

Библиографический список

1. Берг П.П. Формовочные материалы. М.: Машгиз, 1963. 408 с.
2. Использование трибо- и пьезоэлектрического эффектов в приготовлении смесей / Васин Ю.П., Бортников М.М., Илларионов И.Е. и др. // Литейное пр-во. 1979. № 8. С. 25–26.
3. Пархоменко Э.И. Электрические свойства горных пород. М.: Наука, 1965.
4. Гудков А.С. и др. Основы поисков и разведки месторождений пьезооптических минералов. М.: Гостехиздат, 1960.
5. Волярович М.П., Соболев Г.А. Пьезоэлектрический метод геодезической разведки кварцевых и пегматитовых жил. М.: Наука, 1960.
6. Пархоменко Э.И. Явления электризации в горных породах. М.: Наука, 1968.
7. Олофинский Н.Ф. О применении электрических и других, связанных с ними, сухих методов обогащения в районах с ограниченными водными ресурсами // Теория и практика сепарации в электрическом и магнитном полях. М.: Наука, 1968. С. 20–45.
8. Машин А.Р. Электронно-струйная технология бетона и сборных железобетонных изделий. Саратов: Приволж. кн. изд-во, 1968. 288 с.
9. Илларионов И.Е. Исследование уплотняемости и текучести песчано-глинистых формовочных смесей при высоком давлении прессования: Дис. ... канд. техн. наук. Челябинск, 1973. 273 с.
10. К вопросу о влиянии постоянного тока на физико-механические свойства формовочных смесей / Васин Ю.П., Пашнин М.И., Илларионов И.Е. и др. // Прогрессивные технологические процессы в литейном производстве. Хабаровск, 1972. С. 44–46.
11. Толстой Н.А. и др. Жесткий электрический дипольный момент коллоидных частиц // Исследования в области поверхностных сил. М.: Наука, 1967. С. 56–78.
12. Дерягин Б.В., Кротова Н.А. Адгезия. М.; Л.: Изд-во. АН СССР, 1949. 244 с.

УДК 621.74:669.13.25.046(043)

В. М. Колокольников, Е. В. Петрович, Б. В. Воронков

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ БЕЛЫХ ЧУГУНОВ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ

Перспективными инструментальными и конструкционными материалами, в которых сочетаются повышенные прочность, пластичность, износостойкость, жаропрочность, жаростойкость и др., являются литые композиции из мягкой матрицы и упрочняющей фазы. Значительную группу литых композитов составляют комплексно-легированные белые чугуны с инвертированной структурой и высокотвердыми карбидами, вызывающими композиционное и дисперсионное упрочнение сплава. Свойства комплексно-легированных чугунов зависят от характера карбидной фазы и металлической основы (матрицы). Требования к структуре чугуна определяются условиями эксплуатации конкретных изделий. Металлическая матрица должна обладать достаточной прочностью, чтобы не разрушаться при приложении нагрузок при нормальных и повышенных температурах, и вязкостью, чтобы препятствовать выкрашиванию карбидов. Эвтектическая структура должна иметь композиционный характер.

Были разработаны белые чугуны, легированные комплексами V–Cu–Ti–B, V–Cr, V–Cr–Mo, Cr–Mn–Ni–Ti, Cr–Mn–Ni–Al, Cr–Mn–Ni–Nb, с ин-

вертированной микроструктурой и значительным композиционным упрочнением. Исследована структура и свойства этих чугунов в зависимости от химического состава и кинетических условий кристаллизации.

Структуру, фазовый состав чугунов и оксидных слоев исследовали с помощью металлографического, рентгенографического и электронографического методов.

Количественный металлографический анализ, автоматизированную обработку результатов измерения микротвердости проводили на анализаторе изображений Thixomet.

Межфазное распределение легирующих элементов определяли с помощью сканирующего электронного микроскопа с рентгеновским микроанализатором LEO 430 pi.

Химический состав оксидных и подоксидных слоев исследовали на спектрометре тлеющего разряда.

Окалиностойкость образца оценивали весовым методом по увеличению массы образца ($г/м^2$). Ростоустойчивость оценивали по изменению длины (%).

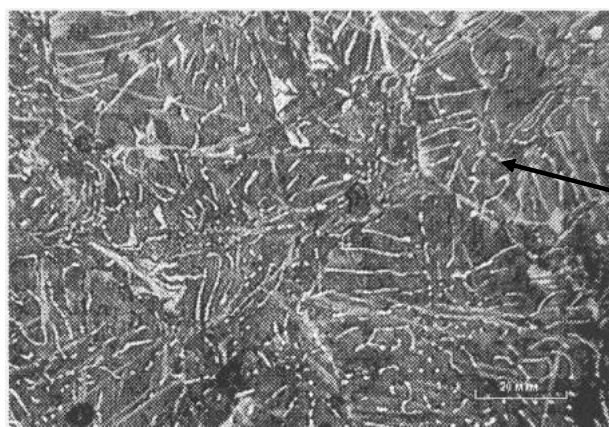
Испытание на износостойкость проводили при трении о жестко и нежестко закрепленный абразив на лабораторных установках.

Температуры и энтальпии фазовых переходов, окислительную стабильность исследовали на приборе синхронного термического анализа NETZSCH model STA 409 PC Luxx.

