

3. Запуск УУ непосредственно на требуемую орбиту малоэффективен для всех вариантов выведения КТ.

4. При всех способах запуска использование ЖРДМТ на этапах выведения КТ и спуска КТ с УУ неэффективно.

Предметом дальнейших исследований может быть рассмотрение других маневров очистки и сравнение их эффективности.

Библиографические ссылки

1. **Дронь Н. М.** Космический тральщик для очистки околоземного пространства от космического мусора / Н. М. Дронь, А. И. Кондратьев, П. Г. Хорольский, Л. Г. Дубовик // Шоста Всеукраїнська науково-практична конференція «Інноваційний потенціал української науки – XXI сторіччя» (1–15 квітня 2010 р.): збірник доповідей. – Запоріжжя: Вид-во ПГА, 2010. – С. 134–136.

2. **Дронь Н. М.** Массовые характеристики космических мусорособирающих аппаратов, выводимых известными ракетами-носителями с использованием электроракетной двигательной установки / Н. М. Дронь, Л. Г. Дубовик, А. И. Кондратьев, П. Г. Хорольский // Механіка та машинобудування. – 2010. – № 1. – С. 8–12.

3. **Дронь Н. М.** Массовая эффективность космических тральщиков при использовании жидкостных ракетных двигателей малой тяги / Н. М. Дронь, А. И. Кондратьев, П. Г. Хорольский, Л. Г. Дубовик // Техническая механика. – 2010. – № 3. – С. 100–105.

4. **Дронь Н. М.** Эффективность космических тральщиков при циклическом движении между высокой и низкой орбитами / Н. М. Дронь, П. Г. Хорольский, Л. Г. Дубовик // III Международная конференция «Космические технологии: настоящее и будущее»: тез. докл. – Д., 2011. – С. 33.

5. **Дронь Н. М.** Эффективность очистки околоземного пространства при отдельном выведении космического тральщика и улавливающего устройства / Н. М. Дронь, П. Г. Хорольский, Л. Г. Дубовик // Сборник докладов научной конференции «Информационные технологии в управлении сложными системами». – Д.: Изд-во «Свидлер А.Л.», 2011. – С. 202–205.

6. **Кондратьев А. И.** Методика расчета тяговых и энергомассовых характеристик мусорособирающего космического аппарата с электродвигательной установкой / А. И. Кондратьев, П. Г. Хорольский, Л. Г. Дубовик // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: «ХАИ», 2009. – № 10 (67). – С. 82–84.

7. **Микиша А. Н.** Загрязнение космоса / А. Н. Микиша, Л. В. Рыхлова, М. А. Смирнов // Вестник РАН. – 2001. – Т. 71, № 1. – С. 26–31.

8. **Isakowitz S. J.** International Reference Guide to Space Launch Systems. Second Edition / S. J. Isakowitz. – Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1991. – 341 p.

Надійшла до редколегії 02.11.2011.

УДК 621.74.002:669.13

Л. Х. Иванова, Е. В. Колотило, А. Ю. Калашникова

Национальная металлургическая академия Украины

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ВАЛКОВЫХ КОМПЛЕКСНО-МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЧУГУНОВ

Визначені необхідні концентрації модифікуючих та легуючих хімічних елементів для отримання в структурі валкових чавунів графітних включень вермікулярної форми, а також міцнісні властивості чавунів.

Ключові слова: чавун, модифікатор, вермікулярний графіт, мікроструктура, властивості.

© Л. Х. Иванова, Е. В. Колотило, А. Ю. Калашникова, 2012

Определены необходимые концентрации модифицирующих и легирующих химических элементов для получения в структуре валковых чугунов графитных включений вермикулярной формы, а также прочностные свойства этих чугунов.

Ключевые слова: чугун, модификатор, вермикулярный графит, микроструктура, свойства.

Identified necessary concentration modified and alloying chemical elements for getting in structure of roll foundry irons of graphite inclusions vermicular form, and also strength properties of cast irons.

Key words: cast-iron, modifcator, vermicular graphite, microstructure, properties.

