

Как видно из табл. 4, наибольшее значение  $D$ , равное 0,783 (хороший результат, так как  $0,80 > 0,783 > 0,63$ ), соответствует условиям опыта № 5 ( $X_1 = -1$ ,  $Mg = 8\%$ ;  $X_2 = -1$ ,  $PЗМ = 23\%$ ;  $X_3 = +1$ ,  $Al = 16\%$ ;  $X_4 = +1$ ,  $Ti = 8\%$ ;  $X_5 = -1$ ,  $Fe = 5\%$ ), где  $\sigma_b = 75$  МПа,  $\sigma_T = 45$  МПа,  $\delta = 35\%$ ,  $\psi = 55\%$ ,  $KCU = 350$  Дж/см<sup>2</sup>.

Таким образом, этот состав комплексного модификатора может быть рекомендован в качестве оптимального, так как он обеспечивает достаточно высокие прочностные и пластические свойства стали 110Г13Л.

В лабораторных условиях была изготовлена опытная партия комплексного модификатора и проведены предварительные исследования его эффективности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Давыдов Н.Г. Высокомарганцовистая сталь. М.: Металлургия. 1979. 232 с.
2. Тунков В.П. Производство фасонного литья из износостойкой высокомарганцевой стали. М.: Металлургиздат, 1962. 32 с.
3. Повышение качества отливок из стали Г13Л (ЦНИИТмаш). М.: Машгиз, 1963. 204 с.

УДК 621.74:669.13-27

**Е.И. МАРУКОВИЧ**, д-р техн. наук (ИТМ НАН Беларуси),  
**М.И. КАРПЕНКО**, канд. техн. наук,  
**В.М. КАРПЕНКО**, канд. техн. наук (ГГТУ им. Сухого)

## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СЛОЖНОЛЕГИРОВАННЫХ ЛИТЕЙНЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ДЕТАЛЕЙ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ОСНАСТКИ

Решение проблемы повышения надежности и долговечности литых деталей машин и механизмов, инструментальной и технологической оснастки, работающих в условиях интенсивного износа, в большинстве случаев связано с созданием и использованием сложно- или высоколегированных сталей и Fe – С-сплавов, введением большого количества дорогостоящих лигатур и ферросплавов и необходимостью термической обработки. Служебные свойства этих сплавов формируются в зависимости от химического состава, металлургических и технологических приемов воздействия на расплавы в процессе первичной и вторичной кристаллизации и в конечном итоге определяются свойствами основных структурных составляющих.

В настоящее время разработаны и применяются многие способы упрочнения, легирования и модифицирования износостойких сплавов, легирующие и модифицирующие добавки, методы комплексного легирования [1, 2], другие технологические и металлургические приемы повышения эксплуатационных свойств износостойких отливок. Несмотря на высокую стоимость и дефицитность легирующих добавок, их использование постоянно расширяется, особенно при производстве быстроизнашивающихся литых деталей (табл. 1).

Во фрикционных чугунах эффективными легирующими добавками являются фосфор (до 2%), бор (до 0,02%), бориды ряда тугоплавких металлов и нитриды бора. В антифрикционных чугунах содержание фосфора не превышает 0,04...0,08%, а повышается содержание таких легирующих компонентов, как медь, титан, никель, снижающих коэффициент трения и измельчающих структуру чугуна в отливках. В антифрикционные чугуны вводят также различные графитизирующие добавки, редкоземельные металлы и комплексные модификаторы.

Основа повышения эксплуатационных свойств низколегированных и модифицированных фрикционных и других серых износостойких чугунов – увеличение количества первичного аустенита в виде мелких и сильно разветвленных дендритов, повышение дисперсности микроструктуры (эвтектических зерен, графитовых и неметаллических включений), сфероидизация перлита и графита, увеличение количества равномерно распределенных промежуточных фаз, таких как нитриды, сложные карбиды, карбонитриды, интерметаллиды и неметаллические включения. Содержание в антифрикционных сплавах основных и легирующих компонентов регламентировано в различных ГОСТах и технических условиях. Это перлитные чугуны АЧС-1, АЧС-2 и АЧВ-1 и перлитно-ферритные чугуны АЧВ-2, АЧК-2 и АЧС-3 (по ГОСТ 1585 – 89), а также низколегированные стали для отливок типа 30ГСЛ, 35ГЛ, 20ФЛ, 35ХГСЛ, 35ХНЛ и др. (по ГОСТ 977 – 88).