В структуре исследованных сплавов присутствуют следующие виды эвтектик: двойные эвтектики (γ +карбид легирующего элемента, (γ +легируемый цементит), тройные эвтектики (γ +карбид легирующего элемента+легируемый цементит, γ +МС+ M_7C_3 и др.). Эвтектические композиции в зависимости от химического состава и скорости охлаждения при кристаллизации могут иметь различный характер: волокнистый, зернистый пластинчатый, стержневой и др.

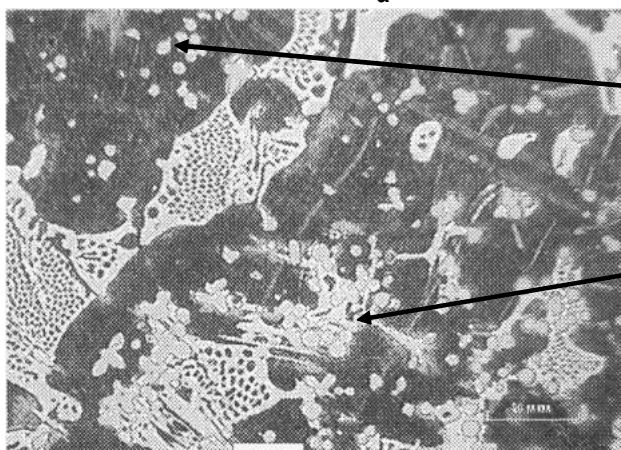
Примером полностью инвертированной структуры эвтектики является аустенитно-ванадиево-карбидная в белых ванадиевых чугунах.

В сплавах, содержащих 2,5% углерода и 7,0% ванадия, кристаллизация происходит практически без образования эвтектического цементита.



Волокнистая
эвтектика
A+VC

а



Зернистая
эвтектика
A+VC

A+VC+Fe₃C

б

Рис. 1. Микроструктура ванадиевых чугунов, залитых в песчано-глинистую форму (ПГФ)

Структура чугуна в основном состоит из тонко-разветвленных волокнистых или компактных эвтектических карбидов ванадия и перлитной матрицы (рис. 1, а, б).

С повышением содержания углерода до 3,0% инверсия чугуна становится неполной, увеличиваются количество и размеры колоний ледебуритоподобной составляющей до 25–27%, которая располагается в виде сплошной или частично разорванной сетки по границам колоний двойной эвтектики (см. рис. 1, б). Уровень микротвердости матрицы литых ванадиевых чугунов примерно одинаков, увеличивается с повышением концентрации углерода и незначительно возрастает с увеличением концентрации ванадия от 4600 до 5800 МПа.

Максимум износостойкости, твердости и прочности достигается при содержании в чугуне 2,6–3,0% С. При содержании менее 2,6 и более 3,0% С износостойкость чугуна резко падает. В первом случае снижение износостойкости вызвано уменьшением общего количества карбидной фазы, во втором – инверсия структуры чугуна становится неполной и, кроме того, образуются крупные карбидные включения, которые в процессе испытания выкрашиваются и увеличивают износ.

При оптимизации были определены оптимальные концентрации ванадия и углерода, масс. %: 2,6–3,0 С; 5,0–8,0 V. Именно при таком соотношении ванадия и углерода формируется структура, обеспечивающая максимальную износостойкость чугунов исследованных составов. Недостаточно высокая износостойкость исследованных чугунов обусловлена перлитной структурой металлической основы и наличием сетки ледебуритоподобной составляющей.

Повысить свойства белых чугунов можно за счет изменения плотности (изменения количества карбидной фазы) и характера эвтектических композиций. Регулировать в эвтектике количество, тип и морфологию карбидной фазы чугунов, строение металлической основы можно скоростью охлаждения (заливка в различные типы форм) и дополнительным их микролегированием и модифицированием малыми добавками высокоактивных элементов. В качестве таких элементов были выбраны медь, титан, бор, кальций.

Структура чугунов, залитых в ПГФ, состоит из перлита различной дисперсности, карбидов ванадия разветвленной