Чугунные прокатные валки – крупные отливки, рабочий слой которых состоит из белого или половинчатого, а сердцевина – из серого чугуна. В валковой литейной форме скорости охлаждения рабочего слоя и сердцевины валка составляют 5,5 и 0,5 град/с соответственно. В настоящее время прокатные валки из чугуна с вермикулярным графитом не изготавливают.

Целью работы было определение необходимых концентраций модифицирующих и легирующих химических элементов для получения в структуре валков графитных включений вермикулярной формы, а также исследование прочностных свойств этих чугунов.

Исследования проводили в лабораторных условиях: плавку в индукционной печи, микроструктуру и свойства – по стандартным методикам.

Проведенными ранее исследованиями [1] было показано, что модифицирование белых и половинчатых валковых чугунов металлическим магнием и его лигатурами приводит к снижению их физико-механических свойств. В связи с этим в качестве модификаторов были использованы лигатуры на основе редкоземельных металлов (РЗМ) марки СРЗМ30 и на основе магния марки КМг9, а из легирующих присадок – ферротитан марки ФТи70 и медь марки М2.

Влияние возрастающих количеств лигатур СРЗМ30, КМг9, ферротитана и меди на форму графитных включений, микроструктуру матрицы и свойства разных валковых чугунов (табл. 1) исследовали на шести сериях лабораторных плавов.

Таблица 1

Химический состав базовых чугунов

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.
II	3,44	1,03	0,52	0,22	0,03	-	-	ост.

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

Как и чугун типа I немодифицированный и нелегированный чугун типа II при скорости охлаждения 5,5 град/с имел структуру половинчатого чугуна, содержащего 3,8% графитных включений пластинчатой формы и 30,2% ледобурита. Матрица состояла из перлита и феррита (табл. 2). При охлаждении со скоростью 0,5 град/с этот чугун также как и чугун типа I имел структуру серого перлитно-

ферритного чугуна с пластинчатым графитом. Прочностные свойства легированного хромом и никелем чугуна типа I были выше на 7–15%, чем такие же свойства чугуна типа II (табл. 2).

Таблица 2

Микроструктура и свойства исходных чугунов

Индекс плавки	Тип чугуна	Скорость охлаждения, град/с	Количество структурных составляющих, %				Свойства чугуна		
			Феррит	Перлит	Цементит	Графит	$\sigma_{в}^{изг}$, МПа	$\sigma_{в}^p$, МПа	НВ
1	I	5,5	12,0	53,5	32,0	ПГ2,5	440	230	410
		0,5	20,0	71,2	-	ПГ9,8	500	310	190
2	II	5,5	16,0	49,0	30,2	ПГ3,8	400	200	391
		0,5	25,0	64,9	-	ПГ10,1	450	290	187

Для определения интервала концентраций $RZM_{ост}$, позволяющего стабильно получать графитные включения вермикулярной формы, провели первую серию плавки с обработкой исходного чугуна типа I возрастающими количествами лигатуры СРЗМ30 от 0,1 до 0,8 мас. %.

Модифицирование исследуемых чугунов возрастающими количествами лигатуры СРЗМ30 вызывало при скорости охлаждения 5,5 град/с изменение формы графитных включений и увеличение степени дисперсности перлита. Уже при присадке 0,2% по массе СРЗМ30 в расплав чугуна I при $RZM_{ост} - 0,045\%$. Около 80% графитных включений в нем приобретали вермикулярную форму ВГф2-ВГр1-ВГ100. Вермикулярная форма графитных включений в исследуемом чугуне сохранялась до концентраций $RZM_{ост} - 0,104\%$ включительно. Графит при содержании $RZM_{ост} - 0,085\%$ в чугуне характеризовался баллами ВГф2-ВГр1-ВГ92, а при содержании $RZM_{ост} - 0,104\%$ – ВГф2-ВГр1-ВГ70. При концентрациях $RZM_{ост}$ менее 0,045% форма графитных включений оставалась пластинчатой. Дальнейшее же увеличение содержания $RZM_{ост}$ в чугуне свыше 0,104 до 0,144% обеспечивало получение в чугуне графитных включений шаровидной формы (ШГф4-ШГд45-ШГр1) и полное подавление их выделения при концентрации $RZM_{ост} - 0,165\%$. Модифицирование валкового чугуна РЗМ привело к значительному снижению (на 50–87,5%) количества феррита. Количество карбидной фазы увеличилось незначительно. Структурные изменения в чугунах сопровождались повышением их прочностных характеристик. При оптимальной присадке лигатуры ФС30РЗМ30 0,5% и соответственно содержании $RZM_{ост} - 0,104\%$ предел прочности $\sigma_{в}^{изг}$ повысился на 14%, предел прочности $\sigma_{в}^p$ – на 30% и твердость НВ – на 4% (рис. 1).

