

**ВЛИЯНИЕ СОСТАВА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА  
ТЕРМООБРАБОТАННЫХ ГРАФИТИЗИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ**

**С. Б. Беликов, д. т. н., проф., И. В. Акимов, к. т. н., доц.**

*Запорожский национальный технический университет*

Известно, что графитизированные стали по химическому составу, физико-механическим свойствам и себестоимости занимают промежуточное положение между углеродистыми сталями и чугунами. Особенностью этих сталей является наличие графитовых включений в структуре, благодаря которым они могут с успехом применяться:

– как износостойкие, прежде всего антифрикционные материалы (в данном случае графит выполняет роль замазывающего вещества, предупреждающего схватывание при сухом трении металла по металлу) для прокатных валков [1, 2], вырубных, гибочных и формовочных штампов [3], сепараторов подшипников качения и вкладышей подшипников скольжения, фильер волоочильных станов, червячных колес и др.;

– как высокопрочные материалы, с повышенной демпфирующей способностью (наличие графита в структуре способствует гашению вибраций) для тяжелонагруженных деталей, работающих как в условиях статических, так и циклических знакопеременных нагрузок: зубчатые колеса, коленчатые валы и пр. [4];

– как термостойкие материалы с относительно высокой теплопроводностью (включения графита способствуют повышению теплопроводности материала, снижая, таким образом, градиент термонапряжений) для деталей, работающих в условиях термоциклирования: кокили и изложницы [5], прессформы литья под давлением и стеклоформы, детали печного оборудования и др.

В то же время графитизированные стали как класс конструкционных материалов, с одной стороны, являются мало изученными (в литературных данных встречаются обрывочные сведения об использовании этих сталей для конкретных деталей и нет четкого описания возможных областей их применения), с другой стороны, известные марки сталей, на которые существуют технические условия, требуют длительного и энергозатратного графитизирующего отжига при производстве изделий из них. Указанные факторы значительно сдерживают широкое применение графитизированных сталей. При этом в Украине производство таких сталей фактически не налажено, отсутствуют технические требования и государственные стандарты, которые регламентировали бы их составы и требования к качеству.

В данной работе описана попытка повышения механических свойств графитизированных сталей доэвтектоидного, эвтектоидного и заэвтектоидного классов. С этой целью использовали метод планирования эксперимента, где в качестве независимых переменных, было выбрано содержание углерода (0,5...1,9 %), кремния (0,6...2,6 %), как элементов, наиболее сильно влияющих на процессы графитизации, а так же меди (0...4,0 %), как элемента, способст-

вующего графитизации вторичного цементита, улучшающего распределение графитовых включений и повышающего механические свойства графитизированных сплавов. Содержание остальных химических элементов составило: 0,60...0,70 % Mn; 0,15...0,18 % Cr; 0,22...0,25 % Al и до 0,015 % S и 0,024 % P. В качестве зависимых переменных приняты механические свойства: твердость HRC, предел прочности  $\sigma_B$ ; относительное удлинение  $\delta$  и ударная вязкость КС. В работе был реализован полный факторный эксперимент второго порядка  $2^3$  (табл. 1), включающий в себя восемь основных опытов, а также опыты на «звездном» и нулевом уровнях.

Таблица 1

*Центральный композиционный план  $2^3$*

Интервал варьирования и уровни факторов		Изучаемые факторы		
		$X_1$ (C, %)	$X_2$ (Si, %)	$X_3$ (Cu, %)
Нулевой уровень: $X_0 = 0$		1,2	1,6	2,0
Интервал варьирования	1,0	0,4	0,6	1,2
	1,682	0,7	1,0	2,0
Нижний уровень: $X = -1,0$		0,8	1,0	0,8
Верхний уровень: $X = +1,0$		1,6	2,2	3,2
Звездные точки	$X = -1,682$	0,5	0,6	0
	$X = 1,682$	1,9	2,6	4,0

