
5	-	3,19	1,61	0,60	0,050	0,043	-
6	0,5	3,13	1,58	0,52	0,048	0,033	0,10
7	1,0	3,06	1,66	0,51	0,055	0,030	0,21
8	1,5	3,13	1,65	0,49	0,048	0,019	0,3
9	2,0	3,16	1,64	0,54	0,044	0,015	0,38

Структуру изучали на металлографических микроскопах МИМ-8М и «Neophot-2» при увеличении от ×100 до ×500. Микрошлифы для исследований готовили травлением 4%-ным раствором HNO<sub>3</sub> в этиловом спирте.

Исследования структуры образцов первой и второй серий плавок, т.е. отбеленного (с 0,94-1,01%Si) и серого (с 1,58-1,66%Si) чугунов 0-4 и 5-9, соответственно, представлены на рис. 1 и рис. 2, а также в табл. 3.

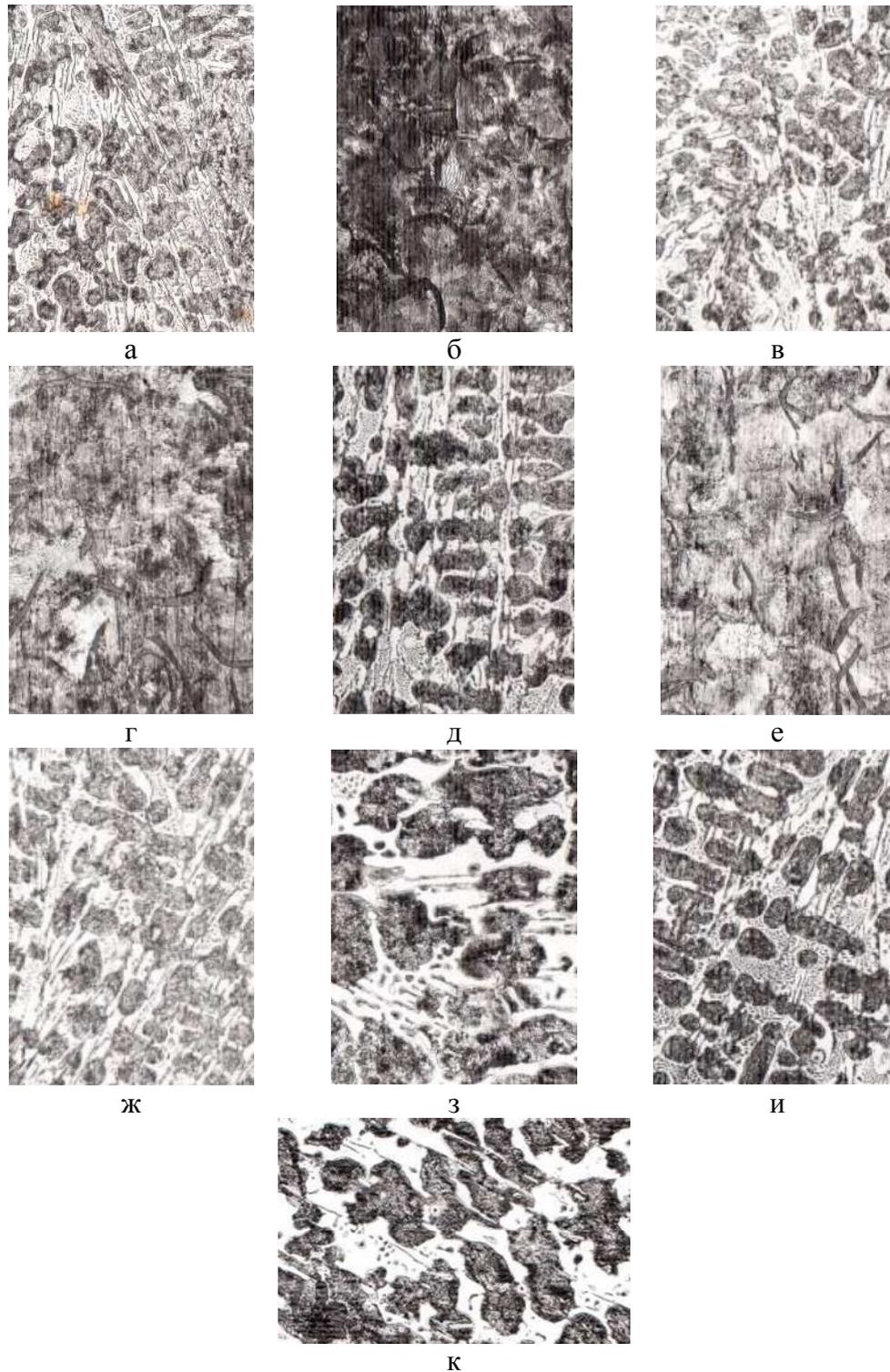


Рис. 1 – Структура чугуна: а, б – исходного (проба 0 табл. 2 и табл. 3, отлитого в металлическую форму и песчано-глинистую, соответственно); в-к – модифицированного комплексным модификатором (пробы 1-4 табл. 2 и табл. 3): в, г – 0,5%; д, е – 1,0%; ж, з – 1,5%; и, к – 2,0%; в, д, ж, и – кристаллизация в кокиле  $\times 100$ ; г, е, з, к – кристаллизация в песчано-глинистой форме  $\times 100$