При скорости охлаждения 0,5 град/с около 30% графитных включений в исследуемых чугунах приобретали вермикулярную форму ВГф1 ГОСТ 3443-87 при концентрациях $RZM_{ост} - 0,085\%$, и только при концентрациях $RZM_{ост} - 0,104-0,144\%$ графитные включения приобретали вермикулярную форму ВГф2- ВГ98-ВГ85 ГОСТ 3443-87. Увеличение концентраций $RZM_{ост}$ до 0,165 % привело к образованию только шаровидного графита ШГ4-ШГд45-ШГр1. Модифицирование чугунов РЗМ обеспечивало в матрице снижение количества феррита на 20–34% и повышение дисперсности перлита. Твердость чугуна изменялась незначительно, прочностные свойства повышались в среднем на 27% – при получении графитных включений вермикулярной формы и на 38–44% – при получении графитных включений шаровидной формы (рис. 1).

Таким образом, для скоростей охлаждения 5,5 и 0,5 град/с интервалы концентраций, обеспечивавшие получение графитных включений вермикулярной формы в исследованных чугунах составляли 0,045–0,104 и 0,104–0,144% соответственно.

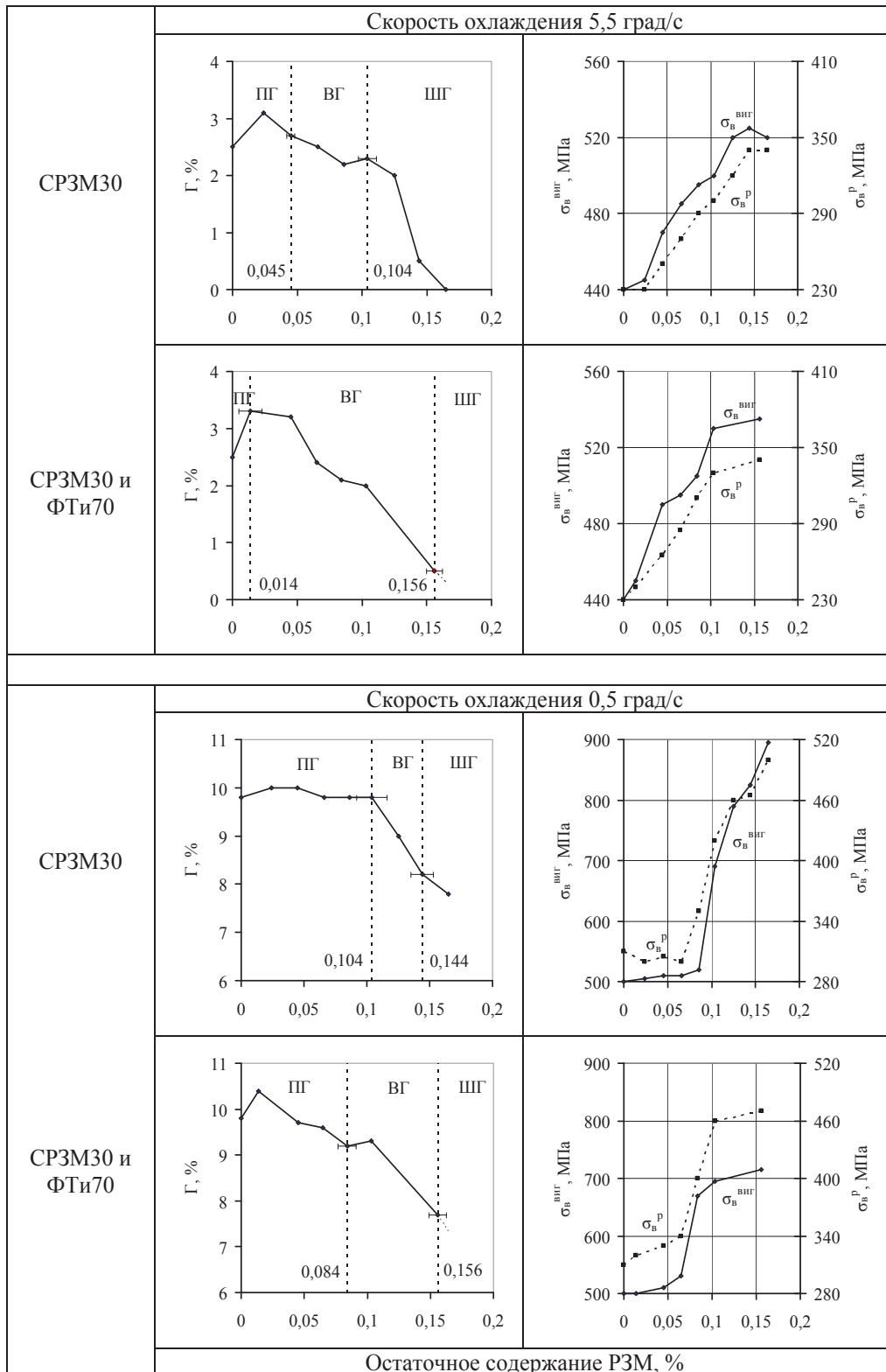


Рис. 1. Структура и свойства чугунов, модифицированных лигатурой СРЗМ30 и ферротитаном

Для расширения области образования графитных включений вермикулярной формы рекомендуется использовать обработку антисфероидизирующими элементами Iв, IIIа, IV и V групп Периодической системы Д. И. Менделеева (цинк, кадмий, алюминий, олово, сурьма, свинец, мышьяк, висмут), а также элементами группы IVа (титан, цирконий, гафний). Учитывая положительное влияние титана на свойства валковых чугунов [2], для расширения области образования графитных включений вермикулярной формы применяли ферротитан.

