

– ресурсосбережения – за счет резкого уменьшения расходования коксующегося угля, шлакообразующих материалов, огнеупоров;

– природоохранную – за счет резкого уменьшения количества отходов (шлаков и шлакоотвалов), уменьшения выбросов в коксохимическом, агломерационном, доменном, конвертерном, ферросплавном производствах;

– экономическую – за счет исключения коксохимического, аглодоменного, конвертерного производств и, соответственно, их уникального и дорогого оборудования;

– кадровую – за счет резкого уменьшения числа переделов, количества работников и коренного улучшения условий труда.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Теоретические основы процессов производства углеродистого феррохрома из уральских руд: Монография / В.П. Чернобровин, И.Ю. Пашкеев, Г.Г. Михайлов и др. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – 346 с.
2. Колчин О.П. О механизмах восстановления металлов из их окислов углеродом: Сб. «Механизм и кинетика восстановления металлов». – М.: Наука, 1970. С. 40 – 48.

3. Жуховицкий А.А., Шварцман Л.А. Физическая химия. – М.: Металлургия, 1968. – 520 с.
4. Есин О.А., Гельд П.В. Физическая химия пирометаллургических процессов. – Свердловск: Металлургиздат, 1962. Ч. 1. – 671 с.
5. Стильбанс Л.С. Физика полупроводников. – М.: Советское радио, 1967. – 452 с.
6. Медвинский А.А., Болдырев В.В. Развитие представлений об электронных и ионных процессах при термическом распаде ионных кристаллов окислов. Физическая химия окислов. – М.: Наука, 1971. С. 39 – 54.
7. Бокштейн Б.С., Ярославцев А.Б. Диффузия атомов и ионов в твердых телах. – М.: МИСиС, 2005. – 362 с.
8. Рощин А.В., Рощин В.Е. // Металлы. 2003. № 2. С. 3 – 9.
9. Рощин В.Е., Рощин А.В., Рябухин А.Г. // Металлы. 2006. № 3. С. 8 – 16.
10. Взаимодействие окислов металлов с углеродом / В.П. Елютин, Ю.А. Павлов, В.П. Поляков, Б.В. Шеболдаев. – М.: Металлургия. – 1976. – 359 с.
11. Фистуль В.И. Физика и химия твердого тела – М.: Металлургия, 1995. Т. II. – 450 с.
12. Рощин В.Е., Рощин А.В., Рябухин А.Г., Гойхенберг Ю.Н. // Металлы. 2007. № 4. С. 3 – 10.

© 2013 г. В.Е. Рощин, А.В. Рощин  
Поступила 11 февраля 2013 г.

УДК [669.131.2:669.111.35]:621.78.08

*К.Н. Вдовин, Д.А. Горленко, А.Н. Завалищин*

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

## ВЛИЯНИЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ОТПУСКА НА ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ФАЗ В БЕЛОМ КОМПЛЕКСНО ЛЕГИРОВАННОМ ЧУГУНЕ

**Аннотация.** Рассмотрены результаты лабораторных исследований химического состава металлической основы и карбидов в комплексно легированном чугуна как в литом состоянии, так и после термической обработки по промышленному режиму. Выявлены закономерности перераспределения химических элементов в металлической основе, эвтектических и вторичных карбидах.

**Ключевые слова:** Прокатные валки, промышленный отпуск, микроструктура, химический состав, эвтектические карбиды, вторичные карбиды, аустенит.

## EFFECT OF THE INDUSTRIAL LEAVE ON CHEMICAL COMPOSITION OF PHASES IN THE WHITE COMPLEX ALLOYED CAST IRON

**Abstract.** The article reviewed the results of laboratory analysis of chemical composition of the metal substrate and carbides in the complex alloyed cast iron, as in the cast state and after heat treatment of industrial mode. The regularities of the redistribution of the chemical elements in the metal substrate, eutectic carbides and secondary carbides, were revealed.

