

УДК 621.74:621.74

Иванова Л. Х., Маймур Я. С., Осипенко И. А., Белый А. П., Муха Д. В.

КОМПЛЕКСНОМОДИФИЦИРОВАННЫЕ ВАЛКОВЫЕ ЧУГУНЫ

Постановка проблемы. В процессе работы прокатные валки подвержены различным механическим и тепловым воздействиям со стороны прокатного стана и прокатываемого металла. Большое влияние на их стойкость оказывают условия эксплуатации (химический состав и температура прокатываемого металла, режим обжатий, эффективность и равномерность охлаждения валков и др.) и качество валков (физико-механические свойства и эксплуатационные характеристики материала – износостойкость и термостойкость). Технологические особенности производства чугуновых прокатных валков зависят от условий их эксплуатации [1, 2]. Улучшение физико-механических свойств и повышение стойкости прокатных валков может быть достигнуто комплексным модифицированием их материалов.

Целью исследований было исследование влияния комплексного модифицирования и легирования титаном на структуру и физико-механических свойств валкового чугуна.

Экспериментальная часть. В работе [2] были определены скорости охлаждения рабочего слоя и сердцевинны валков, имеющие место при затвердевании чугуна в комбинированной литейной форме. Установлено, что кристаллизация чугуна в рабочем слое валков проходит в диапазоне скоростей охлаждения 1,0–6,0, а в осевой части отливки – 0,05–0,5 град/с. В лабораторных условиях при проведении исследований воспроизвели скорости охлаждения 0,45 и 4,5 град/с.

Рядом исследований [2–4] однозначно было показано, что модифицирование белых валковых чугунов металлическим магнием приводит к снижению физико-механических свойств. В связи с этим в качестве основного модификатора был использован комплексный модификатор на основе РЗМ, для сравнения с ним – комплексный модификатор на основе магния, а из легирующих присадок – ферротитан.

Влияние возрастающих количеств комплексных модификаторов СРЗМ30, КМг9 и ферротитана на форму графитных включений, микроструктуру матрицы и свойства валкового чугуна (табл. 1) исследовали на серии из 24 лабораторных плавок.

Таблица 1

Химический состав базового чугуна

Тип чугуна	Содержание химических элементов, мас.%							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Fe
I	3,82	1,06	0,84	0,20	0,03	0,45	2,15	ост.

Немодифицированный чугун при скорости охлаждения 4,5 град/с имел микроструктуру половинчатого чугуна с небольшим количеством графитных включений пластинчатой формы с характеристикой ПГф2–ПГд180–ПГр3–ПГ2 ГОСТ 3443-87 и цементита ледебурита Ц40–Цп6000, металлическая основа вида Пт1 и Ф состояла из перлита дисперсностью ПД0,5 и 12 % феррита (табл. 2). При охлаждении со скоростью 0,45 град/с этот же чугун имел микроструктуру серого перлитно-ферритного чугуна с пластинчатым графитом, которая характеризовалась следующими баллами: графит ПГф1–ПГд350–ПГр3–ПГ10, матрица вида Пт1 и Ф, П70 (Ф30), перлит дисперсностью ПД1,0 и ПД0,5.

Известно, что для получения чугуна с вермикулярным графитом необходимо иметь в расплаве 0,01–0,025% остаточного содержания магния. В связи с тем, что при литье прокатных валков скорости охлаждения различных частей отливки значительно выше или ниже, чем при получении машиностроительных отливок, провели серию плавок

для установления областей образования в микроструктуре исследуемых чугунов графитных включений вермикулярной формы при модифицировании лигатурой КМг9. Присадку лигатуры изменяли в пределах 0,3–1,2 % от массы расплава (табл. 3).