Во второй серии лабораторных плавок при минимальной и обеспечивавшей получение графитных включений вермикулярной формы (скорость охлаждения 5,5 град/с) постоянной во всех случаях обработке расплава лигатурой СРЗМ30 0,2% по массе ($P_{\text{ост}} - 0,040 - 0,045\%$) исследовали влияние возрастающих количеств титана от 0,1 до 0,5% на микроструктуру и прочностные свойства чугуна типа I. Следует отметить, что уже минимальное остаточное содержание титана в составе модифицированного чугуна (0,04%) позволяли получать весь графит в вермикулярной форме при скорости охлаждения 5,5 град/с, а при скорости охлаждения 0,5 град/с – только 25% графитных включений имели вермикулярную форму. Увеличение остаточного содержания титана в чугуне до 0,42% приводило к повышению до 50% количества вермикулярного графита в чугунах, затвердевавших со скоростью 0,5 град/с.

Прочностные свойства модифицированных РЗМ чугунов, содержавших 0,04–0,08% титана и затвердевавших при скорости 5,5 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 0,42% прочностные свойства чугунов возрастали в среднем на 5% по сравнению с модифицированными и на 9–15% – по сравнению с исходными чугунами. Дальнейшее 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 0,5 град/с, было незначительным. Таким образом, учитывая вышеизложенное, оптимальным содержанием титана в модифицированных РЗМ чугунах следует считать его концентрацию 0,40–0,42%.

Для установления области образования графитных включений вермикулярной формы при обработке возрастающими количествами лигатуры СРЗМ30 при постоянном содержании титана 0,40–0,42% провели третью серию плавок. Проведенные исследования показали, что при таких содержаниях титана и скорости охлаждения 5,5 град/с уже при концентрации $P_{\text{ост}} - 0,014\%$ в чугуне выделялись графитные включения вермикулярной формы. Область выделения графитных включений вермикулярной формы расширялась до концентрации $P_{\text{ост}} - 0,156\%$, затем следовала область образования графитных включений шаровидной формы, а при концентрации $P_{\text{ост}} - 0,20\%$ выделение графита полностью подавлялось (рис. 1).

