

## УГЛЕРОД В ВЫСОКОХРОМИСТОЙ МАЛОЛЕГИРОВАННОЙ ЛИТОЙ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ

Н. А. ЕРОФЕЕВ

(Представлено профессором доктором А. Н. Добровидовым)

Свойства стальных изделий определяются составом, природой, количественным соотношением и распределением фаз. Изменение этих факторов происходит при легировании или термической обработке стали. Установлению влияния температуры закалки, условий охлаждения и различных видов отпуска на природу и легированность ковальной и литой быстрорежущей стали посвящено большое количество работ.

А. П. Гуляев [1] установил зависимость состава фаз от температуры закалки ковальной стали Р18, Р9 и Р4. И. С. Кватер [2] исследовал эти же вопросы применительно к литой быстрорежущей стали стандартного и измененного состава. Е. П. Старова [3] исследовала зависимость легированности твердого раствора от температуры закалки малолегированной быстрорежущей стали с азотом.

И. И. Горюнов [4] выяснил влияние скорости охлаждения на распределение легирующих элементов между фазами литой закаленной стали Р18.

Сравнительно мало работ, в которых была бы исследована зависимость указанных факторов от содержания углерода, который является самым дешевым, но и в то же время очень важным компонентом быстрорежущей стали.

Решение этого вопроса имеет большое значение при изыскании новых сталей для инструмента и деталей машин.

Настоящая работа выполнена с целью установления влияния содержания углерода в стали на легированность фаз в закаленном, отпущенном и отожженном состояниях. Исследование проведено на трех марках высокохромистой малолегированной литой быстрорежущей стали с различным содержанием углерода (табл. 1).

Таблица 1

*Химический состав исследованных сталей и их твердость в литом  
(закаленном) состоянии*

Обозначения стали	Химический состав, %				Твердость после закалки (литья) R <sub>c</sub>
	C	W	Cr	V	
1,0-4-12-2	1,02	4,02	11,76	2,28	57
1,5-4-12-2	1,50	4,12	12,06	2,19	51
2,0-4-12-2	1,84	4,16	11,88	2,17	49

## Методы исследования и обсуждение результатов

Плавки проводились в высокочастотной индукционной печи. После окончания плавки сталь раскислялась алюминием, вводимым в количестве 0,1%. Вес каждой плавки составлял 1 кг. Форма заливалась сталью непосредственно из тигля при температуре металла 1500—1540°C, контролируемой оптическим пирометром. Вследствие быстрого охлаждения при литье в металлическую форму (кокиль) образцы малого сечения закаливались.

Исследованные стали были подвергнуты металлографическому и карбидному анализам в закаленном (литом), отпущенном трехкратно при 560° и отожженном состояниях. Кроме этого, были проведены последовательный отпуск в интервале температур 100—700°C и многократный отпуск при 560°C.

Структура всех исследованных сталей в закаленном состоянии состоит из карбидной составляющей в виде тонкой сетки, остаточного аустенита и скрыто кристаллического мартенсита. Все стали в этом состоянии плохо травятся 10% раствором азотной кислоты в спирте, что свидетельствует о высокой легированности металлической основы хромом, который является основным легирующим элементом в них.

Хорошие результаты по дифференциации фаз, их распределению и выявлению внутрикристаллической неоднородности были получены при применении цветного окисления шлифов, производимого при 400—420° в течение 10—15 мин.

Для установления зависимости травимости только от природы и состава фаз все шлифы травились одновременно.

Наиболее отчетливое различие степени окисления частей зерна при переходе от центра к границам его наблюдается у закаленной стали 1,0—4—12—2 (рис. 1). На большую концентрацию хрома близ границ зерна указывает изменение цвета окисной пленки от синего в центре до светло-желтого на границе. Различие в степени окисления уменьшается