Таблица 2

Микроструктура и свойства исходных чугунов

Индекс плавки	Скорость охлаждения, град/с	Количество структурных составляющих, %				Свойства чугуна		
		феррит	перлит	цементит	графит	$\sigma_B^{изг}$, МПа	σ_B^p , МПа	НВ
1	4,5	12,0	53,5	32,0	ПГ2,5	440	230	410
	0,45	20,0	71,2	–	ПГ9,8	500	310	190

Таблица 3

Микроструктура и свойства чугунов, обработанных лигатурой КМг9

Индекс плавки	Присадка лигатуры КМг9, %	Содержание Mg _{ост} , %	Скорость охлаждения, град/с	Количество структурных составляющих, %				Свойства чугуна		
				феррит	перлит	цементит	графит	$\sigma_B^{изг}$, МПа	σ_B^p , МПа	НВ
2	0,3	0,012	4,5	6,1	60,0	30,1	ПГ3,8 (ВГ20)	450	230	417
			0,45	19,8	69,0	-	ПГ11,2	500	315	190
3	0,5	0,019	4,5	5,8	60,0	30,7	ВГ3,5	475	270	420
			0,45	19,0	70,9	-	ПГ10,1 (ВГ25)	530	345	190
4	0,6	0,022	4,5	6,5	60,0	31,2	ВГ2,3	480	290	433
			0,45	16,1	74,0	-	ВГ9,9	780	460	200
5	0,7	0,026	4,5	6,0	60,8	31,0	ВГ2,2 (ШГ50)	475	270	431
			0,45	16,0	74,2	-	ВГ9,8	675	400	198
6	0,9	0,030	4,5	3,5	62,3	32,1	ШГ2,1	540	310	434
			0,45	15,8	74,6	-	ШГ9,6 (ВГ20)	850	485	200
7	1,0	0,037	4,5	3,5	61,8	32,5	ШГ2,2	540	325	440
			0,45	14,5	76,0	-	ШГ9,5	865	485	202

При скорости охлаждения 4,5 град/с уже остаточное содержание магния в чугуне 0,019 % позволило изменить форму графитных включений с пластинчатой на вермикулярную. Следует отметить, что модифицирование лигатурой, содержащей магний, при малых концентрациях (0,012 %) вызывало в микроструктуре чугуна увеличение количества графита, а при дальнейшем повышении содержания модификатора происходило монотонное уменьшение количества графита (см. табл. 3). Для скорости охлаждения 0,45 град/с область выделения графитных включений вермикулярной формы была ограничена концентрациями магния 0,022–0,030 %. Столь узкие пределы областей образования и существования графитных включений вермикулярной формы делают процесс получения их очень нестабильным. Однако при получении в чугуне графитных включений вермикулярной формы уровень свойств модифицированных магнием чугунов был выше, чем исходного чугуна: предел прочности при изгибе – на 8–35, предел прочности при растяжении – на 17–29 %.

Для определения интервала концентраций редкоземельных металлов, позволяющего стабильно получать графитные включения вермикулярной формы, провели 8 плавки с обработкой исходного чугуна возрастающими количествами лигатуры СРЗМ30 (табл. 4).

Таблица 4

Микроструктура и свойства чугунов, обработанных лигатурой СРЗМ30

Индекс плавки	Присадка ФС30-РЗМ30, % по массе	Среднее содержание РЗМ _{ост} , %	Скорость охлаждения, град/с	Количество структурных составляющих, %				Свойства чугуна		
				феррит	перлит	цементит	графит	$\sigma_B^{изг}$, МПа	σ_B^P , МПа	НВ
8	0,1	0,024	4,5	6,1	59,8	31,0	ПГ3,1 (ВГ15)	445	230	419
			0,45	16,1	73,9	-	ПГ10,0	505	300	192
9	0,2	0,045	4,5	4,5	59,8	33,0	ВГ2,7	470	250	425
			0,45	14,0	76,0	-	ПГ10,0	510	305	193
10	0,3	0,066	4,5	2,9	61,8	32,8	ВГ2,5	485	270	421
			0,45	14,6	75,6	-	ПГ9,8 (ВГ20)	510	300	193
11	0,4	0,085	4,5	2,7	62,0	33,1	ВГ2,2 (ШГ20)	495	290	428
			0,45	14,4	75,8	-	ПГ9,8 (ВГ30)	520	350	196
12	0,5	0,104	4,5	2,5	61,3	33,9	ВГ2,3 (ШГ30)	500	300	428
			0,45	15,0	75,2	-	ВГ9,8	690	420	198
13	0,6	0,125	4,5	2,5	61,4	34,1	ШГ2,0	520	320	431
			0,45	14,5	76,5	-	ВГ9,0 (ШГ15)	790	460	197
14	0,7	0,144	4,5	2,0	62,6	34,9	ШГ0,5	525	340	435
			0,45	13,8	78,0	-	ВГ8,2 (ШГ40)	825	465	196
15	0,8	0,165	4,5	1,5	62,9	35,6	-	520	340	439
			0,45	13,2	79,0	-	ШГ7,8	895	500	201