В условиях сухого трения более высокой износостойкостью обладают стали типа 20ХМЛ и 80ГСЛ (ТУ 24-1-12-182 – 75), 15ГНЛ и 20ГНМФЛ (ТУ 24-11.01.092 – 84), А40ХФЦЛ и А45ХГЦЛ [1], перлитные и сорбитные графитизированные стали и стали с карбонитридным упрочнением, но они еще недостаточно широко используются на машиностроительных предприятиях республики.

Перлитные графитизированные стали, характеризующиеся хорошим сочетанием износостойкости, пластичности и прочности, используются для изготовления тормозных барабанов, ободов, корпусов электродвигателей, челноков ткацких станков, шестерен и других деталей механизмов передач. Исследования показали, что при получении в отливках шаровидных и компактных графитных и других неметаллических и интерметаллидных включений, зернистого перлита или сорбита их механические и фрикционные свойства улучшаются (табл. 2). В условиях динамических

Таблица 1

## Содержание легирующих компонентов в износостойких отливках

Сплавы для износостойких отливок	Максимальное содержание компонентов, % (по массе)												
	Cr	Mn	Si	Mo	Ni	Ti	Cu	V	Al	W	Co	Nb	B
Фрикционные чугуны	1,50	1,3	3	0,3	0,7	0,03	0,3	–	0,03	–	–	–	0,02
Графитизированные фрикционные стали	0,35	2	2,5	0,7	0,5	0,10	0,7	1	0,05	–	0,3	–	0,03
Антифрикционные Fe – C-сплавы	1,10	1,0	3,6	2	1,5	0,50	2,0	1	0,20	–	0,1	0,5	0,01
Инструментальные Fe – C-сплавы	9	1,5	3	2,5	3	1	0,3	6	0,50	8	5	1	–
Конструкционные литейные сплавы	3	2	3	1	12	1	2,5	1	5	1	1,5	1	0,01
Специальные Fe – C-сплавы	30	16	12	2	20	3	5,0	3	30	1	1	3	6

нагрузок и интенсивного трения с повышенными нагрузками они характеризуются более высокой эксплуатационной стойкостью, чем многие стали с пластинчатыми структурами. При повышении температуры контактирующих поверхностей пластинчатые структуры растрескиваются быстрее, чем сфероидизированные.

Таблица 2

**Влияние металлической основы на механические свойства и термостойкость графитизированных сталей**

Металлическая основа графитизированной стали	Механические свойства				Износ при сухом трении, мг		Термическая стойкость, циклов
	Временное сопротивление, МПа	Твердость, НВ	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость, МДж/м <sup>2</sup>	Торцовое трение	Трение качения со скольжением	
Феррит	420...560	130...150	10...17	0,3...0,7	750...900	3400...5200	260
Пластинчатый перлит	720...900	221...241	1,0...5,5	0,03...0,06	470...600	1320...2400	210
Зернистый перлит	560...700	214...230	3,0...6,5	0,1...0,2	230...500	820...1300	320
Сорбит	900...1200	280...450	2,0...6,0	0,02...0,05	140...280	480...750	380

Для изготовления тяжело нагруженных зубчатых колес и коленчатых валов с цементируемыми шейками разработана [3] конструкционная сталь, дополнительно содержащая в качестве легирующих добавок, % (по массе): ванадия 0,42...0,88, хрома 0,26...0,93, тантала 0,36...2,3, карбонитридов циркония 0,18...0,37. Испытания в производственных условиях показали, что эксплуатационная стойкость шестерен из этой стали повышается на 26...42%. Усталостная прочность стали при испытании на машине ВМП-10000 при чистом изгибе вращением с частотой 83 об/мин на базе  $5 \cdot 10^6$  циклов повысилась с 360...470 до 526...608 МПа за счет дополнительного легирования и карбонитридного упрочнения. Испытания при сухом трении цилиндрических образцов диаметром 40 мм с использованием машины МИ-1М ( $1,5 \cdot 10^4$  об/мин с удельным давлением в месте контакта испытываемой пары 400 МПа и скорости вращения 400 об/мин, что соответствует рабочим нагрузкам при работе тяжело нагруженных шестерен) показали повышение износостойкости и ее стабильности в среднем на 21...28%. Структура деталей состоит из высокоуглеродистого мелкодисперсного мартенсита и небольшого количества глобулярных карбидов и карбонитридов. Твердость стали 526...540 НВ<sub>10</sub>, прокаливаемость 61...80 мм.