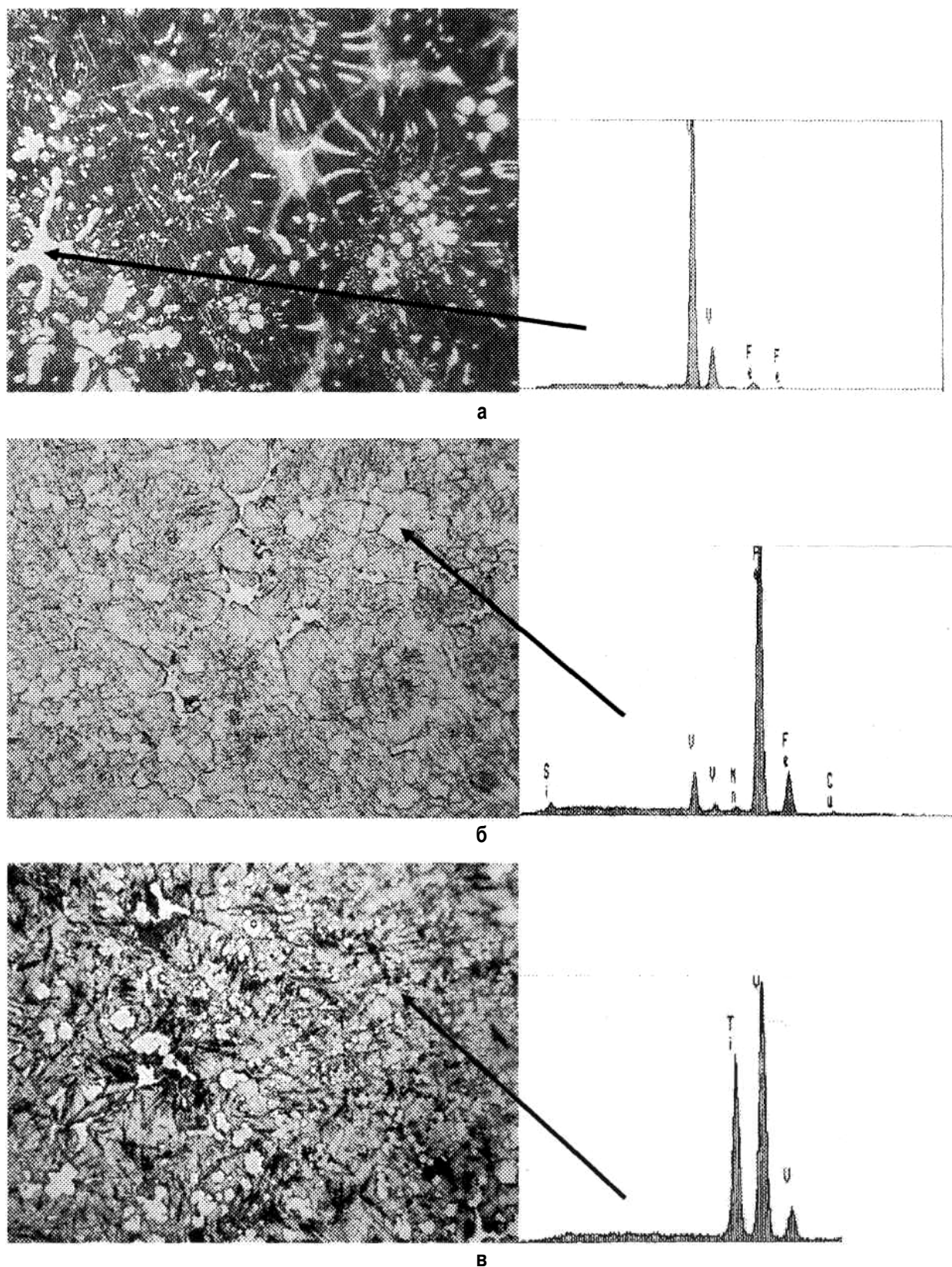


Рис. 2. Микроструктура комплексно-легированных ванадиевых чугунов, залитых в сухую ПГФ (а) и кокиль (б, в) и спектрограммы химического состава карбидов VC (а) и (Ti, V)C (б, в)

