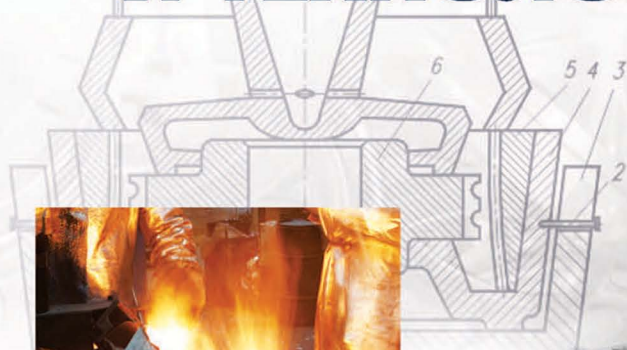




Е. И. МАРУКОВИЧ, М. И. КАРПЕНКО

# ЛИТЕЙНЫЕ СПЛАВЫ И ТЕХНОЛОГИИ



УДК 621.74: 669.131.018

**Марукович, Е. И.** Литейные сплавы и технологии / Е. И. Марукович, М. И. Карпенко. – Минск: Беларус. навука, 2012. – 442 с. – ISBN 978-985-08-1499-9.

В монографии изложены физико-механические и технологические свойства современных литейных конструкционных сплавов, их составы, технологические процессы плавки и внепечной обработки, а также актуальные вопросы теории и практики производства и применения отливок из антифрикционных высокопрочных чугунов с шаровидным, вермикулярным графитом, модифицированных серых чугунов, легированных литейных сталей и износостойких сплавов. Рассмотрены вопросы кристаллизации литейных сплавов и особенности производства отливок специальными способами литья. Дана оценка прогрессивных технологических процессов модифицирования, легирования, литья и термической обработки отливок.

Предназначена для широкого круга инженерно-технических работников машиностроения, металлургии и литейного производства, рекомендуется для студентов и аспирантов технических университетов, конструкторов и научных работников КБ и НИИ.

Табл. Ил. Библиогр.: 113 назв.

**Р е ц е н з е н т ы:**

доктор технических наук Ф. Г. Ловшенко,  
кандидат технических наук А. П. Мельников

**ISBN 978-985-08-1499-9**

© Марукович Е. И., Карпенко М. И., 2012  
© Оформление. РУП «Издательский дом  
«Беларуская навука», 2012

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Литейное производство в XXI в. продолжает оставаться основной заготовительной базой отраслей машино- и станкостроения. Литьем изготавливают изделия очень сложной конфигурации, которые другими видами обработки (ковкой, штамповкой, сваркой) получить затруднительно или невозможно. Стоимость литой детали в большинстве случаев ниже стоимости аналогичной детали, изготовленной другими технологическими процессами. Масса отливки может быть самой различной – от нескольких граммов (детали приборов) до сотен тонн (станины станков).

Современные технологии литья имеют значительное преимущество по сравнению с другими методами получения деталей благодаря возможности варьировать свойства металла и процесс кристаллизации с целью получения в поверхностном слое отливок мелкокристаллической (изотропной) структуры. Одним из возможных и основных направлений повышения качества литейных сплавов является внепечная обработка расплавов, позволяющая осуществлять глубокое рафинирование их от вредных примесей, растворенных газов и неметаллических включений, а также провести операции модифицирования и микролегирования. Это повышает механические, технологические и служебные свойства сплавов в отливках.

Создание конструкционных материалов с высокими характеристиками сопротивления разрушению, усталостной прочности и хорошими технологическими свойствами – очень важная задача. Чем прочнее конструкционный материал, тем в принципе будет легче конструкция. Поэтому на протяжении многих де-

десятилетий ведутся неустанные поиски все более прочных материалов. Имеется немало достижений в разработке высокопрочных традиционных материалов – легированных сталей, сплавов на основе титана, литых композиционных материалов (ЛКМ), алюминиевых, магниевых и других цветных сплавов.

Прочность новых композиционных материалов, сталей и сложнолегированных сплавов достигает 2000...3000 МПа, что больше чем на порядок прочности чистого железа. Некоторые сплавы алюминия прочностью 700...800 МПа превышают в 10...12 раз чистый металл. Алюминиевые сплавы с литием по прочности не уступают стандартным, но легче их на 10...12 %, что позволяет значительно снизить массу конструкций машин и приборов.

Однако многие проблемы выбора и практического использования новых конструкционных литейных сплавов, композиций, эффективных модифицирующих и легирующих добавок для получения высококачественных литых деталей транспортных средств, металлорежущих станков, компрессоров, электростанций, насосов, теплообменников, тракторных, комбайновых и автомобильных двигателей остаются нерешенными, несмотря на многочисленные исследования и разработки по этим литейным материалам и ответственным деталям машин, механизмов, станков и другого оборудования [1, 23, 54, 67, 70].

Для изготовления деталей автомобильных, комбайновых, автобусных и тракторных двигателей, а также других ответственных деталей транспортных средств недостаточно используются высокопрочные чугуны с шаровидным графитом (ВЧШГ), антифрикционные чугуны (АФЧ), автоматные высокопрочные чугуны (АВЧ), чугуны с вермикулярным графитом (ЧВГ) и экономно легированные стали.

## **СОСТАВЫ, КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И ЛИТЕЙНЫХ СПЛАВОВ**

К настоящему времени разработаны новые классы сталей и сплавов с удовлетворительным сочетанием прочности и вязкости разрушения. Особое место среди этих сплавов занимают мартенситностаряющиеся стали (МСС), высокопрочные чугуны с шаровидным графитом (ВЧШГ) и литейные стали (ЛС) с карбонитридным упрочнением (КНУ), которые вследствие особенностей легирования и механизма упрочнения обладают хорошими технологическими свойствами и повышенной по сравнению с углеродистыми сталями равной прочности вязкостью разрушения.

Для изготовления многих ответственных литых деталей двигателей внутреннего сгорания (блоков, гильз и головок блоков цилиндров, коленчатых валов, поршней и поршневых колец), лопастей газовых турбин, рабочих колес и направляющих насосов, валков прокатных станов, механизмов трения, корпусных деталей металлорежущих станков, уплотнительных колец турбокомпрессоров, ступиц колес транспортных средств и т. д. используются многие литейные конструкционные сплавы и освоены современные технологические процессы литья.