В условиях сухого трения с повышенными температурами удовлетворительно работают перлитные высокопрочные чугуны ВЧ70 и ВЧ80 (ГОСТ 7293 – 85), но в условиях интенсивного износа при фреттинг-коррозии их стойкость недостаточна. В этом случае используются белые износостойкие чугуны с низким углеродным эквивалентом, повышенным содержанием марганца (до 1...3%), кремния (до 1,5...2%) и фосфора (до 0,15...0,2%), легирующими и модифицирующими компонентами, обеспечивающими получение в отливках мелкодисперсной перлитоцементитной структуры. Разработан и апробирован в производственных условиях износостойкий чугун дозвтектического состава [4], в котором в качестве микролегирующих добавок дополнительно использованы, % (по массе): карбонитриды титана 0,12...0,9, нитриды ванадия 0,12...0,3, нитриды алюминия 0,1...0,2. Износ чугуна при фреттинг-коррозии – 18...48 мг/гс. Чугун рекомендован для тонкостенных отливок, имеет высокую твердость, но низкую прокаливаемость. Жидкотекучесть расплава по спиральной пробе – 410...540 мм. Наши исследования показали, что в условиях интенсивного износа типа микрорезания (абразивного, ударно-абразивного, абразивно-коррозионного, газо- и гидроабразивного) максимальную стойкость имеют высокоуглеродистые стали и белые чугуны с мартенситной либо мартенситно-аустенитной структурой, в которой повышена концентрация марганца, а аустенит метастабилен. О влиянии остаточного аустенита на износостойкость до сих пор нет единого мнения, а в работах М.Е. Гарбера по белым износостойким чугунам отмечается, что остаточный аустенит оказывает неблагоприятное воздействие. Прокаливаемость – одно из основных свойств, определяющих износостойкость массивных отливок. В табл. 3 приведены результаты исследования прокаливаемости, структуры и механических свойств ряда износостойких сталей и белых чугунов. Уставлено, что прокаливаемость таких сплавов зависит от типа легирующих компонентов, растворенных в металлической основе сплава, и устойчивости аустенита в интервале температур от  $A_{c1}$  до  $M_n$ .

Для работы в условиях интенсивного износа наряду с низколегированными и более экономичными сталями типа 80ГСФЛ, 45Г2ФЛ и 30ХГСАФЛ используют высокомарганцовистые стали аустенитного класса типа 110Г13Л и 110Г13МФАЛ, а также более дорогие и дефицитные высоколегированные сплавы: стали аустенитного класса типа 130Г14ХМФЛ, 08Х14Г7Н2МЛ, 40Х24Н12Г3СЛ и 12Х18Н9ТЛ (ГОСТ 2176 – 77), коррозионностойкую сталь мартенситного класса 20Х13Л, аустенитно-ферритную сталь 20Х20Н14С2Л, инструментальную сложнолегированную сталь Р9М5ФАЛ и др. Количество легирующих фаз и физико-механические свойства сложнолегированных сталей зависят от содержания легирующих элементов, углерода, азота и интерметаллидных фаз в твердом растворе сплава и вида термической обработки литых заготовок (закалки, отпуска, отжига и нормализации).

**Структура, прокаливаемость и механические свойства сложнолегированных износостойких сплавов**

Марка сплава	Максимальная толщина стенки отливки, закаленной на воздухе, мм	Микроструктура в литом состоянии металлической основы литых заготовок	Механические свойства после нормализации			
			$\sigma_B$	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	Твердость, НВ	Износ по ГОСТ 23.207-79, мг/гс
30ХГСАФЛ	20	Перлит, феррит (до 30%)	712	112	214	171...185
20Х13НДАФЛ	32	Мартенсит, феррит (до 15%)	735	40	270	135...142
ИЧ280Х15Г2МФ	150	Аустенит, троостомартенсит (до 15%)	670	35	450	121...127
110Г13МФАЛ	210	Аустенит	720	115	220	126...134
ИЧ350Х17ГМФ	170	Аустенит, перлит (до 20%)	630	27	380	151 ... 166
30Х10Г10МФЛ	180	Аустенит, мартенсит	660	75	260	80...95

Несмотря на различные подходы к объяснению взаимосвязи состава, структуры и свойств сложнолегированных сталей и сплавов, общепризнанным является тот факт, что прочность, твердость, износостойкость, теплоустойчивость и другие их свойства зависят прежде всего от типа и количества упрочняющих фаз – карбидов, карбонитридов, нитридов и интерметаллидов. Эффективность упрочнения литого металла за счет этих фаз и служебные свойства сплавов тем выше, чем выше сопротивление коагуляции в нагретом состоянии и модуль сдвига. По возрастанию сопротивляемости упрочненных фаз коагуляции их можно расположить в следующем порядке: карбиды  $Me_3C$  типа  $Fe_3C$ ,  $Me_{23}C_6$ ,  $(Fe, Cr)_{21} \cdot (Mo, Mn)_2C_6$ ,  $(Fe, Cr)_{21} \cdot (W, Mo)_2C_6$ ; карбонитриды  $(Fe, Cr, Mn)_7 \cdot (C, N)_3$ ,  $(Fe, Mo, W)_7 \cdot (C, N)_3$ , бориды и интерметаллиды. Однако следует отметить, что свойства и структура многих упрочняющих фаз изучены недостаточно.