Модифицирование исследуемых чугунов возрастающими количествами лигатуры СРЗМ30 вызывало при скорости охлаждения 4,5 град/с изменение формы графитных включений и увеличение степени дисперсности перлита. Уже при присадке 0,2 % по массе СРЗМ30 в расплав чугуна при РЗМ_{ост} – 0,045 % (табл. 4, плавка 9) около 80 % графитных включений в нем приобретали вермикулярную форму ВГф2–ВГр1–ВГ100. Вермикулярная форма графитных включений в исследуемом чугуне сохранялась до концентраций РЗМ_{ост} – 0,104 % включительно (см. табл. 4, плавки 10–12). Графит при содержании РЗМ_{ост} – 0,085 % в чугуне характеризовался баллами ВГф2–ВГр1–ВГ92, а при содержании РЗМ_{ост} – 0,104% – ВГф2–ВГр1–ВГ70. При концентрациях РЗМ_{ост} менее 0,045 % форма графитных включений оставалась пластинчатой. Дальнейшее же увеличение содержания РЗМ_{ост} в чугуне свыше 0,104 до 0,144 % обеспечивало получение в чугуне графитных включений шаровидной формы (ШГф4–ШГд45–ШГр1) и полному подавлению их выделения при концентрации РЗМ_{ост} – 0,165 %. Кроме того, модифицирование валкового чугуна РЗМ привело к значительному снижению (на 50–87,5 %) количества феррита. Количество карбидной фазы увеличилось незначительно (см. табл. 4).

Структурные изменения в чугунах сопровождалось повышением их прочностных характеристик. При скорости охлаждения 4,5 град/с с оптимальной присадкой лигатуры СРЗМ30 0,5 % и соответственно содержанию РЗМ_{ост} – 0,104 % предел прочности $\sigma_B^{изг}$ повысился на 14, предел прочности σ_B^P – на 30 и твердость НВ – на 4 % (см. табл. 4). При скорости охлаждения 0,45 град/с около 30 % графитных включений в исследуемых чугунах приобретали вермикулярную форму ВГф1 ГОСТ 3443-87 при концентрациях РЗМ_{ост} – 0,085 %, и только при концентрациях РЗМ_{ост} – 0,104–0,144 % графитные включения приобретали вермикулярную форму ВГф2–ВГ98–ВГ85 ГОСТ 3443-87. Увеличение концентраций РЗМ_{ост} до 0,165 % привело к образованию только шаровидного графита ШГ4–ШГд45–ШГр1. Модифицирование чугунов

РЗМ забезпечувало в матриці зниження кількості ферриту на 20–34 % і підвищення дисперсності перліта. Твердість чугуна змінювалась незначительно, прочностні властивості підвищались в середньому на 27 % – при отриманні графітних включень вермикулярної форми і на 38–44 % – при отриманні графітних включень шаровидної форми (см. табл. 4). Таким образом, для швидкостей охолодження 4,5 і 0,45 град/с інтервали концентрацій РЗМ, забезпечуючі отримання графітних включень вермикулярної форми в досліджуваних чугунах, невеликі і складають 0,045–0,104 і 0,104–0,144 % відповідно.