Рост мощности бензиновых двигателей и значительное увеличение объемов производства дизелей требуют увеличения объемов производства более надежных и долговечных литых деталей моторной группы, использования для их производства не только серых чугунов (СЧ) повышенной прочности, но и ВЧШГ, чугунов с вермикулярным графитом (ЧВГ), низколегированных антифрикционных чугунов (АФЧ) и других новых конструкционных материалов, а также оптимизации металлур-

гических операций, параметров и режимов процессов плавки, выпечной обработки, литья и термической обработки отливок и более широкого внедрения специальных способов литья с интенсивным теплообменом (ССЛИТ).

Наибольшее распространение из мартенситностареющих сплавов в промышленности получили Fe–Ni–Co–Mo–Ti- и Fe–Ni–Mo–Mn–Al-стали. Снижение в МСС содержания углерода эффективно повышает их пластичность. Значительный вклад в достигаемые физико-механические свойства этих сталей, особенно пластичность, и в надежность и долговечность литых деталей, вносит содержание технологических примесей. Важным является получение минимальной загрязненности межзеренных границ различными примесями.

Для обеспечения наивысшей пластичности МСС необходимо обеспечить минимальное снижение пластичности закаленного железа за счет всех снижающих ее уровень факторов и максимальный рост значений пластичности за счет влияния остаточного аустенита. Опыт использования МСС показал, что, несмотря на высокую стоимость таких сталей, их применение в различных отраслях техники позволяет получить значительный экономический эффект.

### **1.1. Составы и свойства стандартных конструкционных литейных сплавов**

Металлические сплавы продолжают оставаться основными конструкционными материалами для производства ответственных литых деталей машин, механизмов, приборов и различных агрегатов и станков. Наиболее широкое применение получили железоуглеродистые сплавы. Для производства отливок значительный объем занимают также алюминиевые, медные, цинковые, магниевые, никелевые, титановые, хромоникелевые и марганцевые сплавы.

К основным литейным железоуглеродистым сплавам, широко используемым в литейных цехах, относятся конструкционные чугуны, содержащие от 2 до 4 % углерода, и литейные

стали, содержащие от 0,1 до 0,65 % углерода. Железоуглеродистые расплавы обладают комплексом свойств, с одной стороны, сходных со свойствами неметаллических жидкостей, а с другой – со свойствами твердых металлов. В зависимости от скорости кристаллизации расплавов и их химического состава в литейных цехах получают отливки с различными физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

В состав литейных углеродистых сталей и чугуна кроме железа и углерода обычно входят постоянные примеси: кремний, марганец, фосфор и сера. Основное влияние на свойства чугуна оказывает суммарное содержание С и Si. В зависимости от количества перечисленных элементов и структуры сплава различают чугуны серые, высокопрочные, износостойкие, ковкие и др.

Важной задачей при производстве отливок из углеродистых сталей, модифицированных СЧ и ЧВГ, низколегированных АФЧ и ВЧШГ, является снижение содержания технологических примесей (серы и фосфора). Для исключения протекания реакции образования сульфидов марганца произведение концентраций серы и марганца в расплавах не должно превышать  $5...6 \cdot 10^{-3} \%$ . Для исключения образования сульфидов марганца на всем протяжении затвердевания дендритной ячейки (при содержании около 0,03 % S) концентрация марганца в конструкционной углеродистой стали не должна превышать 0,5...0,9 % (в зависимости от состава стали по другим элементам).

В машиностроении наиболее распространенными литейными конструкционными материалами продолжают оставаться чугуны и сплавы на основе системы Al–Si. Эти группы литейных сплавов обладают многими положительными качествами, но также имеют существенные недостатки, снижающие эксплуатационные возможности. В частности, это высокая плотность чугунов и низкая температура плавления силуминов. Поэтому в последнее время повысился интерес в производстве отливок из алюминиевых конструкционных чугунов.

Одной из важнейших проблем литейного производства является получение плотных отливок с чистой поверхностью и размерами, максимально приближенными к готовым изделиям.

Решение этой проблемы в значительной степени зависит от выбора и подготовки литейного сплава оптимального состава [61–66] и способа литья с учетом новых технологических принципов получения отливок [90–95, 100], интенсификации и регулирования процессов в литейных формах [98] и использования эффективных противопопригарных покрытий для литейных форм. Последние должны создавать изолирующий слой между заливаемым металлом и поверхностью формы, препятствующий проникновению расплава в поры смеси и химическому взаимодействию металла и его оксидов с материалом литейной формы.

**Литейные стали (ЛС).** Для изготовления ведущих и направляющих колес, валков, шестерен, опорных катков, втулок и корпусных деталей ответственного назначения, работающих при средних удельных давлениях, знакопеременных нагрузках и подвергающихся сильному износу, используются конструкционные литейные среднеуглеродистые стали (табл. 1.1), содержащие от 0,3 до 0,65 % С, имеющие хорошую жидкотекучесть, но ограниченную свариваемость. Эти ЛС применяют в нормализованном и улучшенном состоянии и после поверхностного упрочнения с нагревом током высокой частоты (т. в. ч.).

*Таблица 1.1. Назначение и особенности использования ЛС для отливок*

Марка	Назначение и свойства	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>
30Л, 35Л	Ступицы задних и ведущих колес автомобилей, обоймы и корпусы турбин, рычагов сцепления, маховиков, катков, тяг, кронштейнов, колес, вилок, картеров, цилиндров, диафрагм, балансиоров, ступиц ведущих колес в тракторах, станины прокатных станков и металлорежущих станков и другие фасонные детали, работающие при средних статических и динамических нагрузках; детали сварно-литых конструкций	34...40
40Л, 45Л	Станины, корпуса, детали бурильных труб, лебедок, втулки компрессоров, муфты, тормозные диски, шестерни, зубчатые венцы, ведущие и направляющие колеса, кожухи, опорные катки, чашки сателлитов, рычаги, вилки, катки, звездочки и другие детали ответственного назначения, работающие при средних удельных давлениях и скоростях и подвергающиеся сильному износу. Стяжные кольца плавающих головок подогревателей и теплообменников, работающие при температурах от 30 до 450 °С под давлением	29...35