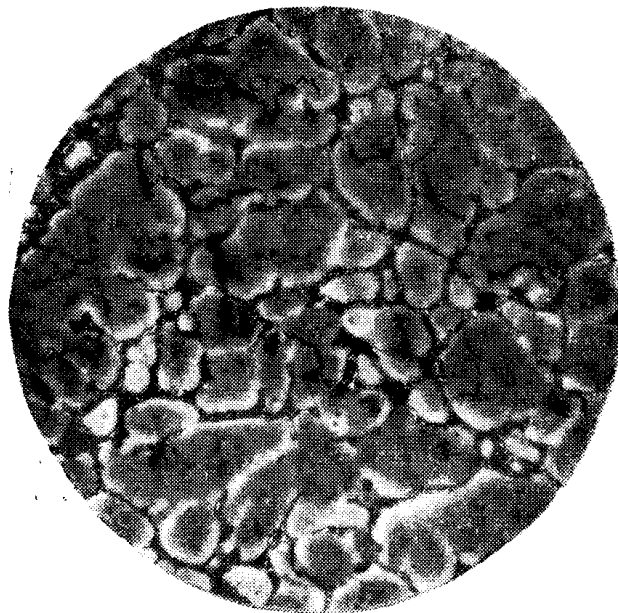


Рис. 1. Микроструктура стали 1,0—4—12—2 в закаленном состоянии. X660.

по мере увеличения содержания углерода в стали, хотя легированность твердого раствора при этом также уменьшается (табл. 2). Последнее хорошо видно на структуре стали 2,0—4—12—2 (рис. 2) и объясняется,

по-видимому, более равномерным распределением хрома в объеме зерна под действием углерода. Этот результат находится в соответствии с экспериментальными данными А. С. Завьялова и Б. И. Брука [5].

Применение цветного окисления шлифов позволило установить фазовый состав ледебурита. Во всех сталях он состоит из металлической основы синего цвета, что свидетельствует о значительном обеднении ее хромом, светлых карбидов хрома, коричневых карбидов ванадия и светло-желтых карбидов вольфрама с железом.

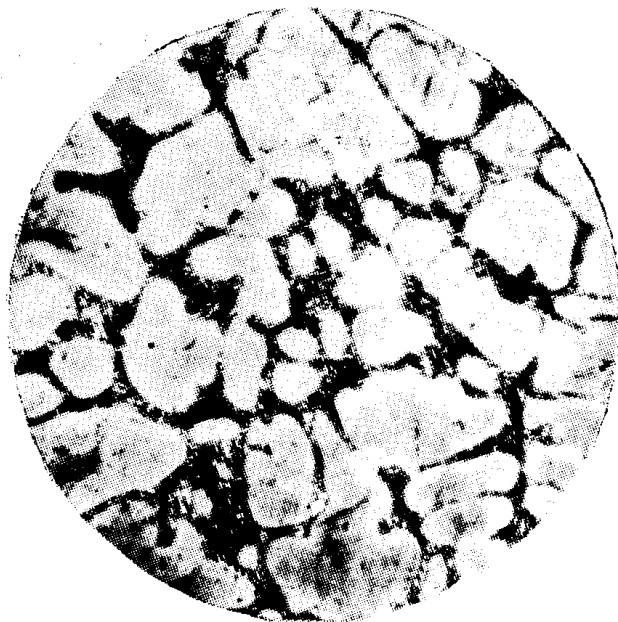


Рис. 2. Микроструктура стали 2,0—4—12—2 в закаленном состоянии. X660.

Таким образом, применение цветного окисления позволило выяснить влияние углерода на внутрикристаллическую ликвацию и определить фазовый состав первичных карбидов.

Образцы для выделения карбидов имели диаметр 10 мм и длину 60 мм. Вследствие значительной коррозионной стойкости металлической основы сталей в закаленном и отпущенном состояниях, выделение карбидных осадков производилось в химически активном электролите состава: 100 мл соляной кислоты, 10 г тиосульфата и 75 г хлористого калия на 1 л воды [6]. При использовании этого электролита происходит равномерное растворение образцов, без наличия на их поверхности остатков блестящей металлической пленки. Для выделения карбидного осадка из отожженных образцов был применен однонормальный раствор хлористого калия с добавкой 5 г лимонной кислоты на литр раствора [7]. При применении обоих электролитов растворение велось при плотности тока—0,02—0,03  $a/cm^2$  и температуре 12—14°C. Время растворения: 3—4 часа для закаленных и 2—3 часа для отпущенных и отожженных образцов.

Результаты определения количества карбидов, их химического состава и распределения легирующих элементов между фазами исследованных сталей приведены в табл. 2.