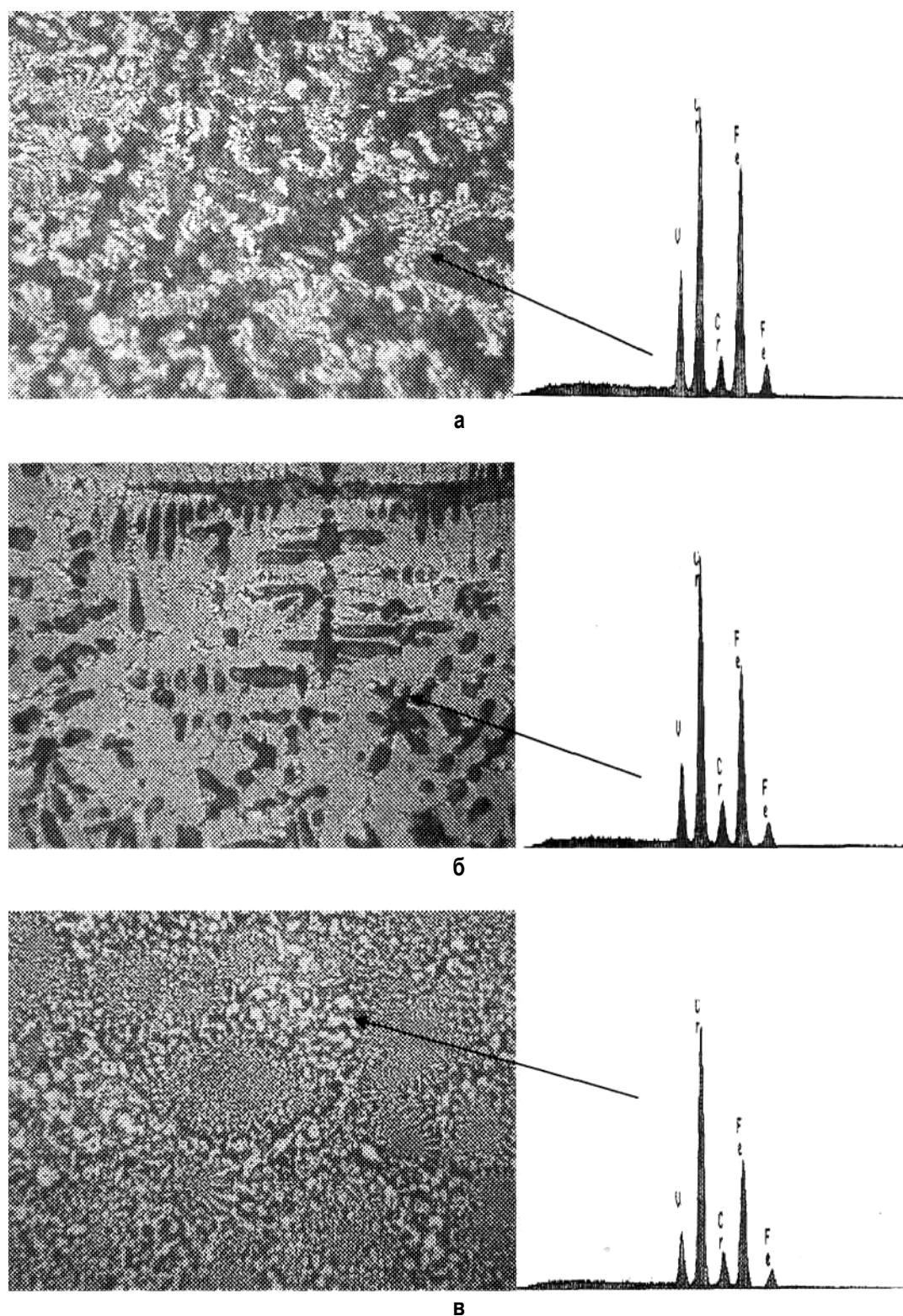
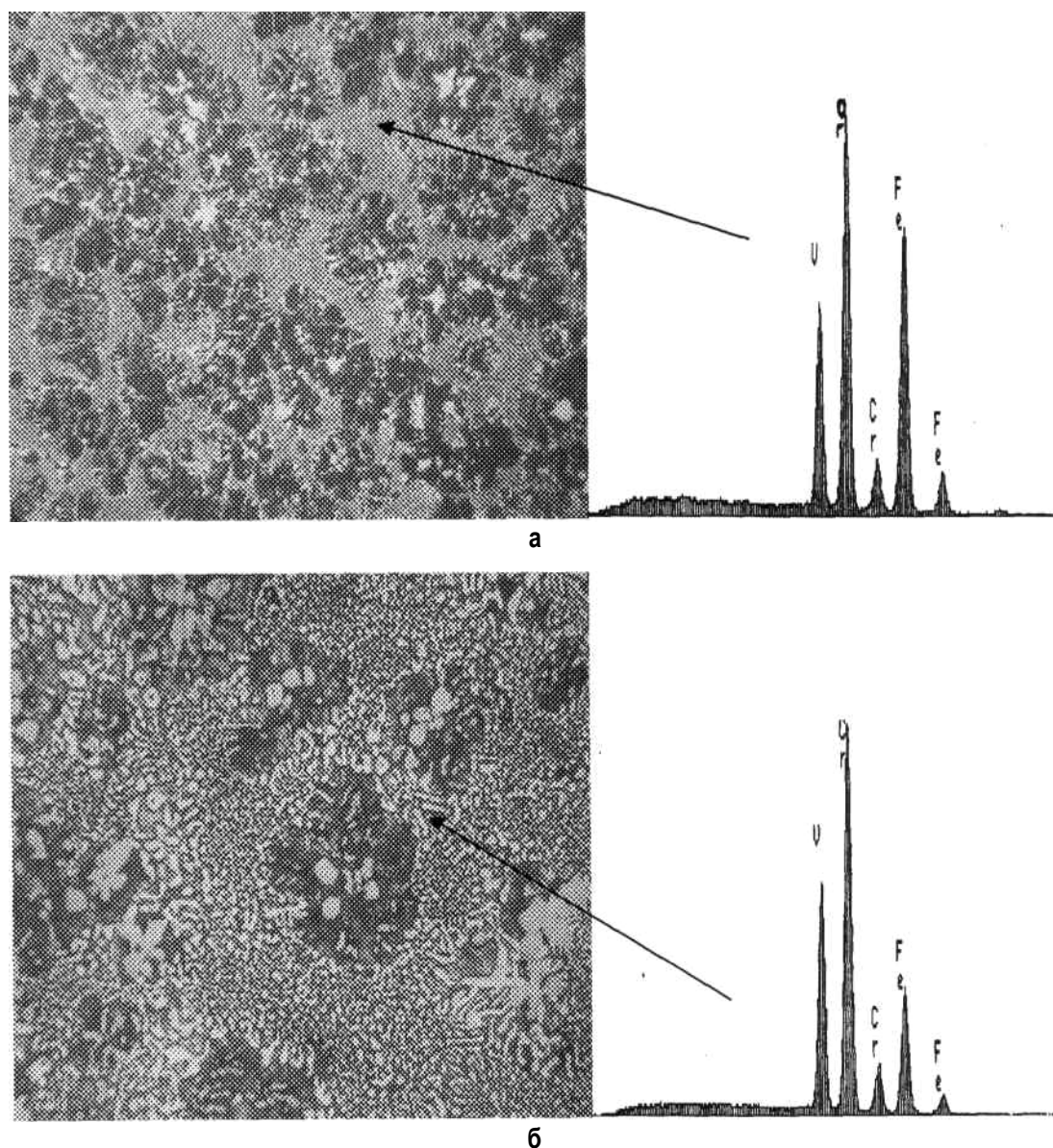