Марка	Назначение и свойства	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>
50Л, 55Л	Шестерни, зубчатые муфты подъемно-транспортных машин, бегунки, колеса, зубчатые венцы, ходовые колеса, валки крупно-, средне- и мелкосортных станов для прокатки мягкого металла	24...30

Формирование структуры и свойств отливок из конструкционных ЛС уже начинается на начальной стадии подготовки жидкого расплава [70]. С повышением содержания углерода повышаются прочность и твердость, но снижаются упругопластические свойства. Жидкотекучесть конструкционных нелегированных сталей 35Л, 40Л, 45Л, 50Л и 55Л значительно выше, чем низколегированных сталей 40ХЛ, 45ФЛ, 35ХМЛ, 20ФЛ и 35ХМЛ и низкоуглеродистых ЛС (15Л, 20Л и 25Л). Они предназначены для производства фасонных деталей, получаемых отливкой в песчано-глинистые, оболочковые, сухие жидкостекольные формы или из холоднотвердеющих смесей (ХТС), а также методами точного литья. Из среднеуглеродистых ЛС отливают шатуны двигателей многих автомобилей с их последующей термической обработкой (улучшением).

Для изготовления ходовых колес диаметром до 1000 мм мостовых кранов большой грузоподъемностью часто используется углеродистая литейная сталь 70Л. Сталь применяют после улучшения и поверхностного упрочнения с нагревом т. в. ч.

На сопротивление разрушению литой стали литых деталей действуют те же факторы, что и в случае деформирования. Однако эксплуатационная надежность литых деталей в большей степени зависит от технологии их производства. Литая сталь отличается от деформированной более сильной исходной поврежденностью в виде микропор, раковин и трещин. Она имеет более крупное первичное зерно, и его измельчение представляет более сложную задачу.

Поворотные и рулевые рычаги, кронштейны, поворотные кулаки, полуоси, детали шасси автотранспортных средств, подвергающихся знакопеременным нагрузкам, изготавливаются

из низколегированных ЛС с повышенными характеристиками усталостной прочности. Они должны иметь по всему сечению сорбитную или троостосорбитную структуру без включений феррита.

**Стандартные стали для отливок со специальными свойствами.** Для придания литым деталям особых свойств, например повышенной коррозионной стойкости, термической стойкости, износостойкости, жаропрочности, кислотоупорности и т. п., в ЛС вводят специальные легирующие элементы: хром, никель, титан, алюминий, медь, молибден, ванадий и др. Средний химический состав высоколегированных коррозионно-стойких сталей (по ГОСТ 2176) приведен в табл. 1.2.

Таблица 1.2. Химические составы коррозионно-стойких высоколегированных ЛС

Марка стали	Содержание компонентов, мас. % (остальное – железо)							
	структура	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	другие элементы
<i>Хромистые</i>								
20X13Л	М	0,2	0,5	0,6	13	–	–	–
12X18ТЛ	Ф	0,1	0,5	0,6	18	–	–	0,6 Ti
15X25ТЛ	Ф	0,15	0,8	0,6	25	–	–	0,6 Ti
<i>Хромоникелевые</i>								
12X18Н9ТЛ	А	0,12	0,6	1,5	18	9	–	0,8 Ti
12X18Н12МЗТЛ	А	0,12	0,6	1,5	18	12	3,5	0,8 Ti
18X25Н19СГЛ	А	0,18	1,4	1,1	25	19	0,2	0,4 W
40X24Н12СЛ	А-Ф	0,4	1,0	0,5	24	12	–	0,2 Ti
<i>Хромоникелевые</i>								
10X14НДЛ	М	0,1	0,3	0,4	14	1,4	–	1,40 Cu
09X16Н4БЛ	М	0,09	0,4	0,4	16	4,0	–	0,1 Nb

Хромоникелевые коррозионно-стойкие стали аустенитного класса с содержанием более 8...10 мас. % никеля при 0,1 мас. % углерода и примерно 18 мас. % хрома обеспечивают получение стабильной структуры. Выделение карбидов  $Cr_7C_3$ ,  $Cr_{23}C_6$  или  $Cr_4C$  в процессе эксплуатации или при сварке приводит к резкому снижению пластичности, а также уменьшает коррозионную стойкость, так как часть хрома выводится из твердого раствора.

Повышенной коррозионной стойкостью в воде, влажном паре, слабых органических кислотах обладает литейная сталь мартенситно-ферритного класса марки 08X12H4ГСМЛ. Для изготовления литых деталей, работающих в морской воде, используют также хромоникелевые коррозионно-стойкие стали с мартенситной структурой, в частности литейную сталь марки 08X14НДЛ.

Среди многочисленных легированных конструкционных сталей, применяемых для производства ответственных фасонных отливок, высокомарганцевая износостойкая сталь 110Г13Л занимает особое место и является самой распространенной легированной сталью для износостойких отливок. Сталь 110Г13Л обладает хорошей жидкотекучестью. Линейная усадка ее 2,5...3,5 %. Сталь имеет повышенную склонность к образованию различных литейных дефектов (трещины, рыхлоты и транс-кристаллическая структура). Очень плохо обрабатывается резанием.

**Стали для хладостойких отливок (ХС).** Хладостойкость сталей обеспечивается, если при температурах эксплуатации разрушение развивается по вязкому механизму, который на микроскопическом уровне осуществляется путем роста и коалесценции микропустот, зарождающихся на неметаллических включениях. В первом приближении энергоемкость разрушения тем выше, чем больше расстояние между неметаллическими включениями, способными (по своим размерам) служить центрами зарождения пор [78]. Низкоуглеродистые низколегированные ЛС (12ХГФЛ, 14Х2ГМРЛ, 20ГЛ, 20ФГЛ, 30ГЛ и др.) являются основным конструкционным материалом для изготовления механизмов, машин и конструкций, работающих при низких температурах. Стали для этих условий должны обеспечивать необходимую прочность в сочетании с высокой вязкостью и пластичностью, обладать малой чувствительностью к концентраторам напряжений и низкой склонностью к хрупкому разрушению.

Загрязненность литейных хладостойких сталей неметаллическими включениями является одним из важных факторов, определяющих их сопротивляемость хрупкому разрушению.