Ход кривых  $W_p$ ,  $V_p$  и  $Cg_p$  на рис. 3 указывает, что при повышении содержания углерода в стали происходит обеднение твердого раствора легирующими элементами, вследствие перехода их в карбиды. Этим же объясняется непрерывный подъем кривой количества карбидов и содержания в них легирующих элементов ( $W_k$ ,  $V_k$ ,  $Cg_k$ ).

Таблица 2

## Данные карбидного анализа

Обозначение сплавок	% карбидов	Химический состав осадка, %				Распределение легирующих элементов, %						*) Коэффициенты распределения		
		в карбидном осадке				в твердом растворе						$W_p: W_k$	$Cr_p: Cr_k$	$V_p: V_k$
		C	W	Cr	V	W	Cr	V	W	Cr	V			
После закалки (литья)														
1,0-4-12-2	7,6	--	12,69	22,54	6,55	0,96	1,71	0,49	3,06	10,05	1,79	3,2	5,8	3,6
1,5-4-12-2	12,9	--	12,68	24,35	6,67	1,63	3,14	0,86	2,49	8,92	1,33	1,5	2,8	1,5
2,0-4-12-2	17,7	--	12,22	26,98	6,26	2,15	4,78	1,11	2,01	7,10	1,06	0,9	1,4	1,0
После трехкратного отпуска при 560°														
1,0-4-12-2	14,5	--	13,24	32,64	7,64	1,92	4,72	1,10	2,10	7,04	1,18	0,9	1,5	1,1
1,5-4-12-2	19,1	--	12,85	29,61	6,86	2,44	5,65	1,31	1,68	6,41	0,88	0,6	1,1	0,7
2,0-4-12-2	18,9	--	11,89	26,35	5,97	2,24	5,17	1,13	1,92	6,71	1,04	0,8	1,3	0,9
После отжига														
1,0-4-12-2	17,3	6,19	13,07	38,51	7,57	2,25	6,66	1,31	1,77	5,10	0,97	0,8	0,8	0,7
1,5-4-12-2	22,1	6,84	14,27	37,44	7,30	3,16	8,26	1,61	0,96	3,86	0,58	0,3	0,4	0,3
2,0-4-12-2	25,6	7,40	12,84	37,63	6,57	3,37	9,63	1,68	0,79	2,25	0,49	0,2	0,2	0,3

\*) p — доля элемента в твердом растворе,  
 k — доля элемента в карбидном осадке.

Переход легирующих элементов в карбиды обуславливается большим химическим сродством их с углеродом, чем с железом. Сильнее всего твердый раствор обеднился ванадием и вольфрамом и в меньшей степени — хромом. Чем меньше сродство элемента с углеродом, тем