Рис. 3. Микроструктура доэвтектического чугуна и чугуна с эвтектиками $A + (Fe, Cr, V)_7C_3$ и $A + (Fe, Cr, V)_7C_3 + VC$

Рис. 4. Микроструктура эвтектик A + VC A + (Fe, Cr, V)₇C₃ + VC

формы и ледебурита. Структура чугунов, залитых в кокиль, изменяется от мартенситно-трооститной до мартенситно-аустенитной с различным количественным соотношением фаз с более мелкими карбидами ванадия. Увеличение скорости охлаждения при затвердевании (заливка в кокиль) изменяет форму и размеры карбидов. Карбиды ванадия становятся менее разветвленными, увеличивается дисперсность карбидов ванадия, двойной эвтектики и содержание в ней карбидной фазы (рис. 2).

Включения разветвленной формы представляют собой карбиды ванадия, а включения компактной формы – комплексные карбиды ванадия с титаном (Ti, V)C (см. рис. 2). Образование в структуре чугунов комплексных карбидов (Ti, V)C

компактной формы приводит к повышению износостойкости в условиях трения о полужакопленный абразив. Микротвердость карбидов ванадия 20000–22000 МПа, у комплексных карбидов выше – до 27500 МПа. Модифицирование титаном приводит к диспергированию карбидной фазы. Увеличение содержания титана в составе комплексных карбидов повышает их компактность и дисперсность. Количество ледебурита сокращается в 2–3 раза. Микроструктура матрицы – 4000–55000 МПа (сухая ПГФ), 6000–8000 МПа (кокиль).

В чугунах, легированных комплексом V–Cr, присутствуют сложные карбиды переменного состава (Fe, Cr, V)_xC_{1-x}, содержащие 26,0–48,0% железа, 41,0–52,0% хрома, 9,0–22,0% ванадия, и кар-