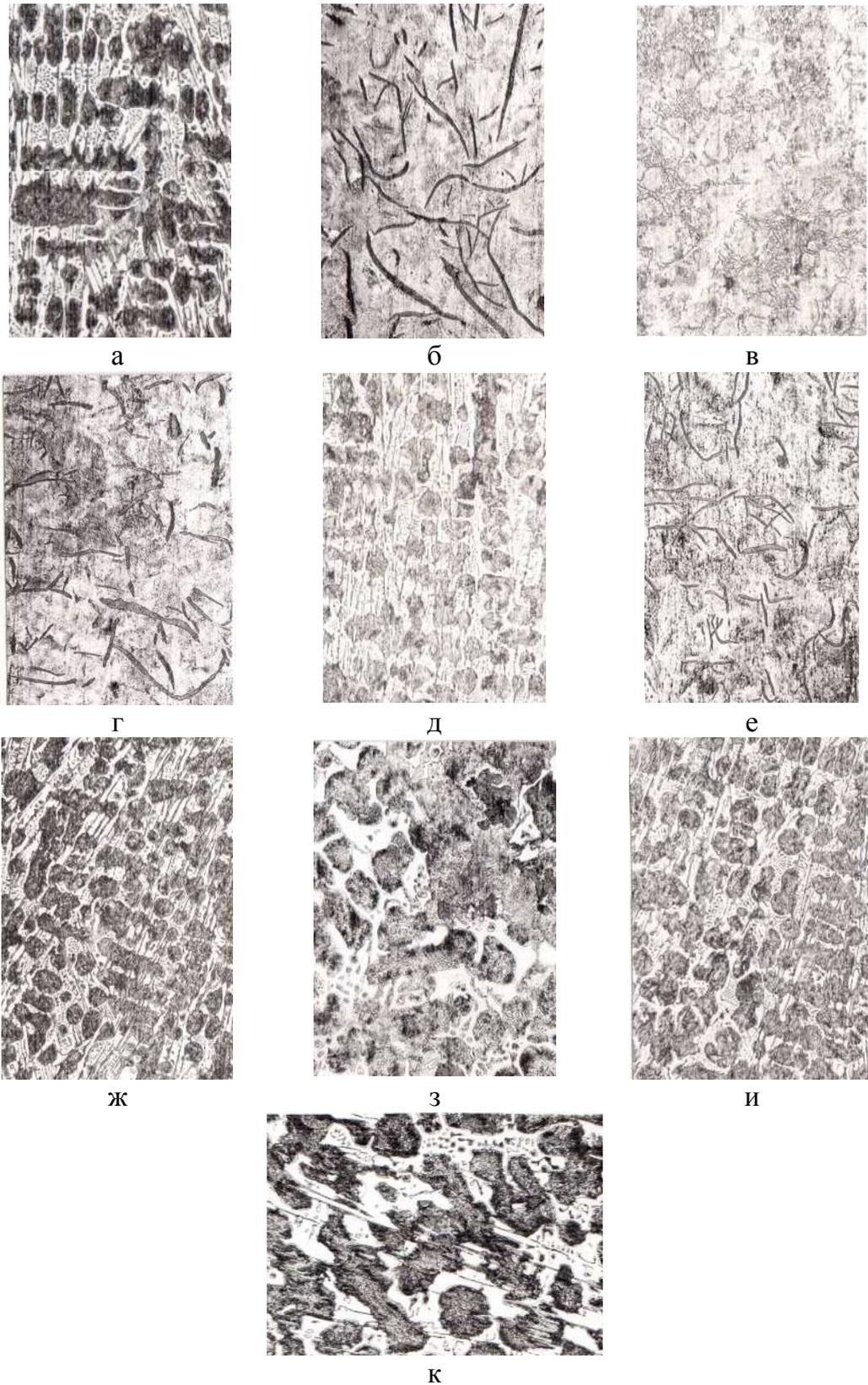


Рис. 2 – Структура чугуна: а, б – исходного (проба 5 табл. 2 и табл. 3, отлитого в металлическую форму и песчано-глинистую, соответственно); в-к – модифицированного комплексным модификатором (пробы 6-9 табл. 2 и табл. 3): в, г – 0,5%; д, е – 1,0%; ж, з – 1,5%; и, к – 2,0%; в, д, ж, и – кристаллизация в кокиле  $\times 100$ ; г, е, з, к – кристаллизация в песчано-глинистой форме  $\times 100$

Таблиця 3

Результаты металлографического исследования структуры образцов белого и серого чугунов, кристаллизующихся в кокиле и песчано-глинистой форме\*

№ образцов	Тип формы	Тип чугуна	Количество введенного модификатора, %	Количество структурных составляющих, %			Микротвёрдость при нагрузке 0,49Н, МПа		Графит	
				Г	Ц	П	П	Ц	форма	размер
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	Песчано-глинистая	Белый	-	3,8	1,0	95,2	2410	-	ПГф1	Пгд 90
1	-//-	-//-	0,5	5,2	-	94,8	2680	-	ПГф1	Пгд90
2	-//-	-//-	1,0	4,2	-	95,8	2830	-	ПГф1	Пгд90
3	-//-	-//-	1,5	0,2	27,7	72,1	2860	8910	ПГф1	Пгд25
4	-//-	-//-	2,0	0,2	30,0	69,8	2360	8570	ПГф1	Пгд25