**Жаропрочные и жаростойкие стали.** В машиностроении жаропрочные нержавеющие стали применяются для сопловых и рабочих лопаток газотурбинных двигателей, рабочих колес турбокомпрессоров, деталей печной арматуры, установок для автомобильной, газовой, нефтяной и химической промышленности и других литых деталей, длительно работающих при температуре до 800...900 °С. Эти стали обладают вполне удовлетворительными литейными свойствами при условии вакуумной плавки и заливки в сухие жидкостекольные и оболочковые подогретые формы. Химические составы жаропрочных и жаростойких литейных сталей (по ГОСТ 977) приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3. Химические составы жаропрочных и жаростойких ЛС

Марка стали	Содержание компонентов, мас. % (остальное железо)							
	структура	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	другие элементы
<i>Комплексно-легированные жаропрочные стали</i>								
15X18H22B6M2PЛ	A	0,15	0,4	0,5	18	22	2,5	6W, 0,01B,
08X17H34B52PЛ	A	0,08	0,3	0,5	17	34	–	5W
<i>Хромоникелевые жаропрочные стали</i>								
15X23H18Л	A	0,15	0,8	1,5	23	18	–	0,2 Ti,
31X19H9MB7Л	A	0,30	0,7	1,2	19	9	1,2	1W, 0,3 Ti, 0,3Nb
35X18H24C2Л	A	0,35	2,5	1,2	18	24	–	-
12X18H12M3ТЛ	A	0,12	0,7	1,5	18	12	3,5	0,5Ti
<i>Высокохромистые жаростойкие стали</i>								
20X8ВЛ	M	0,2	0,5	0,5	8,5	–	–	1,5W
40X9C2Л	M	0,4	2,5	0,7	9,0	–	–	–
15X25ТЛ	Ф	0,15	1,2	1,5	25	–	–	0,5Ti

Клапаны моторов, крепежные детали, колосники и детали арматуры, работающие под нагрузкой при температурах до 700 °С, изготавливают из жаростойкой стали 40X9C2Л.

Хромоникелевая жаропрочная сталь 35X18H24C2Л используется для изготовления деталей, работающих при температурах до 1100...1200 °С в сильно нагруженном состоянии (печные конвейеры, крепежные детали, шнеки, детали энергоустановок).

Временное сопротивление при растяжении этой стали достигает свыше 800 МПа при относительном удлинении не менее 3 %.

Детали из ферритной высокохромистой жаростойкой до 1100 °С стали 15X25ТЛ имеют высокий предел текучести (более 275 МПа) и повышенные эксплуатационные свойства при использовании в аппаратах химической промышленности.

**Серые чугуны (СЧ)** являются Fe–C–Si-сплавами с пластинчатым графитом, в которых при затвердевании углерод выделился в свободном состоянии в виде прямолинейных или более или менее искривленных (завихренных) пластинок графита, придающих излому серый оттенок. Этот конструкционный материал получил наиболее широкое применение в станко- и машиностроении. Чугун со значительным выделением графитовых включений прямолинейной формы (феррито-графитовый) имеет низкие механические свойства. Лучшими свойствами обладают чугуны, в которых меньше графитовых включений и форма их не прямолинейная, а шаровидная, завихренная или компактная; при этом металлическая основа перлитная, бейнитная или феррито-перлитная.

Образование первичной литой структуры в отливках из чугуна, которой принадлежит решающее значение в процессах формирования физико-механических свойств в отливках [14], прежде всего связано с процессами первичной кристаллизации и его химическим составом. Затвердевание стандартных расплавов чугуна может протекать как с выделением избыточных кристаллов твердого раствора аустенита (феррита), так и с образованием высокоуглеродистых фаз цементита, графита и карбидов.

В многокомпонентных расплавах, пересыщенных углеродом, формирование включений графита происходит в условиях значительного переохлаждения. Развитие графитных включений при эвтектической кристаллизации происходит в окружении аустенита, и получение равноосной и компактной формы включений эвтектического графита в основном связано с протеканием диффузионных процессов и определяется наличием в расплаве модифицирующих затравок и примесных элементов.

В качестве комплексной характеристики многокомпонентного химического состава СЧ, ВЧШГ, ЧВГ, АФЧ и ковких чугу-

нов (КЧ) наибольшее распространение получила степень эвтектичности (Sэ), которой многие исследователи придают определяющую роль. Однако объективное представление о структуре чугуна может быть получено только при совместном рассмотрении всех процессов ее формирования, прежде всего кристаллизации и перекристаллизации. Поэтому для производства высококачественных чугунов важен контроль не только химического состава, но и количественного соотношения первичного аустенита, графита, эвтектики, неметаллических включений и примесей, так как именно эти параметры позволяют установить оптимальные соотношения между составом, структурой и свойствами.

**Чугуны легированные со специальными свойствами.** Эти чугуны подразделяются на виды и марки по преобладанию легирования (алюминиевые, кремнистые, марганцевые, никелевые и хромистые) и по назначению (жаростойкие, износостойкие, коррозионно-стойкие, маломанитные и другие в соответствии с ГОСТ 7769). Кремнистые чугуны применяют главным образом как окалино-, росто- и коррозионно-стойкие материалы, а алюминиевые – как жаростойкие и износостойкие. Среди легированных чугунов высокой жаропрочностью отличаются высокохромистые и никелевые маломанитные чугуны марок ЧН19Х3Ш и ЧН20Д2Ш. Маломанитным марганцевым чугуном является ЧГ8Д3, а стандартный немагнитный высокомарганцевый чугун с повышенной коррозионной стойкостью содержит следующие легирующие элементы: 8...12 % марганца, 1,5...2,0 % меди и 0,1...0,7 % алюминия. Для износостойких литых деталей, работающих в условиях коррозионно-механического износа, разработан немагнитный высокомарганцевый (9,5 – 17,8 % Mn) чугун, содержащий дополнительно Mo, В, Ti и N, с коррозионной стойкостью от 21 до 29 мг/м<sup>2</sup> · ч [51].