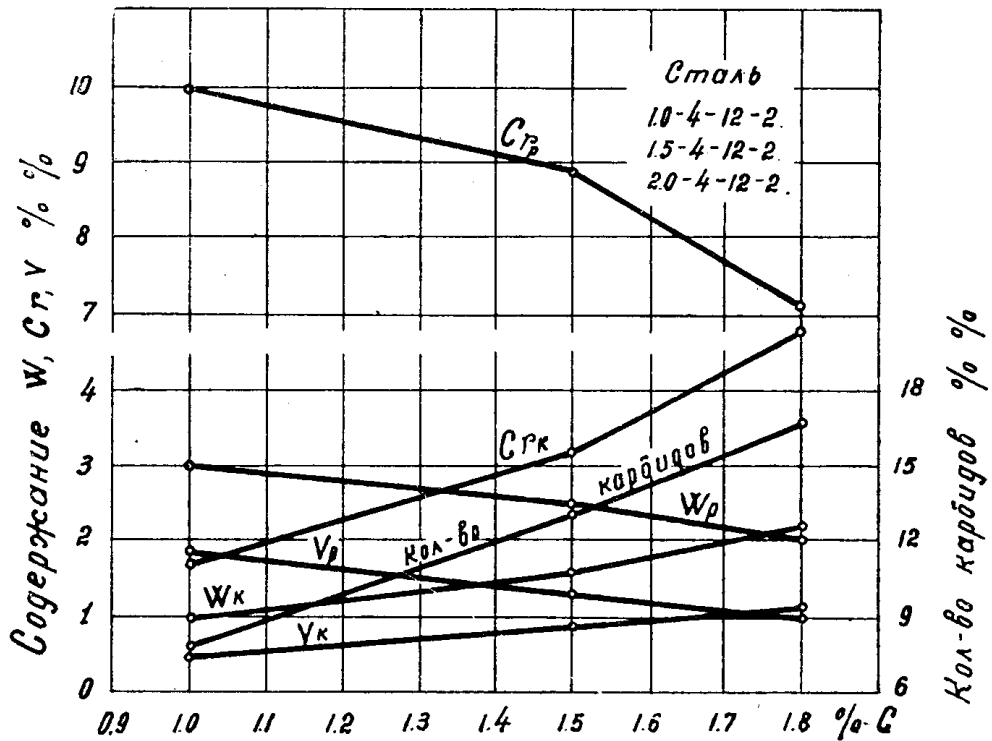


Рис. 3. Зависимость количества карбидов, легированности твердого раствора и карбидов закаленной стали от содержания в ней углерода.

в меньшей степени происходит и обеднение твердого раствора этим элементом. Это подтверждается сравнением отношений концентраций легирующих элементов в карбидном осадке ( $W_{ко}$ ,  $V_{ко}$ ,  $Cr_{ко}$ ) к концентрации их в твердом растворе ( $W_{тр}$ ,  $V_{тр}$ ,  $Cr_{ко}$ ). С увеличением концентрации углерода в стали эти отношения увеличиваются после закалки и после отжига (табл. 3).

Таблица 3

Влияние содержания углерода на отношения концентраций легирующих элементов в карбидном осадке к концентрациям в твердом растворе

Обозначение стали	$W_{ко} : W_{тр}$	$Cr_{ко} : Cr_{тр}$	$V_{ко} : V_{тр}^*)$
После закалки (литья)			
1,0-4-12-2	4,2	2,25	3,6
1,5-4-12-2	5,2	2,7	5,1
2,0-4-12-2	6,0	3,9	6,2
После трехкратного отпуска при 560°			
1,0-4-12-2	6,3	4,6	6,3
1,5-4-12-2	7,5	4,6	8,5
2,0-4-12-2	6,0	4,0	5,9

Обозначение стали	$W_{\text{ко}} : W_{\text{тр}}$	$Cr_{\text{ко}} : Cr_{\text{тр}}$	$V_{\text{ко}} : V_{\text{тр}}^{*)}$
После отжига			
1,0—4—12—2	7,2	7,4	7,6
1,5—4—12—2	14,9	9,6	12,1
2,0—4—12—2	18,5	16,7	13,2

\*) ко — концентрация легирующего элемента в карбидном осадке,  
тр — концентрация легирующего элемента в твердом растворе.

Эти отношения также показывают, что растворимость в твердом растворе хрома, обладающего меньшим сродством с углеродом, чем вольфрам и ванадий, больше растворимости вольфрама и ванадия. Так, концентрация хрома в твердом растворе после закалки в среднем в 2,5—4 раза, а после отпуска в 4,5 раза меньше, чем его концентрация в карбидном осадке. Содержание же вольфрама и ванадия в твердом растворе после закалки и после отпуска в четыре и более раза меньше, чем в карбидах. В отожженном состоянии растворимость в твердом растворе хрома, вольфрама и ванадия примерно одинакова. Анализ карбидного осадка отожженных сталей на углерод показал, что он весь находится в карбидах (табл. 2).

Приведенные отношения концентраций, а также коэффициенты распределения (табл. 2) характеризуют влияние содержания углерода в стали на перераспределение легирующих элементов между фазами при отпуске. Сравнение указанных отношений для закаленного состояния и после отпуска показывает, что с повышением содержания углерода в стали уменьшается степень обеднения твердого раствора легирующими элементами. Это отчетливо видно, если сравнить коэффициенты распределения легирующих элементов для сталей 1,0—4—12—2 и 2,0—4—12—2 (табл. 2). Коэффициенты распределения первой стали уменьшились для вольфрама с 3,2 до 0,9, для хрома с 5,8 до 1,5 и для ванадия с 3,6 до 1,1. Эти же коэффициенты стали 2,0—4—12—2 после отпуска и до него не отличаются между собой. Это подтверждается и тем, что с увеличением содержания углерода в стали уменьшается разница между концентрацией легирующего элемента в закаленном твердом растворе и в твердом растворе после отпуска (рис. 4). Параллельно с этим уменьшается и количество вторичных карбидов после отпуска.