5	-//-	серый	-	6,3	-	93,7	2410	-	ПГф1	Пгд180
6	-//-	-//-	0,5	4,8	-	95,2	2440	-	ПГф1	Пгд90
7	-//-	-//-	0,6	4,8	-	96,0	2620	-	ПГф1	Пгд90
8	-//-	-//-	1,5	4,0	18,5	77,5	3100	8570	Гф 4	Шгд45
9	-//-	-//-	2,0	0,5	23,6	75,9	2650	7950	ШГф 5	Шгд15
0	кокиль	белый	-	-	28,4	71,6	2650	7520	-	-
1	-//-	-//-	0,5	-	29,3	70,7	2890	6770	-	-
2	-//-	-//-	1,0	-	30,0	70,0	2930	7660	-	-
3	-//-	-//-	1,5	-	31,4	69,6	3060	7800	-	-
4	-//-	-//-	2,0	-	29,0	71,0	2740	7390	-	-
5	-//-	серый	-	-	27,3	72,7	2540	6770	-	-
6	-//-	-//-	0,5	4	-	96	2860	-	ПГф 4	Пгд15
7	-//-	-//-	1,0	-	25,7	66,4	2800	6770	-	-
8	-//-	-//-	1,5	-	27,2	72,8	3030	7660	-	-
9	-//-	-//-	2,0	-	25,3	74,7	2930	6890	-	-

\*количество структурных составляющих сплавов соответствуют доле графита (Г), цементита (Ц) и перлита (П). ПГф1 и ШГф1 – форма включений графита; Пгд и Шгд – длина и диаметр включений графита соответственно [8].

На представленных рисунках отбеленный рабочий слой имеет мелкие включения шаровидного графита, которые плохо проявляются из-за растравленной перлитной составляющей сплава.