**Keywords:** Mill rolls, industrial leave, microstructure, chemical composition, eutectic carbides, secondary carbides, austenite.

Комплексно легированные Ti–V–Cr–Ni–Nb чугуны используются для изготовления деталей, работающих в условиях абразивного износа при повышенных температурах, в том числе для валков горячей прокатки. После кристаллизации и охлаждения в отливках возникают значительные усадочные и термические напряжения, связанные с массивностью изделий и низкой теплопроводностью легированного чугуна, которые дополняются фазовым наклепом при  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращении. Для заклю-

чительной операции в производстве прокатных валков используют отпуск для снятия напряжений. Традиционной обработкой является однократный многочасовой среднетемпературный отпуск с замедленной скоростью нагрева и охлаждения для предотвращения трещинообразования [1]. В процессе отпуска происходит распад остаточного аустенита с образованием бейнита, который негативно влияет на эксплуатационные свойства [2]. При этом идет дополнительное выделение карби-

дов с одновременным перераспределением химических элементов между металлической основой и карбидами.

Повышение эксплуатационных свойств чугунных валков достигается путем изменения режима термообработки [3]. Однако при этом изменяется кинетика распада аустенита и условия перераспределения химических элементов по сравнению с процессами, протекающими при существующих режимах отпуска. Поэтому целью работы явилось исследование изменения структуры и химического состава всех структурных составляющих белого чугуна после кристаллизации и после отпуска в производственных условиях.

Исследования проводили на образцах чугуна, химический состав которого представлен в таблице.

Образцы отбирали от рабочего слоя прокатного вала после кристаллизации и после отпуска. Распределение элементов определяли на растровом электронном микроскопе Tescan VEGA II LMU с приставкой микрорентгеноспектрального анализа INCA Energy 450. Для исключения наложения спектра основы на спектр вторичных карбидов, вызванного тем, что область возбуждения рентгеновского излучения (около 30 мкм) больше размеров вторичных карбидов, применяли электролитическое травление образцов в 3 % водном растворе соляной кислоты при плотности тока 200 А/м<sup>2</sup> [4]. Результатом явилась рельефная поверхность с глубиной травления основы 100 – 150 мкм, представленная на рис. 1.

После кристаллизации и охлаждения структура образцов, отобранных из рабочего слоя прокатного вала, состоит из дендритов аустенита, 80 % которого превратилось в крупногочелчатый мартенсит, эвтектические и вторичные карбиды (рис. 2). Карбиды отличаются между собой как по форме и размерам, так и химическим составом.

В дендритах аустенита содержится до, %: 0,7 Mn; 4,8 Ni; 1,0 Si; 0,9 Cr; 1,3 Cu. В состав эвтектических карбидов входит, %: 78,5 Fe; 3,6 Cr; 1,1 Mn; 0,6 V; до 1,5 Ni; остальное углерод. Вторичные карбиды различаются по морфологии и составу, что послужило основанием их условно разделить в зависимости от содержания ниобия и железа на три группы.

К карбидам первой группы отнесли те, в которых основным карбидообразующим элементом является ниобий с содержанием в пределах 67,0 – 68,0 %. В них также присутствуют 0,3 – 0,8 % титана, 2,0 – 2,5 % ванадия, 4,0 – 6,0 % железа, до 0,6 % хрома. Они имеют пластинчатую форму с толщиной пластин 0,8 – 2,0 мкм и расположены внутри дендритов. Направление совпадает с дендритными осями первого и второго порядка, и лишь иногда достигают границ эвтектических карбидов (оси второго порядка). Угол поворота между осями либо 120°, либо 90° (рис. 3, а, б).

К карбидам второй группы отнесли карбиды, в которых помимо 60,0 – 65,0 % ниобия входит железо в пределах 18,0 – 20,0 %. В них также содержится 1,5 – 2,4 % V, 0,5 – 0,7 % Cr. Поэтому основным отличием карбидов второй группы от первой является повышение содержания железа в 4 – 5 раз с соответствующим снижением на несколько процентов ниобия. Они выделяются в виде коротких и более толстых пластин по сравнению с карбидами первой группой и полностью располагаются внутри дендритов аустенита (рис. 3, в, г).