Учитывая положительное влияние титана на свойства валковых чугунов, для расширения области образования графитных включений вермикулярной формы был использован ферротитан. На серии лабораторных плавов (табл. 5, плавки 16–20) при минимальной и обеспечивающей получение графитных включений вермикулярной формы (скорость охлаждения 4,5 град/с) постоянной во всех случаях обработке расплава лигатурой СРЗМ30 0,2 % по массе (РЗМ_{ост} – 0,040–0,045 %) исследовали влияние возрастающих количеств титана (0,04–0,59 %) на микроструктуру и прочностные свойства чугуна. Следует отметить, что уже минимальные количества титана в составе чугуна (0,04 %) позволяли получать весь графит в вермикулярной форме при скорости охлаждения 4,5 град/с, а при скорости охлаждения 0,45 град/с – только 25 % графитных включений имели вермикулярную форму. Увеличение содержания титана в чугуне до 0,59 % приводило к увеличению до 50 % количества вермикулярного графита в чугунах, затвердевавших со скоростью 0,45 град/с.

Таблица 5

Микроструктура и свойства чугунов, обработанных лигатурой СРЗМ30 и ферротитаном

Индекс плавки	Присадка, % по массе		Остаточное содержание, %		Скорость охлаждения, град/с	Количество структурных составляющих, %				Свойства чугуна		
	КМ	FeTi	РЗМ	Ti		феррит	перлит	цементит	графит	$\sigma_{в}^{изг}$, МПа	$\sigma_{в}^p$, МПа	НВ
16	0,2	0,06	0,043	0,04	4,5	4,7	59,3	32,5	ВГ3,5	450	230	418
					0,45	14,6	74,6	-	ПГ10,8 (ВГ25)	500	315	195
17	0,1	0,13	0,014	0,081	4,5	4,7	59,4	32,6	ВГ3,3	450	240	418
					0,45	14,4	75,2	-	ПГ10,4 (ВГ35)	500	320	200
18	0,2	0,4	0,044	0,24	4,5	2,4	62,7	33,4	ВГ1,5	480	250	437
					0,45	14,0	76,2	-	ПГ9,8 (ВГ50)	510	330	204
19	0,2	0,6	0,045	0,41	4,5	2,5	62,6	33,6	ВГ1,3	490	265	432
					0,45	14,1	76,2	-	ПГ9,7 (ВГ50)	510	330	218
20	0,2	0,9	0,040	0,59	4,5	2,2	60,7	33,9	ВГ3,2	490	260	432
					0,45	13,6	77,4	-	ПГ9,0 (ВГ50)	515	325	217
21	0,3	0,6	0,065	0,42	4,5	2,7	61,9	33,0	ВГ2,4	495	285	427
					0,45	13,8	76,6	-	ПГ9,6 (ВГ50)	530	340	215
22	0,4	0,6	0,084	0,40	4,5	2,2	62,3	33,4	ВГ2,1	505	310	431
					0,45	13,8	77,0	-	ВГ9,2	670	400	215
23	0,5	0,6	0,103	0,40	4,5	2,0	62,4	33,6	ВГ2,0 (ШГ40)	530	330	431
					0,45	13,4	77,3	-	ВГ9,3	695	460	217
24	0,7	0,5	0,156	0,41	4,5	1,5	65,0	33,0	ШГ0,5	535	340	435
					0,45	12,3	80,0	-	ВГ7,7	715	470	220

Прочностные свойства модифицированных РЗМ чугунов, содержавших 0,04–0,08 % титана (см. табл. 5, плавки 16 и 17) и затвердевавших при скорости 4,5 град/с, практически оставались на уровне исходных и снижались на 4–9 % по сравнению с модифицированными не содержащими титан. При дальнейшем увеличении содержания титана до 0,41 % прочностные свойства чугунов возрастали в среднем на 5 % по сравнению с модифицированными и на 9–15 % по сравнению с исходными чугунами (см. табл. 5, плавки 20 и 21). Увеличение содержания титана до 0,59 % практически не повлияло на прочностные свойства исследованных модифицированных чугунов. Влияние же титана в исследованном интервале концентраций на прочностные свойства чугунов, затвердевавших со скоростью 0,45 град/с, было незначительным. Таким образом, учитывая вышеизложенное оптимальным содержанием титана в модифицированных РЗМ чугунах следует считать его концентрацию 0,3–0,5 %.