Уменьшение степени обеднения твердого раствора легирующими элементами после трехкратного отпуска при 560° доказывает повышение устойчивости остаточного аустенита, а снижение твердости стали после закалки (табл. 1) свидетельствует об увеличении количества его при введении углерода в сталь.

Увеличение количества остаточного аустенита связано с понижением температуры начала мартенситного превращения под действием углерода, растворяющегося в твердом растворе. При этом действие дополнительно растворившегося углерода в аустените на снижение температуры начала мартенситного превращения более эффективно, чем ее повышение за счет суммарного снижения концентрации всех легирующих элементов в аустените. Например, общее снижение легированности аустенита стали 2,0—4—12—2 по сравнению со сталью 1,0—4—12—2 составляет 1,05% W + 2,95% Cr + 0,73% V = 4,73%. Это должно повысить температуру начала мартенситного превращения стали 2,0—4—12—2. Однако увеличение содержания углерода в стали 1,0—4—12—2 на

0,82% (сталь 2,0—4—12—2), часть которого растворяется в аустените, снизило температуру начала мартенситного превращения по сравнению с ее начальным положением.

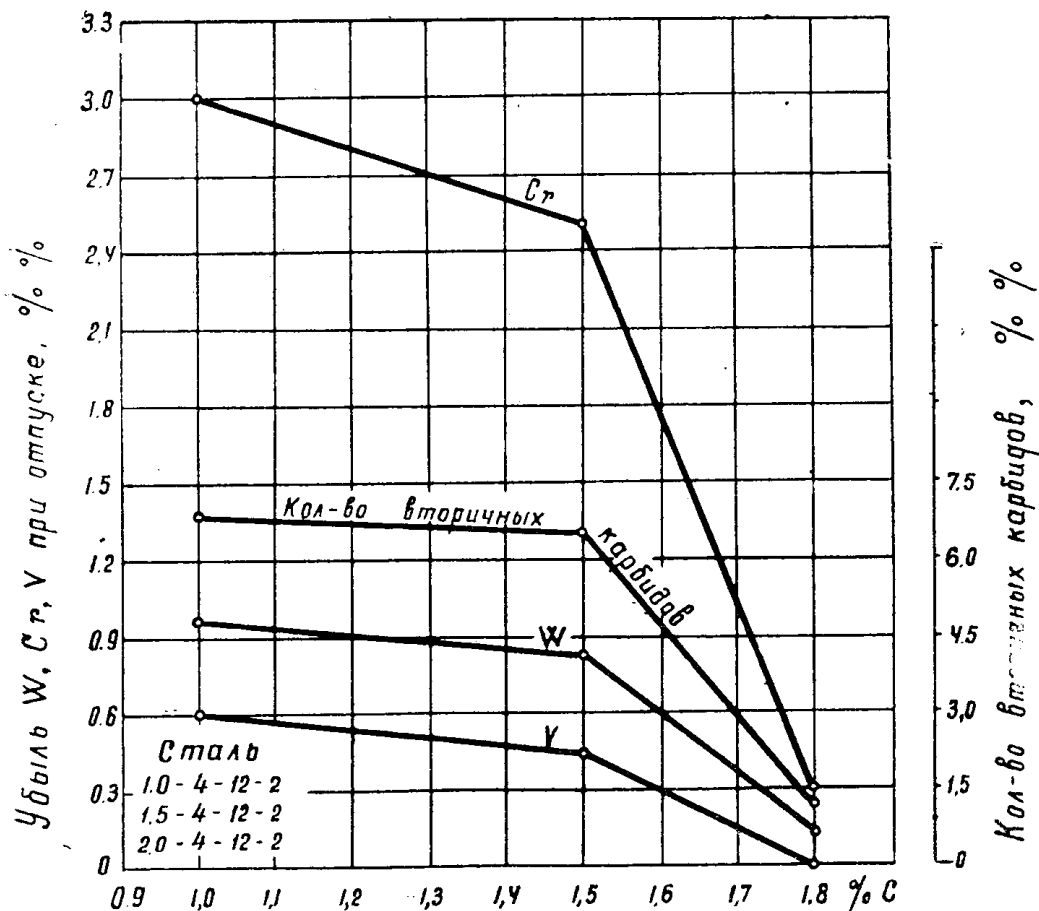


Рис. 4. Степень обеднения твердого раствора легирующими элементами при отпуске в зависимости от содержания углерода в стали.