В карбидах третьей группы соотношение ниобия и железа изменяется и становится 35 – 45 % и 20 – 40 % соответственно. Содержание хрома увеличивается до 0,6 – 2,2 %, также присутствуют 1,0 – 3,0 % ванадия и до 0,4 % титана. Помимо этого в их составе появляется до 0,3 % марганца, 1,5 – 3,0 % никеля и 0,3 – 0,7 % кремния, которые не наблюдаются в предыдущих

Химический состав белого чугуна, %

| C           | Si        | Mn          | S     | P     | Cr          | Ni        | V           | Ti          | Nb          |
|-------------|-----------|-------------|-------|-------|-------------|-----------|-------------|-------------|-------------|
| 3,05 – 3,20 | 0,7 – 1,0 | 0,75 – 0,95 | 0,015 | 0,045 | 1,50 – 1,85 | 4,0 – 4,6 | 0,15 – 0,20 | 0,01 – 0,02 | 0,45 – 0,70 |

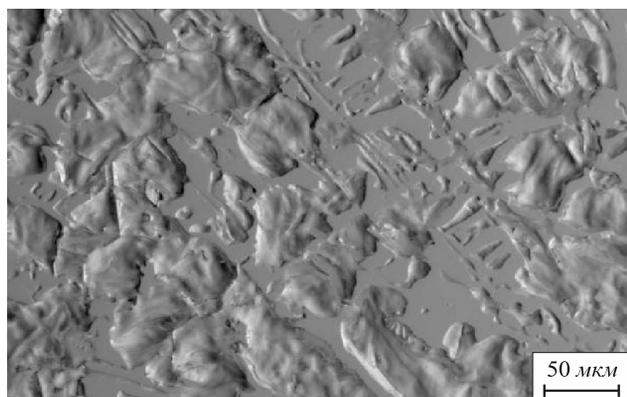


Рис. 1. Поверхность образца после электролитического травления,  $\times 300$

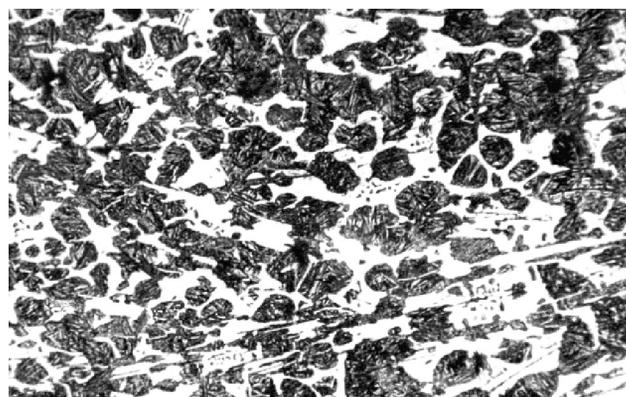


Рис. 2. Микроструктура рабочего слоя в литом состоянии,  $\times 500$

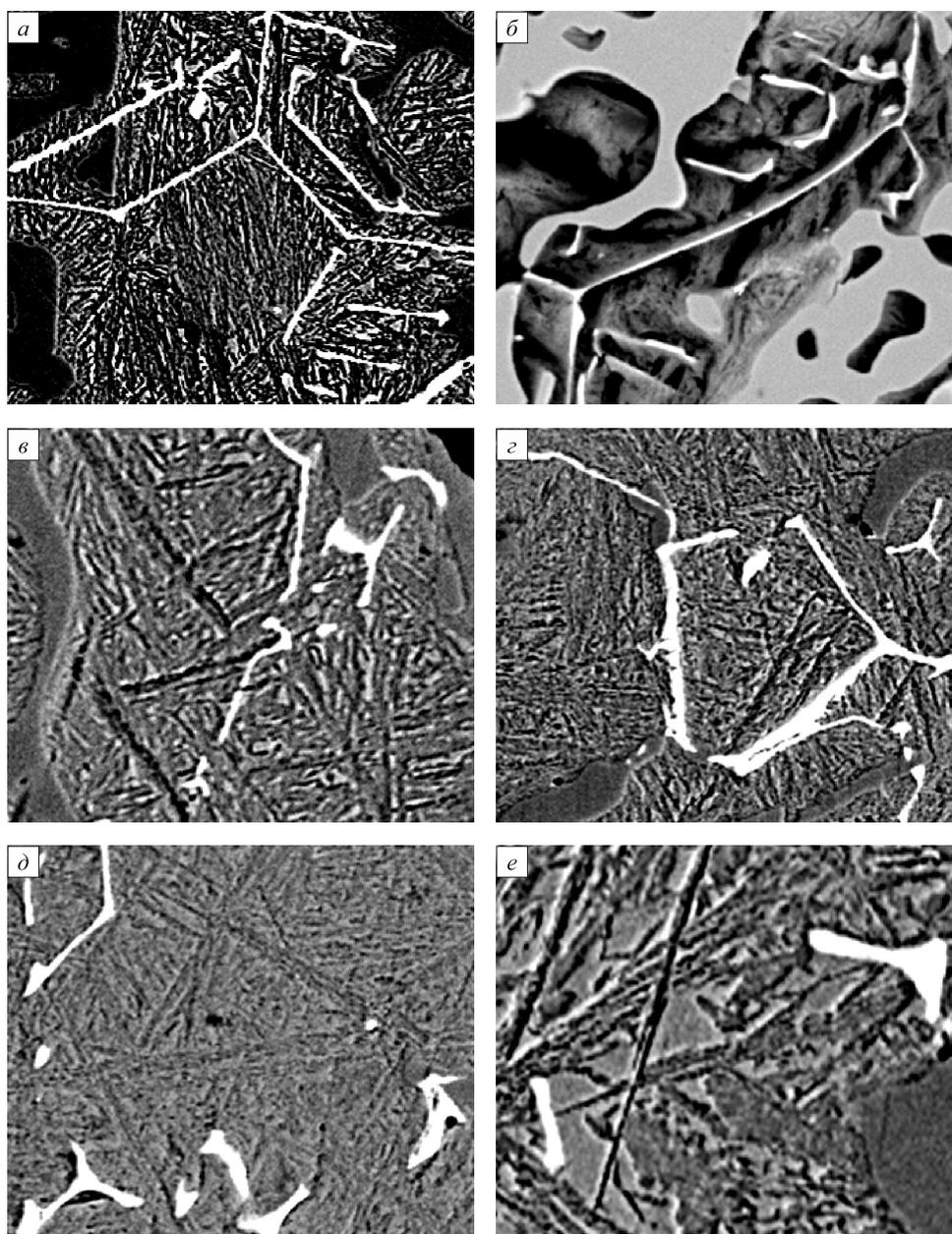


Рис. 3. Вторичные карбиды разных условных групп (изображение во вторичных электронах):  
 а – первой группы,  $\times 1000$ ; б – первой группы,  $\times 2000$ ; в – второй группы,  $\times 1000$ ; з – второй группы,  $\times 2000$ ;  
 д – третьей группы,  $\times 1000$ ; е – третьей группы,  $\times 2000$

двух группах. Карбиды третьей группы имеют формы, близкие к округлой, треугольной и ромбической с углом при вершине от  $60 - 120^\circ$ . По строению и контрасту при съемке во вторичных электронах видно, что данная группа карбидов формируется на карбидах первой группы: происходит рост и изменение форм, основой остается тонкий стержень карбида на основе ниобия (рис. 3, д, е). Отличия в химическом составе от карбидов первой группы заключаются в увеличении содержания железа в 10 раз, содержания хрома в 3 раза, раздвигаются границы содержания ванадия как в меньшую, так и в большую сторону. Встречаются карбиды, не имеющие в своем составе титана. Наряду с карбидообразующим марганцем, в состав входят

кремний и никель, это происходит за счет того, что рост карбидов осуществляется элементами основы.