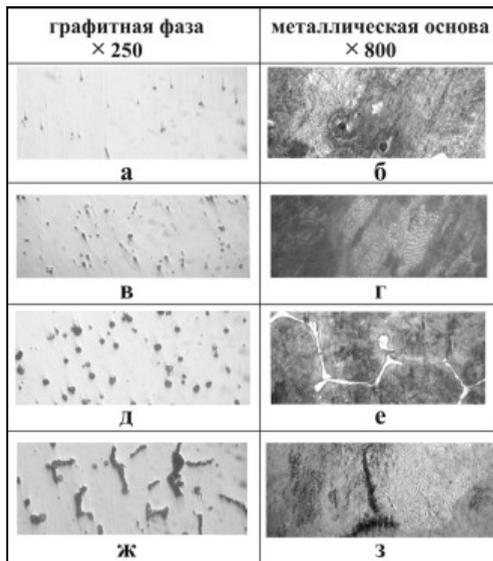
По составленной матрице планирования были выплавлены в 60-ти килограммовой индукционной печи с основной футеровкой опытные сплавы. Требуемые концентрации углерода получали путем науглероживания жидкого сплава в печи чугуном Л5. Необходимые концентрации кремния и меди получали путем присадки в печь ферросилиция ФС65 и электротехнической меди М1. При этом расплав модифицировали в ковше силикокальцием, ферросилицием и алюминием. Разливку жидкого металла вели в сухие песчано-глинистые формы, обеспечившие получение слитков с прямоугольным и круглым поперечным сечением.

Результаты металлографического анализа полученных сплавов в литом (не термообработанном) состоянии показали разнородность микроструктур, главным образом, в зависимости от содержания углерода и кремния.

**Влияние углерода.** По уровню углерода, как элемента, оказавшего наиболее сильное влияние на структуру металлической основы, а также количество и форму графитовых включений, все полученные сплавы можно разделить на три группы: содержащие 0,48 % C – низкоуглеродистые; 0,78...1,27 % C – среднеуглеродистые; 1,54...1,95 % C – высокоуглеродистые. Структура стали с 0,48 % C состояла из ферритно-перлитной металлической основы с незначительным количеством равномерно распределенных точечных графитовых включений (рис. 1 а).

Повышение содержания углерода до 0,78% способствовало увеличению количества графита (до 3% объем.), при этом металлическая матрица практически полностью была представлена крупнопластинчатой перлитной фазой (рис. 1 в, г). Структура стали, содержащей 1,54 % C, характеризовалась не только повышением количества графитной фазы (до 5 % объем.), но и наличи-

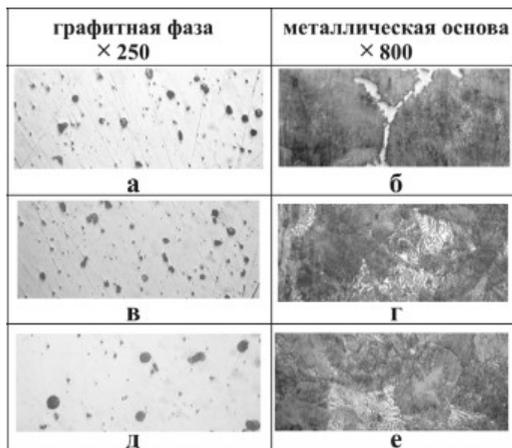
ем отдельных участков выделившегося вторичного цементита по границам перлитных зерен (рис.1 д, е).



**Рис. 1.** Влияние углерода на структуру графитизированных сталей в литом (не термообработанном) состоянии: а, б – 0,48; в, г – 0,78; д, е – 1,54; ж, з – 1,95 масс. % С.

Основным отличием структуры стали с наибольшей концентрацией углерода 1,95 % являлось образование пластинчатых включений графита в ферритно-перлитной металлической основе (рис.1 ж, з). При этом количество графитной фазы в данной стали достигало 8 % объема.

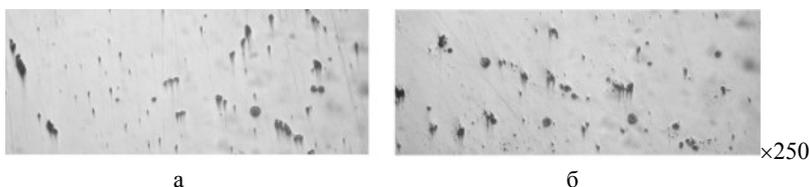
**Влияние кремния.** На склонность сталей к графитизации в литейной форме значительное влияние оказывал кремний.