Коррозионно-стойкие в газовых средах детали двигателей внутреннего сгорания, а также коленчатые валы и втулки форсированных дизелей типа 10Д100, Д49, 14Д40, 11Д45 и другие часто отливают из сложнелегированных Cr–Ni–Mo–Cu-чугунов марок ЧХНМД и ЧНДХМШ. Повышенное содержание дорогих и дефицитных металлов в коррозионно-стойких чугунах приво-

дит к значительному увеличению эксплуатационной стойкости двигателей, но и к удорожанию коленчатых валов, блоков, головок блоков, втулок и других деталей цилиндров.

**Износостойкие чугуны (ИЧ).** Более прочными, износостойкими и долговечными литейными конструкционными материалами для получения ответственных литых деталей, чем СЧ, являются износостойкие чугуны, рекомендованные ГОСТ 7769 для работы в условиях интенсивного трения и износа. Широко используются стандартные низколегированные чугуны марок ЧНХТ, ЧН2Х, ЧХЗТ, ЧНХМД, ЧНМШ и другие ИЧ, а также белые высокохромистые, марганцевые и хромоникелевые чугуны. В 2008 г. с участием сотрудников БелНИИЛит и ИТР Бобруйского машиностроительного завода разработан проект ТУ на новый износостойкий сплав (высокохромистый чугун ЧХ22Г) для насосного оборудования. Раньше на Бобруйском машиностроительном заводе для литых деталей грунтовых насосов использовали только чугун марки ЧХ28Н2.

**Антифрикционные чугуны (АФЧ).** Антифрикционные свойства являются комплексными, так как учитывают износостойкость, прирабатываемость, коэффициент трения, износ сопряженной детали и прочие физико-механические и технологические характеристики. Антифрикционные свойства для ряда легированных серых и высокопрочных чугунов весьма высокие, а в некоторых случаях могут быть лучше, чем у бронз [14], традиционно используемых для изготовления деталей механизмов трения. Для массового производства литых заготовок гильз и втулок цилиндров, поршневых колец и других деталей автотракторных и комбайновых двигателей необходимо более широко применять низколегированные серые и АФЧ для отливок (по ГОСТ 1585–85). Этот ГОСТ для АФЧ регламентирует не механические свойства, а химический состав по легирующим элементам и микроструктуру.

Легирование Cr, Ni, Mo и Cu влияет на дисперсность перлита и графитовых включений, чем определяется достаточно высокая статическая, циклическая прочность и эксплуатационная стойкость легированных серых и высокопрочных АФЧ.

Повышенными антифрикционными свойствами в отливках и относительно низким коэффициентом трения обладают высокопрочные чугуны АЧВ-1 и АЧВ-2 с шаровидным графитом и ковкие чугуны АЧК-1 и АЧК-2 с хлопьевидным графитом.

**Фрикционные чугуны (ФЧ).** Эти чугуны используются для изготовления деталей различных тормозных устройств. Значительный объем отливок из ФЧ занимают тормозные барабаны, тормозные колодки и фрикционные накладки. Для их изготовления часто используют СЧ с повышенным содержанием фосфора. В отличие от АФЧ, обладающих низким коэффициентом трения, и других серых и высокопрочных чугунов фрикционный чугун должен обеспечивать литым деталям высокий коэффициент трения.

Особенности кристаллизации ФЧ, их физико-механические и технологические свойства изучены недостаточно. Кроме того, на ФЧ не разработан межгосударственный стандарт и отсутствуют технические условия на их химические составы, марки, механические свойства, технические требования по изготовлению и методам испытания и приемки.

**Стандартные составы и свойства сплавов цветных металлов.** Среди сплавов цветных металлов наибольшее применение в технике получили алюминиевые сплавы. К отливкам из алюминиевых сплавов предъявляются разнообразные требования по прочности, герметичности, коррозионной стойкости и т. д., поэтому в производственных условиях встречается большое разнообразие литейных алюминиевых сплавов. В 1985–1990 гг. для нужд народного хозяйства использовалось около 30 марок алюминиевых сплавов, а ГОСТ 2685 уже предусматривал 36 различных марок литейных алюминиевых сплавов.

В машиностроении из алюминиевых конструкционных сплавов с использованием специальных способов литья получают отливки как простой, так и сложной конфигурации со стенками толщиной от 2,5 мм и выше.

**Сплавы алюминиевые литейные (САЛ).** Для изготовления отливок для нужд народного хозяйства и экспорта в соответствии с межгосударственным стандартом (ГОСТ 1583) используют пять основных групп САЛ: 1) на основе системы алюминий–



кремний–магний; 2) алюминий–кремний–медь; 3) алюминий–медь; 4) алюминий–магний; 5) алюминий–прочие элементы (сложнолегированные сплавы на основе алюминия).

Литейный сплав алюминия с кремнием (силумин) марки АЛ2, содержащий 10...13 % Si, является двойным доэвтектическим сплавом в системе Al–Si с хорошими литейными свойствами и наиболее узким интервалом кристаллизации. При литье в кокиль и под давлением в отливках без термообработки временное сопротивление разрыву составляет более 157 МПа, а твердость – не менее 50 НВ.

Другие часто используемые сплавы первой группы (АЛ4, АК7, АК9, АЛ9, АК10Су и др.) также отличаются хорошими литейными свойствами – незначительной усадкой и большой жидкотекучестью, но имеют небольшую механическую прочность в сравнении со сплавами других групп. Силумины относятся к относительно дешевым конструкционным материалам и получили широкое применение в автотракторной и других отраслях промышленности. Добавка в эти сплавы магния, меди, марганца, титана, бериллия, циркония и других элементов повышает их прочность. Присутствие железа в доэвтектических силуминах понижает их пластичность, образуя с компонентами сплава тройную промежуточную фазу, кристаллизующуюся в форме грубых иглообразных выделений.

Сплавы алюминия с медью (ВАЛ10, АЛ19) и системы Al + Si + Cu (ВАЛ8, АК5М4, АК8М3 и др.) значительно уступают по своим литейным свойствам сплавам Al + Si + Mg. Они обладают меньшей жидкотекучестью и большей склонностью к трещинам. САЛ с медью и магнием отличаются высокой коррозионной стойкостью и прочностью, но обладают недостаточными характеристиками трещиностойкости и литейных свойств. При кристаллизации их дополнительно микролегируют цирконием (0,3 %) и используют для изготовления литых деталей, несущих большие вибрационные нагрузки. Эти сплавы подвергают упрочняющей термической обработке.