Данные металлографического исследования показывают, что оптимальным количеством комплексного модификатора с содержанием не менее 40,6% РЗМ является 1,5-2,0%, что соответствует усвояемости 0,25-0,30% ΣРЗМ. В сером чугуне при отливке в кокиль (образцы 8 и 9) количество цементита находится в пределах 25,3÷27,2%. В отбеленных чугунах (образцы 3 и 4) количество цементита возрастает от 29,0 до 31,4%, а графита отсутствует. В структуре отбеленных чугунов, отлитых в песчано-глинистые формы, доля цементита находится в пределах от 27,7 до 30,0%.

Использование комплексного модификатора, содержащего в своем составе 41% кремния и 4,8% алюминия, не позволило в «чистом» виде установить степень влияния только РЗМ на структурообразование и свойства валковых чугунов.

Для исследования влияния только РЗМ на формирование структуры, количества и формы графита в чугунах были проведены дополнительные исследования по модифицированию доэвтектического чугуна, содержащего (в % по массе): С – 3,23...2,44; Si – 2,66..2,90; Mn – 0,66...0,83; P – 0,041...0,057; S<sub>исх</sub> – 0,032...0,034. Содержание основных элементов, кроме кремния и фосфора, было принято в пределах, используемых для рабочего слоя валков из модифицированных чугунов.

При проведении исследований оценивали влияние скорости охлаждения отливки и влия-

ние отдельных РЗМ на формирование включений графита и формирование структурных фаз.

Металл модифицировали отдельными присадками РЗМ. В состав присадки входили Се и La. Долю вводимых РЗМ изменяли от 0,1 до 1,0%.

Выполненные исследования позволили исключить влияния других элементов, обычно входящих в производимые в настоящее время комплексные модификаторы, на структурообразование доэвтектического чугуна. Результаты исследований приведены в таблице 4.

Таблица 4

Результаты анализа доэвтектических валковых чугунов, модифицированных РЗМ (Се и La)

Тип формы и скорость охлаждения отливки, °С/сек.	№ проб	Содержание РЗМ, %	Количество, %				Форма включений графита	
			феррит	карбиды	графит	перлит		
Песчано-глинистая	1,9	П-1	-	-	-	8,0	остальное	пластинчатый
		П-2	0,0475	57,7	-	7,9		пластинчатый
		П-3	0,064	65,6	-	7,4		вермикулярный
		П-4	0,105	57,8	0,3	5,7		вермикулярный и компактный
		П-5	0,122	35,5	0,3	9,11		компактный и вермикулярный
		П-6	0,234	13,3	18,7	2,0		компактный
		П-7	0,315	11,0	24,5	3,1		компактный
		П-8	0,405	5,1	-	5,5		тонкодифференцированный
Кокильная	5,5	К-1	-	6,9	-	4,2	остальное	розеточный
		К-2	0,0475	30,4	-	6,5		розеточный
		К-3	0,064	34,8	25,7	1,3		компактный
		К-4	0,105	1,3	31,3	0,10		компактный
		К-5	0,122	1,4	33,0	0,10		компактный
		К-6	0,234	2,6	32,4	0,40		компактный
		К-7	0,315	0,9	30,6	0,10		компактный
		К-8	0,405	1,1	30,7	0,60		Компактный точечный

Выполненные исследования показали, что в исходном чугуне до модифицирования графит имеет пластинчатую форму при скорости охлаждения 1,9°С/с, а при 5,5°С/с – розеточную. С повышением содержания РЗМ увеличивается компактность графитных включений. При содержании 0,064-0,105% ΣРЗМ графит становится вермикулярным. Компактный и вермикулярный графит получен при содержании 0,122-0,315% ΣРЗМ. Увеличение содержания ΣРЗМ свыше 0,35% приводит к ухудшению формы графита, при 0,405% ΣРЗМ выделяется тонкодифференцированный междендритный графит.

Проведенные исследования также показывают, что увеличение скорости охлаждения способствует получению компактного, близкого к вермикулярному, графита при меньших концентрациях ΣРЗМ<sub>ост.</sub> При повышенных скоростях охлаждения отливок в кокильных формах (5,5°С/сек) уже при содержании более 0,10% ΣРЗМ в структуре появляется заметное количество карбидной эвтектики, полностью подавляющей кристаллизацию графита. Чугуны с содержанием более 0,10% ΣРЗМ имеют структуру белого чугуна различной дисперсности фаз. При этом с ростом содержания РЗМ в структуре уменьшается количество ледебурита и возрастает общее содержание карбидов. При содержании 0,234% ΣРЗМ и охлаждении чугуна в кокильной форме кристаллизация ледебурита полностью подавлялась и формируется аномальная эвтектика, состоящая из грубых конгломератов кристаллов эвтектических фаз.