**Рис. 2.** Влияние кремния на структуру графитизированных сталей в литом (не термообработанном) состоянии: а, б – 0,62; в, г – 1,07; д, е – 2,55 % Si.

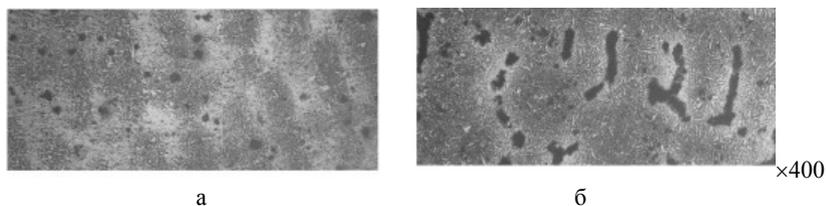
Так, при его наименьшем содержании 0,62 % в структуре стали одновременно с графитовыми выделениями присутствовал вторичный цементит (рис. 2 а, б). Увеличение до 1,07 % в стали с 1,54 % С также не устраняло образования избыточного карбида железа (рис.1 е). В структурах остальных вариантов опытных сталей, содержащих 1,65 % Si (рис. 2 г) и более, вторичный цементит не обнаруживался. Структура стали с наибольшим содержанием кремния 2,55 % (1,26 % С) характеризовалась ферритно-перлитной металлической основой и крупными, равномерно распределенными глобулярными графитовыми включениями (рис. 2 д, е).

**Влияние меди.** Изменение содержания меди от 0,02 до 3,95 % заметного влияния на структуру металлической основы сталей в литом состоянии не оказало – в структуре обнаруживался мелкопластинчатый перлит. Однако в сталях с содержанием меди 3,17 % и более наблюдались скопления графитовых включений в виде цепочек (рис. 3 а, б).



**Рис. 3.** Скопления графитовых включений в цепочки в сталях: а – 3,17 (1,74 % С); б – 3,95 (1,21 % С) масс. % Сu.

Для улучшения структуры и свойств опытных сталей полученные отливки подвергали закалке (нагрев до 860 °С, выдержка 1 час, охлаждение в масло) с последующим средним отпуском (400 °С, 2 часа). В результате термообработки в структурах сталей, в зависимости от химического состава, вместо перлитной фазы была получена более дисперсная ферритно-цементитная смесь – сорбит отпуска (рис. 4).



**Рис. 4.** Сорбитная металлическая основа в структуре графитизированных сталей с компактными (а) и пластинчатыми (б) графитовыми включениями

Из полученных термообработанных слитков вырезали образцы для механических испытаний, результаты которых приведены в таблице 2.

Механические свойства термообработанных графитизированных сталей

№ опыта	Химический состав						Механические свойства			
	C, %		Si, %		Cu, %		HRC	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	КС, Дж/см <sup>2</sup>
	р.	ф.	р.	ф.	р.	ф.				
1.	0,8	0,78	1,0	1,01	0,8	0,84	35	820,0	19	58,8
2.	1,6	1,54	1,0	1,07	0,8	0,85	37	760,0	12	37,2
3.	0,8	0,78	2,2	2,18	0,8	0,92	39	915,0	15	62,6
4.	1,6	1,73	2,2	2,29	0,8	0,87	42	778,0	8	35,2
5.	0,8	0,74	1,0	1,01	3,2	3,17	37	970,0	17	54,7
6.	1,6	1,74	1,0	1,04	3,2	3,15	39	880,0	10	37,5
7.	0,8	0,72	2,2	2,17	3,2	3,25	40	1280,0	12	50,6
8.	1,6	1,78	2,2	2,25	3,2	3,19	44	990,0	6	26,4
9.	0,5	0,48	1,6	1,66	2,0	1,90	28	720,0	22	72,7
10.	1,9	1,95	1,6	1,66	2,0	1,94	35	443,3	5	16,4
11.	1,2	1,23	0,6	0,62	2,0	1,95	37	874,7	15	49,5
12.	1,2	1,26	2,6	2,55	2,0	2,09	40	730,4	8	32,1
13.	1,2	1,23	1,6	1,61	0	0,02	39	745,6	14	44,2
14.	1,2	1,21	1,6	1,69	4,0	3,95	42	721,9	10	40,4
15.	1,2	1,27	1,6	1,65	2,0	2,01	41	887,0	12	43,3