Модифицирование САЛ барием, кальцием и натрием позволяет получить более равномерную, мелкозернистую и частично

сфероидизированную структуру металла с повышенными физико-механическими свойствами. Перед модифицированием сплавы нагревают до 800...820 °С и засыпают на его поверхность смесь обезвоженных солей – 67 % NaF + 33 % NaCl (в количестве до 2 % от массы металла). Под слоем флюсов сплав выдерживают 12...14 мин. Модифицированный сплав сохраняет свои свойства в течение короткого времени (10...12 мин), поэтому его надо быстро разлить в формы. В связи с этим модифицирование не рекомендуется проводить в больших печах. Обычно в производственных условиях сплав, полученный из большой печи, разливают в специальные тигли, модифицируют в них и разливают в литейные формы.

Сложные САЛ с тугоплавкими металлами отличаются от обычных по составу и микроструктуре. Они имеют повышенную жаростойкость и удовлетворительную жидкотекучесть. Для плавки сложных алюминиевых сплавов с тугоплавкими металлами используют комплексные способы плавки, которые сочетают несколько операций рафинирования, микролегирования и доводки расплава перед заливкой литейных форм.

Для повышения качества и физико-механических свойств отливок из САЛ используют следующие виды термической обработки (ТО): Т1 – искусственное старение без предварительной закалки; Т2 – отжиг; Т4 – закалка; Т5 – закалка и кратковременное (неполное) искусственное старение; Т6 – закалка и полное искусственное старение; Т7 – закалка и стабилизирующий отпуск; Т8 – закалка и смягчающий отпуск.

В алюминиевых сплавах, предназначенных для изготовления изделий пищевого назначения, массовая доля свинца должна быть не более 0,15 %, цинка – не более 0,3, мышьяка – не более 0,015 и бериллия – не более 0,0005 %. Обычно для изготовления изделий пищевого назначения используют силумин АЛ2 с 10...13 % кремния, сплавы АК7 и АК9 с содержанием 0,2...0,4 магния и сплав АК5М2, содержащий 1,5...3,5 % меди и от 0,2 до 0,8 % магния.

**Медные сплавы (МС).** Для изготовления фасонных отливок используют четыре группы МС: 1) сплавы на основе меди с цин-

ком; 2) оловянные литейные бронзы; 3) безоловянные литейные бронзы и 4) медно-никелевые и другие специальные сплавы, легированные Ni. При заливке литейных форм они отличаются значительной усадкой и легко окисляются с образованием на поверхности пленки оксидов. Поэтому во избежание спаев и неслитин должно быть обеспечено плавное заполнение литниковой системы и хорошее питание отливок.

При литье деталей из МС часто в форме располагают большое количество отливок, соединенных питателями с одним стояком. Такой подвод металла должен обеспечивать заполнение всех отливок так, чтобы не было «отсоса» металла (из-за большой усадки).

Для отливок из оловянной бронзы и латуни применяют различный подвод питателей (снизу, сверху и сбоку). Для алюминиевой бронзы металл чаще подводят в нижнюю часть отливки с учетом сильной окисляемости и увеличенной усадки этого сплава. Практикуют также устройство зигзагообразного или ступенчатого стояка, который обеспечивает более плавный подвод металла.

Для лучшего питания на отливке устанавливают массивные прибыли и питающие выпоры, осуществляя подвод металла в массивную часть отливки.

**Сплавы медно-цинковые литейные (латуни).** Латуни разделяются на простые и сложные (специальные). Для производства фасонного литья применяют только сложные латуни, в которых кроме меди и цинка содержится в определенных количествах алюминий, кремний, марганец, свинец, олово и в соответствии с ГОСТ 17711 различают латуни алюминиевые ЛЦ30А3; кремнистые ЛЦ16К4, свинцовые ЛЦ40С, алюминиево-железо-марганцевые ЛЦ25А6Ж3Мц2, кремнисто-свинцовые ЛЦ14К3С3 и др.

Марганец, кремний, алюминий повышают механические свойства латуней в отливках. Марганцевые и кремнистые латуни марок ЛЦ40Мц1,5 и ЛЦ16К4, обладают повышенными характеристиками упругопластических свойств ( $\delta$  не менее 20 и 15 % соответственно) и твердости в отливках (более 100 НВ).

Добавка в кремнистую латунь свинца придает сплаву хорошие антифрикционные свойства. Из кремнистой латуни изготов-

ливают отливки для арматуры и судовых деталей, работающих в морской воде, а из кремнисто-свинцовой латуни ЛЦ14К3С3 – подшипники, втулки, сальники, угольники для автомобилей. Свинцовую латунь ЛЦ25С2 используют для изготовления штуцеров гидросистем автомобилей. При дополнительном легировании ее оловом в количестве 1..4 % снижаются твердость и другие механические свойства.

Марганцовые латуни и алюминиево-железо-марганцевая латунь марки ЛЦ25А6Ж3Мц2 имеют высокие механические свойства ( $\sigma_b$  составляет от 370 до 700 МПа), значительную коррозионную стойкость и сохраняют прочность при повышенных температурах. Из марганцевой латуни изготавливают литые детали, работающие с большой нагрузкой: массивные червячные винты, венцы червячных колес, гайки нажимных винтов прокатных станов и т. п.

Крупным производителем отливок из латуней в Беларуси для предприятий автотракторной промышленности является ПЧУП «Випра» (г. Гомель). Производственная мощность литейного цеха предприятия – 3000 т/год. Литейный цех освоил изготовление большой номенклатуры корпусов вентилялей, редукторов и газовых кранов многих наименований, используя машины литья под давлением моделей 1А106, 1А107 и 1А108. Для плавки латуней используются индукционные плавильно-раздаточные печи, которые заменили менее производительные печи сопротивления.

**Оловянные литейные бронзы.** Оловянные литейные бронзы обладают повышенными антифрикционными свойствами. В химическом машиностроении и судостроении для антифрикционных деталей используют бронзы БрО3Ц7С5Н1 и БрО10Ц2, а в общем и автотракторном машиностроении – оловянные литейные бронзы БрО5Ц5С5 и БрО4Ц4С17. Оловянные литейные бронзы БрО3Ц7С5Н1 и БрО4Ц4С17 получили значительное применение при изготовлении червячных винтов, втулок, арматуры и антифрикционных деталей.