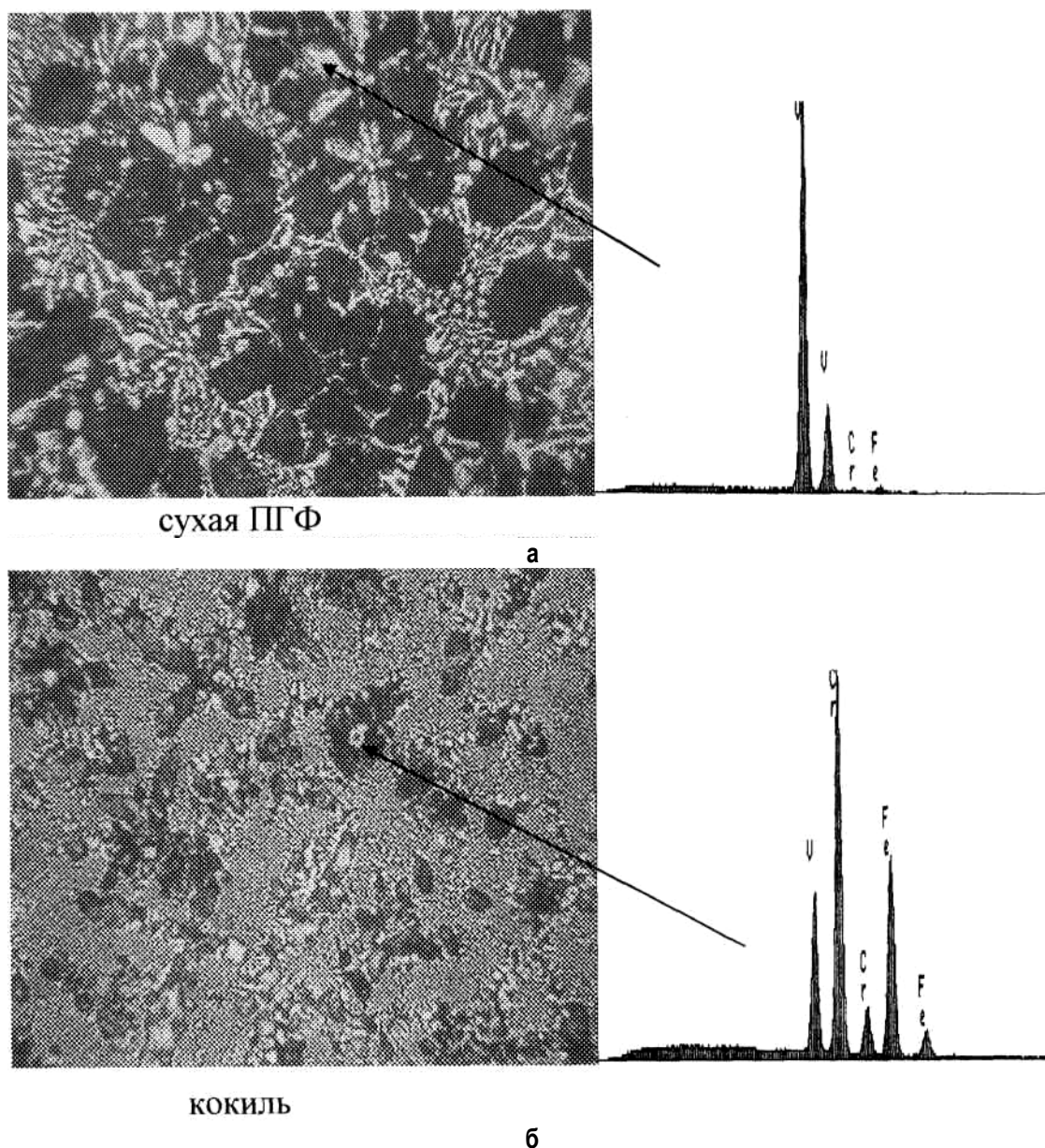


Рис. 5. Микроструктура хромованадиевых чугунов, залитых в сухую ПГФ (а) и кокиль (б)

бид ванадия VC, который ограниченно растворяет железо (до 2,0–5,0%), несколько больше – хром (8,0–16,0%). Микроструктура металлической основы в зависимости от химического состава и условий охлаждения – ферритная, перлитная и мартенситно-аустенитная.

После завершения кристаллизации и затвердевания в этих сплавах формируются следующие структуры:

– доэвтектическая структура, состоящая из избыточных дендритов аустенита (или продуктов его распада) и тройной эвтектики $A + (Fe, Cr, V)_7C_3 + VC$ розеточного строения (рис. 3, а, б). С возрастанием содержания хрома снижается количество и

размеры дендритов первичного аустенита, растет дисперсность и объемная доля аустенитохромистокарбидной эвтектики (см. рис. 3, б);

– структура, состоящая из двух эвтектик – $A + (Fe, Cr, V)_7C_3$ и $A + (Fe, Cr, V)_7C_3 + VC$ (рис. 3, в);

– структура, состоящая из двух эвтектик $A + VC$ и $A + (Fe, Cr, V)_7C_3 + VC$;

– структура, состоящая из дендритов первичных карбидов VC и двух эвтектик $A + (Fe, Cr, V)_7C_3$ и $A + (Fe, Cr, V)_7C_3 + VC$.

Колонии аустенитованадиевокарбидной эвтектики имеют сферолитную форму (рис. 4, 5). В случае повышенной скорости охлаждения (литье в кокиль) меняется характер избыточной фазы: вместо