Примечание: р. – расчетное, ф. – фактическое значения содержания варьируемых элементов в сплаве.

Их обработка с помощью регрессионного анализа позволила получить ряд уравнений, показывающих зависимость механических свойств от содержания углерода, кремния и меди. После проверки адекватности моделей и перехода к натуральным переменным была получена система уравнений второго порядка:

$$HRC = 5,7 + 43,3C + 4,2Si - 0,3Cu + 1,6CSi + 0,3CCu - 0,2SiCu - 17,6C^2 - Si^2 + 0,3Cu^2;$$

$$\sigma_b = 312 + 1029C - 63Si + 37Cu - 144CSi - 48CCu + 53SiCu - 372C^2 + 52Si^2 - 4Cu^2;$$

$$\delta = 36,7 - 19,8\tilde{N} - 2,3Si - Cu + 0,5CSi + 0,3CCu - 0,2SiCu + 3,4C^2 - 0,5Si^2;$$

$$КС = 87,1 - 43,8C + 11,2Si - 0,3Cu - 6,7CSi + 2,0CCu - 3,0SiCu + 6,9C^2 - 0,8Si^2 + 0,2Cu^2;$$

С целью определения состава, обеспечивающего оптимальное сочетание свойств графитизированной стали, выполнили графический анализ полученных регрессионных уравнений (рис. 5 и 6). При этом содержание одного из элементов химсостава задавалось постоянным, соответствующим нулевому уровню матрицы планирования, содержание второго элемента равнялось трем значениям (нижний, нулевой и верхний уровни), содержание третьего элемента изменялось в исследуемых в данной работе пределах.

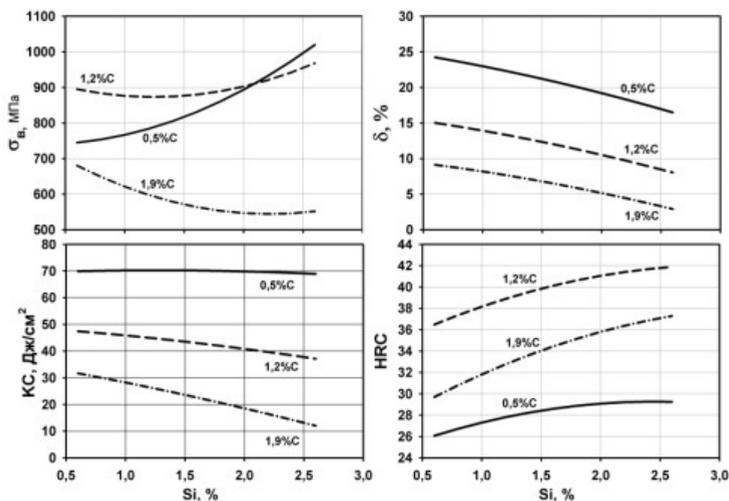


Рис. 5. Влияние углерода и кремния ( $Cu = 2,0 \%$ ) на свойства графитизированной стали