Для установления области образования графитных включений вермикулярной формы при обработке возрастающими количествами лигатуры СРЗМ30 при постоянном содержании титана 0,040–0,042 % провели 4 плавки (см. табл. 5, плавки 21–24). Проведенные исследования показали, что при содержании титана 0,40–0,42 % и скорости охлаждения 4,5 град/с уже при концентрациях в РЗМ_{ост} – 0,065–0,084 % в чугуне выделялись графитные включения вермикулярной формы. Область выделения графитных включений вермикулярной формы расширялась до концентрации РЗМ_{ост} – 0,156 %, затем следовала область образования графитных включений шаровидной формы, а при концентрации РЗМ_{ост} – 0,20 % выделение графита полностью подавлялось. Расширение области выделения графитных включений вермикулярной формы при обработке чугуна лигатурой СРЗМ30 и ферротитаном происходило и при скорости охлаждения 0,45 град/с. Область образования вермикулярного графита расширялась с интервала концентраций РЗМ_{ост} от 0,104–0,144 до 0,084–0,156 %. Факт расширения области выделения графитных включений вермикулярной формы в сторону уменьшения остаточных содержаний РЗМ при вводе титана нуждается в дополнительных исследованиях.

Характер изменения прочностных свойств чугунов, обработанных титаном и лигатурой СРЗМ30, при разных скоростях охлаждения был примерно одинаков, то есть прочностные свойства монотонно увеличивались. Предел прочности $\sigma_{\text{в}}^{\text{изг}}$ с увеличением количества титана в модифицированных чугунах повысился максимально на 9, предел прочности $\sigma_{\text{в}}^{\text{п}}$ – на 28 % при скорости охлаждения 4,5 град/с, а при скорости охлаждения 0,45 град/с – предел прочности $\sigma_{\text{в}}^{\text{изг}}$ повысился на 40, предел прочности $\sigma_{\text{в}}^{\text{п}}$ – на 44 % (см. табл. 5).

ВЫВОДЫ

Оптимальными остаточными содержаниями РЗМ и титана в исследуемых чугунах следует считать 0,082–0,085 и 0,40–0,41 %, соответственно, когда при исследованных скоростях 4,5 и 0,45 град/с в микроструктуре их получали только вермикулярный графит. Свойства чугунов с оптимальными остаточными содержаниями РЗМ и титана по сравнению с исходными чугунами были выше: $\sigma_{\text{в}}^{\text{изг}}$ на 15 и 38 %, $\sigma_{\text{в}}^{\text{п}}$ – на 35 и 29 %, твердость – на 5 и 13 %, соответственно при скоростях охлаждения 4,5 и 0,45 град/с.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марукович Е. И. Износостойкие сплавы / Е. И. Марукович., М. И. Карпенко. – М. : Машиностроение, 2005. – 428 с.
2. Белай Г. Е. Исследование влияния модифицирования на кристаллизацию чугуна, структуру и свойства листопрокатных валков : автореф. дис. на здобуття наук ступеня канд. техн. наук : спец. 05.323 «Литейное производство» / Г. Е. Белай. – Д., 1967. – 23 с.
3. Редкоземельные металлы в валковых чугунах / Л. Х. Иванова., Л. А. Шапран., А. Ю. Хитько, И. В. Шляпин / Сучасні проблеми металургії. Наук. праці. Т.13. – Д. : Системні технології, 2010. – С.31–44.
4. Иванова Л. Х. Повышение стойкости прокатных валков модифицированием редкоземельными металлами / Л. Х. Иванова // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2006. – № 3. – С. 36–38.

Статья поступила в редакцию 15.04.2014 г.