Выполненные исследования показали, что влияние РЗМ на форму включений графита менее эффективно, чем магния. При всех исследованных скоростях охлаждения в пределах от 1,9 до 5,5°С/мин не удалось получить по всему сечению отливок графит шаровидной формы. При малых содержаниях (в пределах 0,06-0,10%) ΣРЗМ образуется графит вермикулярной формы. Компактный графит формируется при содержании 0,20-0,35% ΣРЗМ.

Таким образом, РЗМ являются технологичным и эффективным модификатором для рабочего слоя со структурой белого или половинчатого чугунов, и не может быть рекомендован в качестве модификатора для обеспечения в серой зоне центральной части и шейках валков серого чугуна для формирования шаровидного графита.

### Выводы

Результаты проведенных исследований показывают, что модифицирование РЗМ позволяет в широких пределах изменять структуру и физико-механические свойства белых и половинчатых чугунов. Модифицирование РЗМ с добавками Се и У позволяет в широких пределах изменять структуру и твердость белых чугунов рабочего слоя. Оптимальным количеством комплексного модификатора с содержанием не менее 40,6% при производстве формующих инструментов является 1,5-2,0%, что соответствует усвояемости 0,25-0,30% ΣРЗМ.

Анализом установлено, что использование Се и La при модифицировании доэвтектоидного чугуна рабочего слоя при содержании 0,064-0,105% ΣРЗМ способствует формированию графита вермикулярной формы. При содержании 0,122-0,315% ΣРЗМ формируется компактный и вермикулярный граф. Увеличение доли ΣРЗМ свыше 0,35% приводит к ухудшению формы графита.

При модифицировании серого чугуна выявлено, что присадки РЗМ, независимо от скорости кристаллизации, полностью не обеспечивают формирование шаровидного графита.

### Список использованных источников:

1. Скобло Т.С. Прокатные валки из высокоуглеродистых сплавов / Т.С. Скобло, Н.М. Воронцов, С.И. Рудюк. – М. : Металлургия, 1994. – 336 с.
2. Таленберг А.Е. Новые методы сфероидизирующей обработки чугуна за рубежом / А.Е. Таленберг // Литейное производство. – 1984. – № 7. – С. 7-9.
3. Чугун / А.Д. Шерман [и др.]. – 1-е изд. – М. : Металлургия, 1991. – 576 с.
4. Производство и применение прокатных валков : справочник / Т.С. Скобло [и др.]. – Харьков : ЦД № 1, 2013. – 572 с.
5. Официальный сайт NPP Group [Электронный ресурс] : [Веб-сайт]. – Электронные данные. – Режим доступа: [www.npp.ru](http://www.npp.ru).
6. Elkem [Электронный ресурс] : [Веб-сайт]. – Электронные данные. – Режим доступа: [www.elkem.com](http://www.elkem.com).
7. Модифицирование чугуна для отливок [Электронный ресурс] : [Веб-сайт]. – Электронные данные. – Режим доступа: [www.steeltimes.ru/books/blastfurnace/pigironotlivki/24/24.php](http://www.steeltimes.ru/books/blastfurnace/pigironotlivki/24/24.php).
8. ГОСТ 3443-87. Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры. – Введ. 1987-02-26. – М. : Госстандарт СССР, 1988. – 42 с.

### References:

1. Skoblo T.S., Vorontsov N.M., Rudyuk S.I. *Prokatnyye valki iz vysokouglerodistykh splavov* [Roller rolls made of high-carbon alloys]. Moscow, Metallurgija Publ., 1994. 336 p. (Rus.)
2. Talenberg A.Ye. *Novyye metody sferoidiziruyushchey obrabotki chuguna za rubezhom* [New methods of spheroidizing treatment of cast iron abroad]. *Liteynoye proizvodstvo – Foundry, Technologies and Equipment*, 1984, no 7, pp. 7-9. (Rus.)
3. Sherman A.D. *Chugun* [Cast iron]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1991. 576 p. (Rus.)
4. Skoblo T.S., Sidashenko A.I., Aleksandrova N.M., Belkin E.L. *Proizvodstvo i primeneniye prokatnykh valkov : spravochnik* [Production and use of rolling rolls: a reference book]. Khar'kov, 2013. 572 p. (Rus.)
5. *Ofitsial'nyy sayt NPP Group* (Official site of the NPP Group) Available at: [www.npp.ru](http://www.npp.ru). (accessed 29 January 2018). (Rus.)
6. Elkem. Available at: [www.elkem.com](http://www.elkem.com) (accessed 25 January 2018).