Неустойчивые к коагуляции карбиды  $Me_3C$  используются в сложнолегированных сталях редко, за исключением графитизированных сплавов. Более устойчивые к коагуляции карбиды  $Me_{23}C_6$  и карбонитриды  $Me_{23}(C, N)_6$ , а также бориды и интерметаллиды являются преобладающими фазами сложнолегированных сплавов и композиционных материалов. Они и определяют основные механические и служебные свойства последних. Карбиды  $Me_{23}C_6$ ,  $Fe_3C$  и  $(Fe, Cr, Mn)_7C_3$  в процессе термической обработки разлагаются, поэтому в последние годы отмечается тенденция к использованию при изготовлении износостойких отливок упрочняющих интерметаллидных фаз, карбидов типа  $Me_4C$ ,  $MeC$  и  $Me_2C$ , боридов, ме-

таллоподобных нитридов с высокой температурой плавления. Значительно повышают плотность и износостойкость Fe – Cr – Mn – C-сплавов бориды WB, MoB и TaB<sub>2</sub>, имеющие гексагональные кристаллические решетки и высокие температуры плавления. Повышают плотность Fe – C-сплавов нитриды Mo<sub>2</sub>N, Ta<sub>2</sub>N, TaN и WN, но они снижают термическую стойкость и редко используются для легирования. Температура плавления нитрида MoN – 895 °С, а нитрид вольфрама WN разлагается при температуре более 700 °С.

Использование комплексно-легированных белых чугунов взамен высокохромистых и высокомарганцовистых сталей позволило во многих случаях увеличить надежность и срок службы быстроизнашивающихся деталей мельниц, дробилок, смесителей, кокильных машин и лопаток дробетных камер.

При производстве литых изделий из высокомарганцевых сплавов необходимо решать проблемы, связанные с повышением склонности таких сплавов к трещинообразованию, хотя многие вопросы, связанные с трещинообразованием в стальных износостойких отливках, остаются спорными и невыясненными.

На основании проведенных исследований можно рекомендовать следующие способы снижения склонности отливок к трещинообразованию: продувка расплавленного металла азотом; использование ванадиевого шлака и других отходов металлургического производства, в частности отходов алюминиевого производства; использование церия и других РЗМ для модифицирования и раскисления нитридообразующих элементов, а также азотированных ферросплавов при выплавке сплавов для методов литья с интенсивным теплоотводом.

Интенсивный теплоотвод от наружных поверхностей отливок и другие факторы в случае использования центробежного и непрерывно-циклического методов литья способствуют получению плотной высокодисперсной структуры износостойких сплавов и повышению их физико-механических и эксплуатационных свойств при значительной экономии лигатур и ферросплавов. Особенности структурообразования полых цилиндрических заготовок диаметром 30...80 мм и длиной 100...250 мм из высокохромистых чугунов (10...18% Cr) изучена при непрерывно-циклическом литье [5] с использованием метода, разработанного в Институте технологии металлов НАН Беларуси. Установлено, что при содержании 12...14% хрома и 2,5...3,5% углерода в структуре отливок преобладают карбиды типа Me<sub>7</sub>C<sub>3</sub> микротвердостью H<sub>50</sub> 12200...12800 МПа, а их количество достигает 27...30%. После закалки отливок в масле с температуры 1050 °С твердость отливок повышается до 65...66 HRC, что позволяет использовать их в условиях интенсивного ударно-абразивного износа.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Карпенко М.И., Марукович Е.И.* Износостойкие отливки. Мн.: Наука и техника, 1984. 216 с.
2. *Карпенко М.И., Марукович Е.И.* Легирование и модифицирование чугунов для износостойких отливок // Литейное производство. 1999. № 9. С. 27 – 28.
3. А.с. 1420061 СССР, МКИ С22С 38/32. Конструкционная сталь / Р.Н. Адамович, М.И. Карпенко, Е.И. Марукович и др.
4. А.с. 132110 СССР, МКИ С22С 37/10. Износостойкий белый чугун / Е.И. Марукович, М.И. Карпенко, А.И. Карпенко.
5. *Марукович Е.И., Бодяко А.М.* Особенности структурообразования отливок из высокохромистых чугунов при непрерывно-циклическом литье // Литье и металлургия. 1998. № 2. С. 10 – 12.