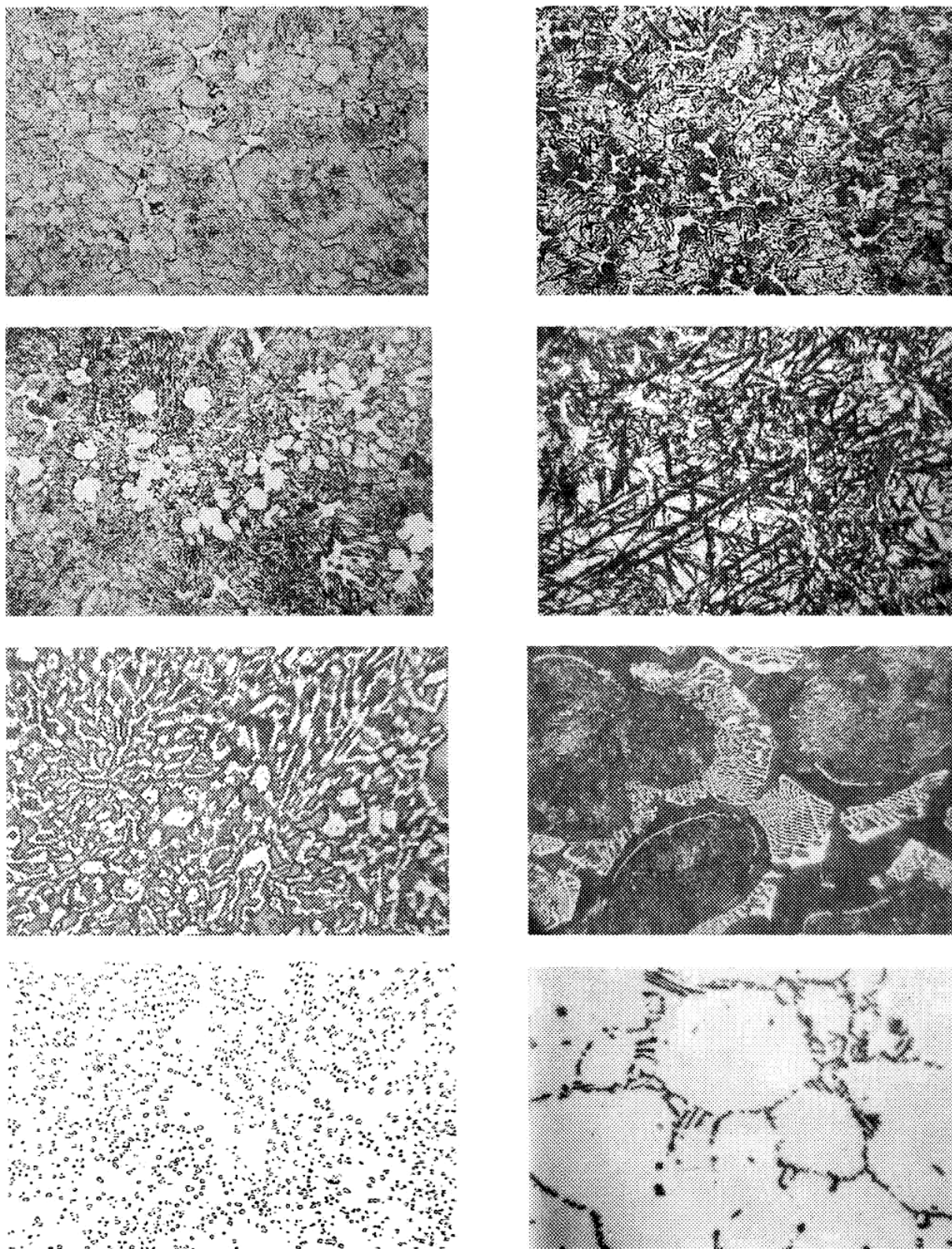


Рис. 6. Белые чугуны с аустенитной (а), мартенситно-трооститной (б), мартенситно-бейнитной (в) и мартенситно-аустенитной (г) металлической основой; с эвтектиками $A+Cr_7C_3$ (д); $A+(W, Fe)_6C$ (е); с зернистой $A+VC$ (ж) и пластинчатой $A+TiC$ (з)

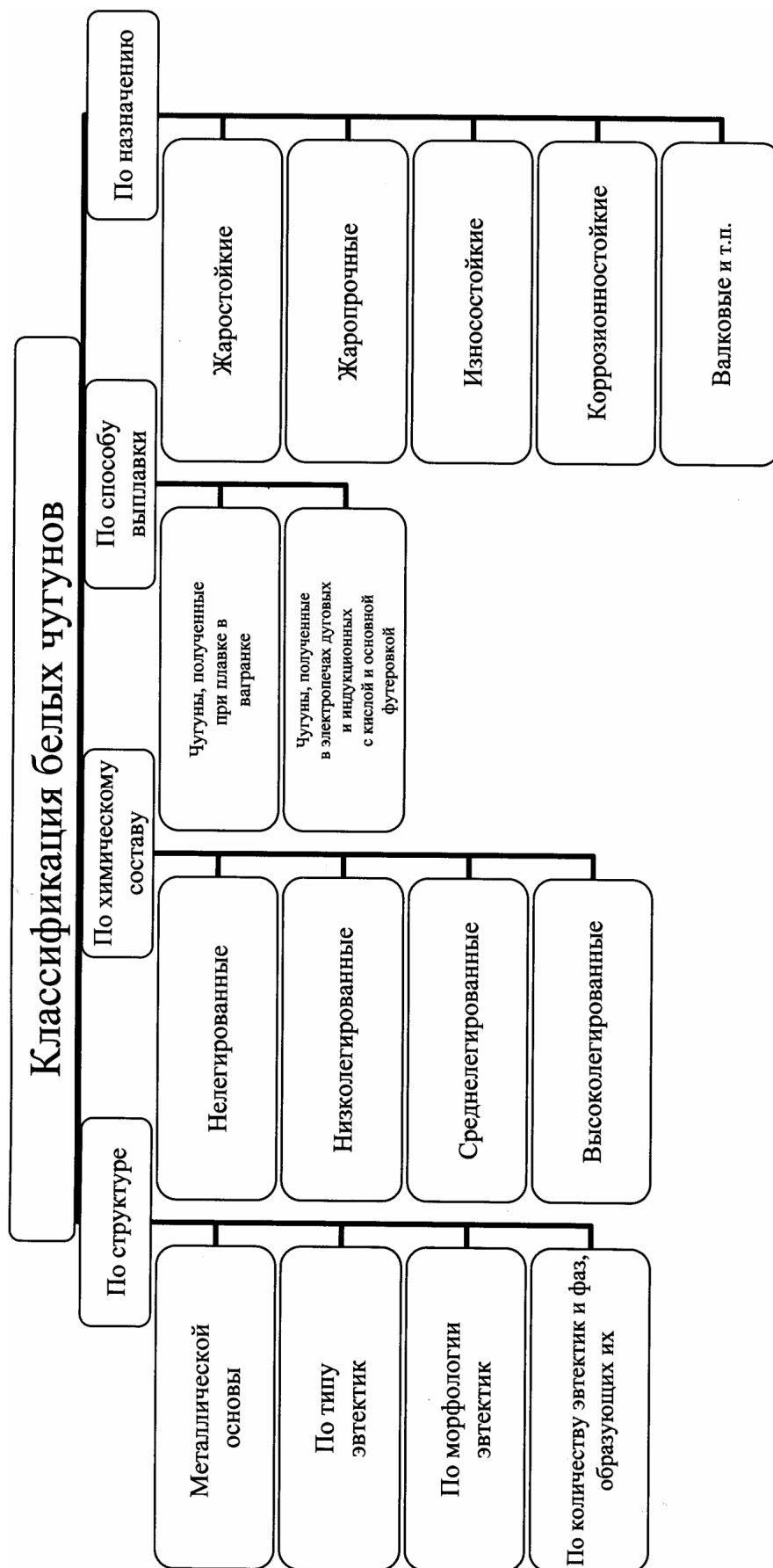


Рис. 7. Классификация чугунов

карбида ванадия (волокнистой и компактной формы) избыточной фазой становится комплексный карбид $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{V})_7\text{C}_3$ (рис. 5, б). Эвтектические композиции кристаллизуются в интервале температур и имеют переменный состав (см. рис. 3–5).