Расширение области выделения графитных включений вермикулярной формы при обработке чугуна лигатурой на основе РЗМ и ферротитаном происходило и при скорости охлаждения 0,5 град/с (рис. 1). Область образования вермикулярного графита расширялась с интервала концентраций $P_{\text{ост}} 0,104 - 0,144$ до 0,084–0,156%. Факт расширения области выделения графитных включений вермикулярной формы в сторону уменьшения остаточных содержаний РЗМ при вводе титана дополнительно не исследовали. Однако, в работе [3] было показано, что добавка губчатого титана в жидкий обработанный модификатором чугун демодифицирующего действия не оказывала и даже способствовала получению шаровидного графита, то есть проявляла модифицирующее действие, которое, очевидно, усиливало действие РЗМ, что приводило к вермикулизации графитных включений при более низких содержаниях модификатора.

Характер изменения прочностных свойств чугунов, обработанных титаном и лигатурой на основе РЗМ при разных скоростях охлаждения был примерно одинаковым: прочностные свойства монотонно увеличивались (рис. 1). Предел прочности $\sigma_{\text{в}}^{\text{изг}}$ с увеличением количества титана в модифицированных чугунах повысился максимально на 9%, предел прочности $\sigma_{\text{в}}^{\text{р}}$ – на 28% при скорости охлаждения 5,5 град/с, а при скорости охлаждения 0,5 град/с – предел прочности $\sigma_{\text{в}}^{\text{изг}}$ повысился на 40%, а предел прочности $\sigma_{\text{в}}^{\text{р}}$ – на 44%.

Оптимальными остаточными содержаниями РЗМ и титана в исследуемых чугунах следует считать 0,084–0,085% и 0,40–0,42% соответственно, когда при исследованных скоростях 5,5 и 0,5 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%, $\sigma_{\text{в}}^{\text{р}}$ – на 35 и 29%, твердость – на 5 и 13% соответственно при скоростях охлаждения 5,5 и 0,5 град/с.

В связи с тем, что комплексная обработка чугуновых расплавов только лигатурой СРЗМ30 и совместно лигатурой СРЗМ30 и титаном не приводила к полному подавлению выделения феррита, а материал прокатных валков должен иметь высокую прочность, то наличие феррита в его структуре является нежелательным. Поэтому для получения чугунов перлитного класса необходимо было применить легирование, чаще всего применяемым для этого химическим элементом – медью [4].

На четвертой серии лабораторных плавок, зафиксировав содержания РЗМ_{ост} и титана в чугуне на оптимальных уровнях, исследовали влияние легирования возрастающими количествами меди (присадки от 0,2 до 0,8% по массе) на структуру и свойства чугуна типа I. При скорости охлаждения 5,5 град/с полное подавление выделения феррита в матрице чугуна наступало при остаточном содержании меди 0,34%. Увеличение концентраций меди в чугуне до 0,51% привело к повышению пределов прочности при растяжении и изгибе в сравнении с чугунами, не содержащими медь, в среднем на 8–10%. Увеличение содержания меди свыше 0,51% значительных повышений прочностных свойств не вызывало. При скорости охлаждения 0,5 град/с полное подавление выделения феррита в микроструктуре чугуна наблюдали при остаточном содержании меди 0,51%. Легирование чугуна медью в количестве 0,51–0,66% обеспечивало повышение его прочностных свойств в среднем на 12–15%.

Известно, что для получения чугуна с вермикулярным графитом многие исследователи рекомендуют остаточное содержание магния в расплаве 0,01–0,025%. Учитывая то, что при литье прокатных валков скорости охлаждения различных частей отливки значительно выше или ниже, чем при получении машиностроительных отливок, провели пятую серию плавок для установления областей образования в микроструктуре исследуемых чугунов графитных включений вермикулярной формы при модифицировании лигатурой на основе магния. Присадку лигатуры изменяли в пределах 0,3–1,2% от массы расплава (остаточное содержание магния Mg_{ост} было в пределах от 0,012 до 0,37%).