Повышение устойчивости остаточного аустенита можно объяснить прямым и косвенным действием углерода. Прямое действие можно связать с тем, что, находясь в твердом растворе, углерод задерживает диффузионные процессы, сопровождающие выделение вторичных карбидов при отпуске. Последнее возможно только при увеличении межатомных сил связи в решетке аустенита. Косвенное действие углерода можно отнести за счет уменьшения количества мартенсита, который способствует более быстрому распаду аустенита [8]. Считается, что, чем больше в стали мартенсита, тем быстрее распадается остаточный аустенит. Таким образом, ответственным за увеличение количества и повышение устойчивости остаточного аустенита всецело является углерод. Обе из указанных характеристик находятся в прямой зависимости от концентрации углерода в аустените.

Изменение твердости при многократном отпуске (табл. 4), величина вторичной и максимальной твердости и им соответствующая температура при последовательном отпуске (табл. 5) подтверждают результаты фазового анализа. Эти данные также показывают, что с повышением содержания углерода в стали и соответственно в закаленном твердом растворе устойчивость и количество остаточного аустенита увеличивается. Например, твердость стали 2,0—4—12—2 после трехкратного

Таблица 4

Изменение твердости стали при температуре отпуска 560°

Обозначение стали	$R_c$ после закалки	$R_c$ после отпуска									
		кратность отпуска									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1,0—4—12—2	57	63	60	55	53	52	52	50	50	49	49
1,5—4—12—2	51	53	56	60	61	60	59	58	58	58	57
2,0—4—12—2	49	47	47	48	48	49	57	57	57	57	57

Таблица 5

Величина вторичной и максимальной твердости и им соответствующая температура при последовательном отпуске сталей

Обозначение стали	Максимальная твердость, $R_c$	Температура максимальной твердости, °С	Значение вторичной твердости, $R_c$
1,0—4—12—2	62	575	5
1,5—4—12—2	63	600	12
2,0—4—12—2	61	650	12

отпуска при 560° не изменилась по сравнению с закаленным состоянием, поэтому почти не изменились и коэффициенты распределения легирующих элементов. Этот же отпуск сталей (1,0—1,5)—4—12—2 привел к значительным структурным изменениям — в той и другой стали твердость достигла максимального значения — поэтому в значительной мере произошло перераспределение легирующих элементов (рис. 4).

### Выводы

Полученные в настоящей работе экспериментальные данные свидетельствуют о следующих закономерностях:

1. Увеличение содержания углерода в стали приводит к непрерывному обеднению твердого раствора вольфрамом, хромом и ванадием после закалки и после отжига. При этом количество карбидов и содержание в них легирующих элементов непрерывно увеличиваются.

2. Увеличение количества и повышение устойчивости остаточного аустенита находится в прямой зависимости от концентрации углерода в нем.

3. При перераспределении легирующих элементов в процессе трехкратного отпуска при 560° в наибольшей степени обедняется легирующими элементами твердый раствор (аустенит) с наименьшей концентрацией в нем углерода.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гуляев А. П. Сталь, № 3, 1946.
2. Кватер И. С. Литые быстрорежущие стали. Машгиз, 1952.
3. Старова Е. П. Малолегированные быстрорежущие стали с азотом. Машгиз, 1954.
4. Горюнов И. И. Отливка инструмента в металлические формы. Литой и наплавленный инструмент. Сб. статей, Машгиз, 1951.
5. Завьялов А. С. и Б. И. Брук. Физика металлов и металловедение, т. 8, в. 3, 1959.
6. Лашко Н. Ф., Еремин Н. И. Фазовый анализ и структура аустенитовых сталей. Машгиз, 1957.
7. Попова Н. М. Карбидный анализ. Машгиз, 1949.
8. Юшкевич П. М. Журнал технической физики, т. 24, в. 4, 1954.