Установлено, что изменением химического состава и скоростью охлаждения при затверждении можно регулировать тип и морфологию карбидной фазы, изменяя объем карбидных фаз, дендритов первичного аустенита, соотношение двойных и тройных эвтектик с различным расположением металлической основы и упрочняющей фазы, что обуславливает возможность применения отливок из этих сплавов в различных условиях абразивного изнашивания при нормальных и повышенных температурах.

Жаростойкость белых чугунов можно значительно повысить за счет легирования комплексом Cr-Mn-Ni-Ti . Окалиностойкость чугунов находится почти в прямой зависимости от содержания в них хрома. При легировании хромом жаростойкость резко повышается, что связано с образованием на поверхности чугуна прочной и тугоплавкой пленки оксида хрома Cr_2O_3 или оксидов шпинельного типа. Влияние никеля и марганца проявляется в общем улучшении структуры отливок, формировании стабильной аустенитной структуры металлической матрицы. Титан предназначен для модифицирования, обеспечивает чугуну требуемые жаростойкость, жаропрочность за счет стабилизирующего воздействия. При содержании хрома в оксидном слое более 30% формируется сплошная плотная с хорошим сцеплением с основным металлом оксидная пленка, предотвращающая дальнейшее окисление сплава.

В хромистых чугунах обнаружен эффект наследования состава оксидной пленки в зависимости от распределения хрома в поверхностном слое (рис. 6). Частицы карбидов хрома препятствуют росту пленки. Там, где есть карбиды хрома, пленка тоньше. Таким образом, увеличивая плотность хромистой эвтектики и при сохранении достаточной легированности хромом металлической матрицы, можно повысить окалиностойкость белых чугунов.

Проведенные исследования позволяют дать специальную классификацию чугунов по следующим основным признакам: по структуре, по химическому составу, по способу выплавки, по назначению (рис. 7).

По структуре специальные чугуны можно классифицировать по следующим признакам:

- **по типу металлической матрицы**, ферритные, перлитные, бейнитные, аустенитные, перлитно-ферритные, мартенситно-аустенитные, мартенситно-бейнитные, мартенситно-

трооститные, мартенситно-ферритные, ферритно-аустенитные;

- **по типу эвтектики:**

- с эвтектикой ледебурит – А+цементит (Fe_3C);
- с эвтектикой А+карбиды типа M_7C_3 ;
- с эвтектикой А+карбиды типа МС, например: VC, TiC, NbC;
- с эвтектикой А+карбиды типа M_7C_3 и M_{23}C_6 , например: $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$ и $(\text{Fe}, \text{Cr})_{23}\text{C}_6$;
- с эвтектикой А+ M_7C_3 и МС, например: $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$ и VC, и др.;

- **по количеству эвтектик и фаз, образующих ее**, чугуны можно классифицировать на:

- чугуны с одной двойной эвтектикой;
- с двумя двойными эвтектиками (А+ M_3C и А+карбид легирующего элемента);
- с двойной и тройной эвтектиками (А+МС и А+МС+ M_3C ; А+МС и А+МС+ M_7C_3 , А+ M_7C_3 и А+МС+ M_7C_3);
- с двумя двойными и тройной эвтектиками (А+ M_3C , А+ M_7C_3 , А+ M_7C_3 +МС) и др.

- **по морфологии эвтектики:**

- волокнистая (А+VC);
- зернистая (А+VC);
- скелетовидная А+(W, Fe) $_6\text{C}$;
- стержневая (А+ Cr_7C_3);
- пластинчатая А+TiC и др.

По химическому составу специальные чугуны можно разделить на:

- нелегированные, состав которых различается содержанием основных элементов (углерода, кремния, марганца);
- низколегированные, суммарное содержание легирующих элементов не превышает 3,5%;
- среднелегированные, суммарное содержание легирующих элементов находится в пределах 3,5–10%;
- высоколегированные с содержанием легирующих элементов более 10%.

Также в зависимости от химического состава чугуны делятся на доэвтектические, эвтектические и заэвтектические, а по содержанию основного легирующего элемента на хромистые, никелевые, алюминиевые, кремнистые, марганцевые, хромо-марганцевые, хромоникелевые, хромованадиевые, хромоникельмарганцевые, хромомарганцеванадиевые и др.

По способу выплавки чугуны делятся на:

- чугуны, полученные при плавке в вагранке; легированные чугуны в вагранках не выплавляют, редко выплавляют низколегированные;
- чугуны, полученные в электропечах: дуговых и индукционных с кислой и основной футеровкой.

По назначению специальные чугуны делятся на коррозионно-стойкие; жаростойкие; жаропрочные; износостойкие; антифрикционные; валковые и т.п.