В литейных бронзах БрО3Ц7С5, БрО10Ф1 и БрО10Ц2 примеси железа и марганца в количестве от 0,02 до 0,35 % способствуют

получению более мелкозернистой структуры и стабильности коэффициента трения и износостойкости. Железо и марганец концентрируются в основном в матрице сплава, способствуя кристаллизации отливок с образованием равноосных зерен и обладают низкой ликвирующей способностью в медно-оловянных сплавах.

Составы и свойства ряда литейных медных сплавов, используемых для изготовления антифрикционных отливок, приведены в табл. 1.4. Эти сплавы превосходят другие медные сплавы по антифрикционным свойствам, прочности, твердости и устойчивости против окисления при нормальной и повышенной температурах.

*Таблица 1.4. Химические составы и свойства медных сплавов*

Марка сплава	Химический состав сплава, %					Механические свойства	
	Cu	Sn	Zn	Pb	прочие элементы	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %
ЛЦ23А6ЖЗМц2	64...68	—	17,5...26	0,5...1	0,02...0,15 Ni; 2,0...4 Fe; 1,5...2,5 Mn; 6...7Al	600...650	5...8
БрО3Ц7С5	80...88	2,5...4	6...9,5	3...6	До 0,4 Fe ; 0,01...0,1Al; 0,1...0,5 Ni;	180...280	5...9
БрО4Ц4С17	71...76	3,5...5	3,5...4,5	16...18	0,1...0,5 Ni; 0,2...0,4 Fe; до 0,4 Mn; до 0,1Al	170...250	9...15
МН20А8Мц2Ж	66...68	—	0,1...0,5	—	1,7...2,3 Mn; 0,03 Mg; 18...22 Ni; 0,9...1,15 Fe; 7...9Al	650...700	3...5

Из оловянной бронзы марки БрО10Ф1 отливают венцы червячных передач ответственного назначения, нажимные гайки и другие детали узлов трения с повышенным сопротивлением износу.

**Безоловянные литейные бронзы.** Наиболее часто применяют алюминиевые бронзы, имеющие хорошую прочность, высо-

кую коррозионную в морской воде и кавитационную стойкость. Алюминиевые бронзы (БрА9Мц2, БрА9Ж3) и другие безоловянные литейные бронзы по своим механическим, коррозионным и антифрикционным свойствам не уступают оловянным литейным бронзам. Алюминиевые бронзы применяют для изготовления тяжело нагруженных шестерен, гребных винтов и корпусов насосов.

Для изготовления ответственных зубчатых колес и деталей, работающих в условиях интенсивного коррозионно-механического изнашивания, применяют бериллиевые (БрБ2,5 и БрБ2НТ) и кремнистые бронзы.

**Высокопрочные медно-никелевые сплавы.** Эти сплавы превосходят другие медные сплавы по антифрикционным свойствам, прочности, твердости и устойчивости против окисления при нормальной и повышенной температурах. Медно-никелевые сплавы, содержащие в качестве легирующих компонентов только никель и марганец, имеют недостаточную жидкотекучесть.

Медно-никелевый сплав МН20А8Мц2Ж, состав и механические свойства которого приведены в табл. 1.4, используется для изготовления термостойких отливок, шестерен и арматуры. Высокие механические свойства получены в антифрикционных отливках из медно-никелевых сплавов, содержащих 18...30 % никеля, 6...9 % алюминия и 1,7...2,5 % марганца.

Медь и никель при плавке загружаются вместе и расплавляются под слоем флюса из плавикового шпата и извести. Раскисление медно-никелевых сплавов производится кальцием, марганцем и магнием в количестве 0,3...0,6 % от массы сплава. При плавке сплавов с 15...30 % никеля для раскисления используется фосфористая медь. Перед выдачей расплава из печи берется проба для определения микроструктуры и раскисленности сплава. Если она дает неудовлетворительный излом, операция по раскислению повторяется.

**Магниевые литейные сплавы (МЛС).** Сплавы магния с кремнием, марганцем, алюминием, цинком и некоторыми другими элементами широко применяются в приборостроительной, авиационной и других отраслях машиностроения.

Сплавы МЛ5 и МЛ6, обладая хорошими литейными свойствами, используются для изготовления деталей с заливкой в песчаные и металлические формы. Эти сплавы подвергаются упрочняющей термической обработке – длительному отжигу (гомогенизации) и старению, благодаря чему предел их прочности при растяжении значительно возрастает.

При плавке и разливке МЛС необходимо предохранять расплавы от попадания влаги, тщательно просушивать разливочные ковши, а при производстве отливок – учитывать технологические особенности приготовления формовочных смесей и литейных форм. При изготовлении литейных форм для магниевых сплавов в формовочные смеси добавляют 0,25...1,0 % борной кислоты и 0,25...3,0 % серы в порошок (или 6...10 % фтористых присадок). Добавки серы и борной кислоты предохраняют магний от окисления и соединения с водой, находящейся в формовочной смеси (что может вызвать взрыв). При заполнении формы металлом сера сгорает, образуя между металлом и землей защитный слой сернистого газа и паров серы. При сушке форм и стержней и при нагреве металла во время заливки борная кислота на поверхности формы и стержней образует глазурь, изолирующую сплав от влаги формовочной смеси.

Рафинирование производят в тиглях, куда сплав разливают из печей. Тигли устанавливают в электрические горны. При температуре 710 °С удельный вес флюса становится большим, чем сплава, поэтому флюс начинает опускаться вниз, захватывая все неметаллические включения и осаждая их на дно тигля. В конце рафинирования на поверхность металла засыпают новый слой флюса, нагревают сплав до 880...900 °С и модифицируют с выдержкой 10...20 мин. Заливают сплавы при температурах 700...800 °С.

**Цинковые литейные сплавы (ЦЛС).** Сплавы цинка с алюминием и медью широко применяются как заменители оловянных бронз для изготовления различных деталей, работающих в условиях трения (штулки, вкладыши). Для этих деталей наиболее часто применяют методы литья в металлические формы и сплав ЦАМ10-5, в котором содержатся в среднем 10 % алю-

миния и 5 % меди, остальное – цинк. Для литья под давлением применяют ЦЛС, содержащие 3,5...5,0 % алюминия и 0,6...4 % меди, остальное – цинк.