При скорости охлаждения 5,5 град/с уже остаточное содержание магния в чугуне Mg_{ост} – 0,019–0,028% позволило изменить форму графитных включений с пластинчатой на вермикулярную. Следует отметить, что модифицирование лигатурой, содержащей магний, также как и лигатурой, содержащей РЗМ, при малых концентрациях (0,012%) вызывало в микроструктуре чугуна увеличение количества графита, а при дальнейшем повышении содержания модификатора происходило монотонное уменьшение количества графита. Для скорости охлаждения 0,5 град/с область выделения графитных включений вермикулярной формы была ограничена концентрациями магния 0,022–0,030%. Столь уз-

кие пределы областей образования и существования графитных включений вермикулярной формы делают процесс получения их очень нестабильным. Однако при получении в чугунах 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%, однако ниже, чем у чугунов, модифицированных лигатурой на основе РЗМ – на 2–4% и 3–8% соответственно.

Таким образом, проведенным комплексом лабораторных исследований было установлено оптимальное содержание РЗМ, титана и меди в валковых чугунах при различных скоростях охлаждения. Оптимальным является содержание в чугунах титана 0,40–0,42%, меди 0,34–0,51%, РЗМ_{ост} 0,084–0,156% (для скорости охлаждения 0,5 град/с) и 0,014–0,156% (для скорости охлаждения 5,5 град/с). При обработке расплавов КМг9 содержание магния при скорости охлаждения 5,5 и 0,5 град/с должно быть в пределах 0,019–0,028% и 0,022–0,03% соответственно.

В шестой заключительной серии плавов при обработке чугуновых расплавов комплексом из лигатур КМг9 и СРЗМ30 в составе чугуна для получения наилучшего сочетания микроструктуры и свойств должно быть 0,0071–0,015% Mg_{ост} и 0,023–0,025% РЗМ_{ост}.

Выводы. 1. Установлены области выделения вермикулярных графитных включений в валковых чугунах при обработке расплавов лигатурой на основе РЗМ, совместно этой лигатурой и ферротитаном. Область концентраций РЗМ_{ост} для стабильного получения графитных включений вермикулярной формы при модифицировании лигатурой на основе РЗМ была 0,045–0,104% в чугунах рабочего слоя и 0,104–0,144% в чугунах сердцевины вала. При дополнительной концентрации титана 0,40–0,42% область выделения вермикулярных графитных включений расширялась до 0,084–0,156% и 0,104–0,144% соответственно. При обработке расплавов лигатурой на основе магния остаточное его содержание при скорости охлаждения 5,5 и 0,5 град/с должно быть в пределах 0,019–0,028% и 0,022–0,03% соответственно, совместная обработка чугуновых расплавов лигатурами на основе РЗМ и на основе магния приводит к получению чугунов с вермикулярным графитом при содержаниях 0,0071–0,015% Mg_{ост} и 0,023–0,025% РЗМ_{ост}.

2. Прочностные свойства комплексно-модифицированных и легированных чугунов по сравнению с исходными повышаются.

Библиографические ссылки

1. **Белай Г. Е.** Исследование влияния модифицирования на кристаллизацию чугуна, структуру и свойства листопрокатных валков: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 05.323 «Литейное производство» / Днепропетр. металлург. ин-т. – Д., 1967. – 23 с.
2. Исследование, отработка и внедрение технологий отливки и термической обработки прокатных валков из комплексно-модифицированных чугунов: отчет о НИР (заключит.) / Днепроп. металлургич. ин-т.; рук. Е. В. Колотило; отв. исполн. Л. Х. Иванова. – Д., 1985. – 140 с. – Библиогр.: С. 70–80. – № ГР 01840019449. – Х90001004, договор ВЛ 4/84.
3. **Руденко Н. Г.** Изучение ремодифицирующего влияния церия, лантана и титана на процессы формообразования графита при кристаллизации чугуна: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 05.323 «Литейное производство» / ИПЛ АН УССР. – К., 1969. – 24 с.
4. **Репина Н. И.** Влияние меди на формирование структуры серого чугуна: дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.320 «Металловедение и термическая обработка». – Д., 1968. – 223 с.

Надійшла до редколегії 20.06.2012.