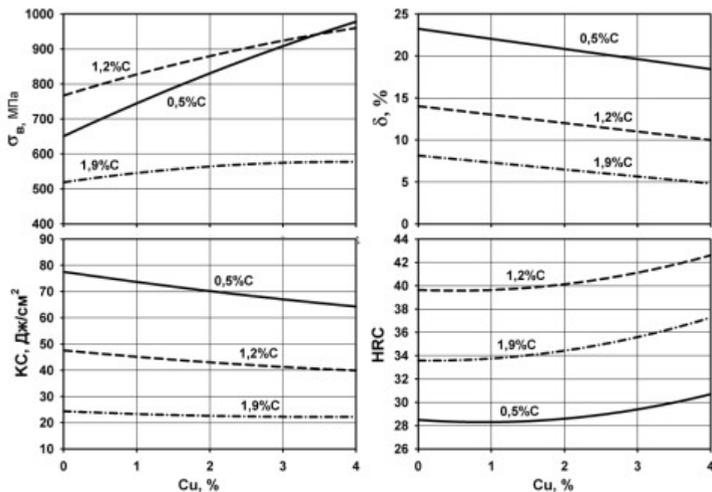


Рис. 6. Влияние углерода и меди ( $Si = 1,6 \%$ ) на свойства графитизированной стали

Как можно видеть из рисунка 5, увеличение содержания кремния привело к повышению предела прочности, для сталей с содержанием углерода до 1,2 %, что можно объяснить твердорастворным упрочнением металлической основы сплава. Наоборот, в высокоуглеродистых сталях с ~1,9 % С кремний

снижал прочность, что, по-видимому, связано как с графитизирующим действием данного элемента и увеличением количества разупрочняющей графитной фазы, так и со сменой формы графитовых включений с компактной на пластинчатую (см. рис. 1 ж, з). С увеличением содержания кремния показатели пластичности и ударной вязкости снижались при всех значениях содержания углерода вследствие не только охрупчивания кремнием металлической матрицы опытных сплавов, но и увеличения в стали количества графитовых включений, которые, являясь хрупкой и низкопрочной фазой, выполняли роль концентраторов напряжений, снижая при этом как пластичность металла, так и его сопротивление разрушению при динамическом нагружении. Повышение твердости с ростом концентрации кремния можно объяснить твердорастворным упрочнением металлической основы сталей. При этом наибольшее значение данного показателя отмечалось для стали с 1,2 % С.

Графический анализ влияния содержания углерода и меди (см. рис. 6) показал, что с увеличением содержания меди при любых значениях концентрации углерода показатели прочности и твердости монотонно повышались, а пластичности и ударной вязкости – снижались. Следует заметить, что наибольшими значениями прочности  $\sigma_b$  и твердости НРС характеризовались стали с содержанием 1,2 % С, как сплавы, имеющие структуру с компактными, равномерно распределенными графитовыми включениями в сорбитной металлической основе. При этом показатели пластичности  $\delta$  и ударной вязкости КС были наибольшими в сталях с ~0,5 % С, что объясняется меньшим количеством графита и наличием сорбитной и ферритной фаз.

Результаты выполненных исследований позволили оптимизировать и предложить состав высокопрочной графитизированной стали, обладающей после закалки и среднего отпуска сочетанием высоких показателей прочности, пластичности и ударной вязкости: 0,7...0,8 % С; 2,2...2,4 % Si; 3,0...3,2 % Cu; 0,60...0,70 % Mn; 0,22...0,25 % Al.

### Список использованных источников

1. Исследование литой графитизированной стали для прокатных валков / Рудюк С.И., Вишнякова Е.Н., Маслов А.А. [и др.] // Литейное производство. – 1981. - №4. – С.7-8.
2. Рудюк С.И., Вакула В.И., Вишнякова Е.Н., Коробейник В.Ф., Маслов А.А. Влияние легирования и термообработки на термостойкость графитизированных сталей // Литейное производство. – 1981. – №1. – С.11-12.
3. Формирование оптимальной структуры графитизированной стали / Журавковский В.М., Самелик Б.В., Садчиков В.Я. [и др.] // Технология и организация производства. – 1986. – №4. – С.35-36.
4. Тодоров Р.П. Структура и свойства отливок из графитизированной стали / Р.П. Тодоров, М.В. Николов. – М. : Металлургия, 1976. – 168с.
5. Яковлев А.Ю. Повышение термостойкости графитизированной стали для изложниц центробежного литья: автореф. дисс. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.01 «Материаловедение» / А.Ю. Яковлев. – Запорожье, 2008. – 25 с.