Промышленный отпуск практически не влияет на химический состав дендритов, в которых остается  $3,0 - 3,5\%$  остаточного аустенита, за исключением углерода, содержание которого снижается более чем на  $2\%$ . Происходит рост ранее выделившихся при охлаждении после кристаллизации вторичных карбидов всех рассмотренных групп и дополнительно выделяются новые карбиды.

Вновь выделившиеся вторичные карбиды первой группы идентичны по составу с «литыми». Однако в процессе роста ранее выделившихся карбидов первой группы происходит уменьшение содержания ниобия на

17 – 20 %, увеличение содержания железа до 20 – 22 %, появление никеля в количестве 1,5 – 2,0 %, увеличение содержания ванадия до 3,0 – 3,2 %.

Во вновь выделяющихся карбидах второй группы, по сравнению с «литыми», количество железа увеличивается на 4,5 – 5,0 % и в их составе появляется никель до 1,0 – 1,2 %. Содержание остальных элементов не меняется по сравнению с литым состоянием. В ранее выделившихся карбидах второй группы после термообработки увеличивается количество железа до 29 – 31 %, вместе с тем в их составе появляется до 0,5 % никеля и 0,1 % кремния; содержание ниобия снижается на 5 %.

В составе карбидов третьей группы, выделившихся после термообработки, по сравнению с литыми существуют отличия: содержание железа в 4 раза меньше, содержание никеля меньше в 7 раз, большее в 1,5 – 2,0 раза содержание титана, ванадия и хрома. В результате отпуска в большом количестве ранее выделившихся вторичных карбидов третьей группы наблюдается максимальное количество ниобия (60 – 62 %). При этом количество железа в 2,0 – 2,5 раза ниже и равно 7 – 14 %, как следствие во столько же раз ниже содержание никеля (0,4 – 1,4 %). Увеличивается в 2,5 раза количество ванадия и хрома до 3,6 и 1,6 % соответственно.

Сделав анализ выявленных групп карбидов и изменение концентрации элементов в литом состоянии и после отпуска, можно сделать вывод, что существующий режим термической обработки не обеспечивает получения необходимой мартенситной структуры.

**Выводы.** После кристаллизации структура состоит из дендритов, состоящих из игольчатых структур и остаточного аустенита, эвтектических и вторичных карбидов.

Вторичные карбиды можно условно разделить на три группы в зависимости от количества и содержания карбидообразующих элементов.

Термическая обработка не приводит к изменению химического состава, формы и количества эвтектических карбидов. В дендритах происходит частичный распад остаточного аустенита, количество которого снижается в 4 раза.

В результате отпуска происходит изменение химического состава вторичных карбидов, выделившихся во время охлаждения после кристаллизации, и выделение новых вторичных карбидов схожего химического состава по сравнению с литым состоянием.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трейгер Е.И., Пиховкин Н.И., Филь В.Л. // Сталь. 1983. № 9. С. 55 – 57.
2. Трейгер Е.И., Тилин В.Т., Гамов В.А. и др. // Сталь. 1985. № 8. С. 77 – 79.
3. Вдовин К.Н., Гималетдинов Р.Х., Колокольников В.М., Цыбров С.В. Прокатные валки: Монография. – Магнитогорск: МГТУ, 2005. – 543 с.
4. Лев Е.И. Карбидный анализ чугуна. – Харьков: Metallurgizdat, 1962. – 180 с.

© 2013 г. К.Н. Вдовин, Д.А. Горленко, А.Н. Завалицин  
Поступила 15 апреля 2013 г.