Главные преимущества цинковых сплавов: хорошие литейные свойства, низкая температура плавления, легкоплавкость и сравнительно низкая стоимость.

**Титановые литейные сплавы (ТЛС).** Титановые сплавы – высококачественные конструкционные материалы; обладают высокой удельной прочностью, коррозионной стойкостью, удовлетворительными технологическими свойствами: подвергаются литью, обработке давлением, сварке и механической обработке. Недостатки титановых сплавов: высокая температура плавления, химическое взаимодействие с большинством материалов и окисляемость при нагреве.

Известно [100], что большим препятствием на пути широкого внедрения литья из ТЛС является отсутствие достаточно стабильной технологии получения химически инертных литейных форм. Одним из известных материалов, который не взаимодействует с расплавленным титаном и его сплавами, является молибден, но его использование ограничивается высокой стоимостью. Некоторое применение для изготовления литейных форм получил графит, но он имеет высокую химическую активность и загрязняет поверхность отливок.

Титановые сплавы используют для производства отливок в ракетостроении, электротехнической, химической, металлургической промышленности, в ядерной технике и др. В машиностроении применяют отливки из ТЛС, содержащих Al, Cr и другие легирующие элементы.

Сплав ВТЗ-1 (4...6,2 % Al; 1,5...2,5 % Cr; остальное – Ti) имеет при 20 °С предел прочности при растяжении 950...1200 МПа, относительное удлинение 10...16 %, обладает высокой стойкостью к растворам кислот. Примером эффективности применения титановых сплавов может быть следующее: детали для насоса перекачки растворов серной и азотной кислот, изготовленные из титанового сплава ВТЗ-1, имеют в несколько раз большую стойкость, чем детали из нержавеющей стали.



Для получения отливок расплавленный титановый сплав заливают в бронзовые, керамические или графитовые формы; последние покрывают гарнисажом во избежание насыщения металла углеродом.

## **1.2. Особенности строения, плавления и кристаллизации металлов и сплавов**

Строение твердых металлических сплавов зависит от химического и фазового состава, процесса кристаллизации, взаимодействия компонентов, их образующих, и той дополнительной термической или другой обработки, которую твердый сплав прошел. Форма, размеры и характер взаимного расположения фаз в сплавах определяет структуру, выявленную методами микроскопического анализа, и основные физико-механические свойства сплава.

Все металлы и литейные металлические сплавы – тела кристаллические, атомы (ионы) расположены в металлах закономерно в отличие от аморфных тел, в которых атомы расположены хаотично.

Переход металла в жидкое состояние сопровождается в большинстве случаев увеличением объема на несколько процентов и соответственным снижением плотности. Существуют, однако, такие металлы, как висмут, гелий, сурьма, германий и кремний, которые при плавлении уменьшаются в объеме, т. е. ведут себя как вода. Переходя к характеристике плотности сплавов, следует отметить, что они как в твердом, так и в жидком состоянии не являются совершенными растворами и их плавление всегда сопряжено с изменением объема. Как правило, уменьшение объема сплава меньше в сравнении с суммарным объемом чистых компонентов.

Отличительными признаками металлических расплавов от других жидкостей являются высокие электрические и гальваномагнитные свойства (электрическая проводимость, термоэдс, эффект Холла, обусловленные наличием коллективизированных валентных электронов), высокая плотность в размещении частиц (ионов).

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие</b> .....	3
<b>Глава 1. Составы, кристаллизация и свойства металлов и литейных сплавов</b> .....	5
1.1. Составы и свойства стандартных конструкционных литейных сплавов.....	6
1.2. Особенности строения, плавления и кристаллизации металлов и сплавов.....	25
1.3. Термодинамические и кинетические закономерности процессов плавления и фазовых переходов.....	55
1.4. Физико-механические свойства конструкционных литейных сплавов.....	63
1.5. Технологические свойства литейных сплавов.....	70
1.6. Структурообразование при получении отливок из чугуна и графитизированных сплавов.....	83
<b>Глава 2. Технологии изготовления высококачественных сплавов и отливок</b> .....	89
2.1. Конструирование, проектирование и изготовление литых деталей.....	90
2.2. Фильтрация сплавов, выбор и расчет литниковых систем .....	103
2.3. Плавка и выпечная обработка железоуглеродистых сплавов .....	113
2.4. Формирование структуры, качества и свойств сплавов в отливках .....	123
2.5. Дефекты отливок и способы их предупреждения и исправления.....	129
<b>Глава 3. Специальные методы литья</b> .....	137
3.1. Литье в металлические формы .....	139
3.2. Литье в оболочковые формы .....	146
3.3. Изготовление отливок литьем под давлением .....	150
3.4. Способы центробежного литья .....	158
3.5. Горизонтальное непрерывное литье .....	160
3.6. Вертикальное непрерывное литье.....	184
3.7. Способ литья по выплавляемым моделям .....	190
3.8. Способы получения отливок со специальными свойствами.....	194
3.9. Ресурсосберегающие технологии получения заготовок.....	222
<b>Глава 4. Технологии производства отливок с повышенными физико-механическими свойствами</b> .....	226
4.1. Методы плавки и повышения качества конструкционных сплавов .....	228
4.2. Инновационные технологии производства отливок из чугуна с вермикулярным графитом .....	265

4.3. Методы модифицирования и улучшения структуры и свойств высокопрочных чугунов в отливках .....	283
4.4. Упрочнение и повышение механических свойств экономнолегированных сталей .....	308
<b>Глава 5. Сплавы для отливок со специальными дифференцированными свойствами</b> .....	<b>327</b>
5.1. Литейные сплавы для литых деталей высокоскоростных узлов трения .....	334
5.2. Влияние микролегирования на свойства фрикционных чугунов .....	351
5.3. Комплексное легирование износостойких литейных сплавов .....	356
5.4. Сплавы для литых деталей, работающих в экстремальных условиях .....	369
5.5. Мартенситно-старенющие и коррозионно-стойкие сплавы .....	404
5.6. Отливки с дифференцированными свойствами .....	422