7. *Modifitsirovaniye chuguna dlya otlivok* (Modification of cast iron for castings) Available at: [www.steeltimes.ru/books/blastfurnace/pigironotlivki/24/24.php](http://www.steeltimes.ru/books/blastfurnace/pigironotlivki/24/24.php) (accessed 31 January 2018). (Rus.)
8. *GOST 3443-87. Otlivki iz chuguna s razlichnoy formoy grafita. Metody opredeleniya struktury* [State Standard 3443-87. Cast iron castings with graphite of different form. Methods of structure determination]. Moscow, Standartinform Publ., 1988. 42 p. (Rus.)

Рецензент: О.И. Тришевский  
д-р техн.наук, проф., ХНТУСХ

Статья поступила 15.02.2018

УДК 669.017.07

doi: 10.31498/2225-6733.36.2018.142518

© Гаврилова В.Г.<sup>1</sup>, Григор'єва М.О.<sup>2</sup>

### ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НАГРІВУ ПІД ЗАГАРТУВАННЯ НА ХАРАКТЕР ДЕФОРМАЦІЙНОГО ЗМІЦНЕННЯ СТАЛІ КАТЕГОРІЇ МІЦНОСТІ К60

*На основі аналізу діаграм розтягнення зразків сталі категорії міцності К60, попередньо нормалізованих і загартованих у воді з двофазного ( $\gamma$ - $\alpha$ ) інтервалу, розраховано ступінь зміцнення, рівномірне подовження та коефіцієнт зміцнення як відношення різниці меж міцності й плинності до відносного подовження розривних зразків на ділянці діаграми розтягування, що відповідає рівномірному подовженню. Встановлено характер зміни коефіцієнта деформаційного зміцнення  $\eta^*$ . Отримані результати рекомендується використовувати для розробки режимів термозміцнення малоуглецевих низьколегованих сталей, а також при оцінюванні показників їх механічних та експлуатаційних характеристик.*

**Ключові слова:** двофазний ( $\gamma$ - $\alpha$ ) інтервал, коефіцієнт зміцнення, штрипсова сталь К60, ступінь зміцнення, рівномірне подовження.

*Гаврилова В.Г., Григор'єва М.А. Влияние температуры нагрева под закалку на характер деформационного упрочнения стали категории прочности К60. На основе анализа диаграмм растяжения образцов стали К60, предварительно нормализованных и закаленных в воде из двухфазного ( $\gamma$ - $\alpha$ ) интервала, рассчитаны степень упрочнения, равномерное удлинение и коэффициент упрочнения как отношение разности пределов прочности и текучести к относительному удлинению разрывных образцов на участке диаграммы растяжения, соответствующему равномерному удлинению. Установлен характер изменения коэффициента деформационного упрочнения  $\eta^*$ . Полученные результаты рекомендуется использовать для разработки режимов термоупрочнения малоуглеродистых, низколегированных сталей, а также при оценке показателей их механических и эксплуатационных характеристик.*

**Ключевые слова:** двухфазный ( $\gamma$ - $\alpha$ ) интервал, коэффициент упрочнения, штрипсовая сталь К60, степень упрочнения, равномерное удлинение.

**V.G. Gavrylova, M.O. Grigoreva. Influence of quenching temperature on the character of steel K60 strain hardening.** The article analyses the strain-stress diagrams of steel K60, previously normalized and quenched in water from two-phase ( $\gamma$ - $\alpha$ ) interval; the degree of hardening, even elongation and hardening coefficient were calculated as the ratio of the tensile strength and yield strength difference to the relative elongation of ten-

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, [gavrilova\\_v\\_g@mail.ua](mailto:gavrilova_v_g@mail.ua)

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь