

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Белорусский национальный технический университет

---

Кафедра «Металлургия черных и цветных сплавов»

Г. В. Довнар  
Б. М. Неменёнок  
Г. А. Румянцева

# РАСЧЕТ ШИХТЫ ДЛЯ ПЛАВКИ СТАЛИ

Пособие  
для студентов специальности  
1-42 01 01 «Металлургическое производство  
и материалобработка (по направлениям)»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением Республики Беларусь  
по образованию в области металлургического  
оборудования и технологий*

Минск  
БНТУ  
2022

УДК 669.162.262.5(075.8)  
ББК 30.69я7  
Д58

**Р е ц е н з е н т ы:**

кафедра «Металлургия и технологии обработки материалов»  
ГГТУ им. П. О. Сухого, зав. кафедрой,  
канд. техн. наук, доцент *Ю. Л. Бобарикин*;  
канд. техн. наук, доцент *В. К. Винокуров*

**Довнар, Г. В.**

Д58

Расчет шихты для плавки стали : пособие для студентов специальности 1-42 01 01 «Металлургическое производство и материалобработка (по направлениям)» / Г. В. Довнар, Б. М. Неменёнок, Г. А. Румянцева. – Минск : БНТУ, 2022. – 44 с.

ISBN 978-985-583-435-0.

Пособие включает методику расчета шихты для плавки стали, справочные данные и ссылочную информацию, необходимые для выполнения заданий к практическим занятиям, курсового и дипломного проекта студентами специальности 1-42 01 01 «Металлургическое производство и материалобработка».

УДК 669.162.262.5(075.8)  
ББК 30.69я7

**ISBN 978-985-583-435-0**

© Довнар Г. В., Неменёнок Б. М.,  
Румянцева Г. А., 2022  
© Белорусский национальный  
технический университет, 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ШИХТОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ВЫПЛАВКИ СТАЛИ.....	4
2. ВЫБОР ПЛАВИЛЬНОГО АГРЕГАТА.....	7
2.1. Классификация процессов и их общая характеристика.....	7
2.2. Технологии плавки стали.....	13
2.2.1. Плавка стали основным процессом.....	13
2.2.2. Особенности технологии выплавки <i>хромоникелевых и хромоникельмолибденовых сталей</i> .....	19
2.2.3. Особенности технологии выплавки <i>хладостойких сталей</i> .....	19
2.2.4. Особенности технологии выплавки <i>высокомарганцовистой стали 110Г13Л</i> .....	21
2.2.5. Плавка стали кислым процессом.....	22
2.2.6. Техничко-экономические показатели <i>плавки стали в дуговых сталеплавильных печах</i> .....	24
3. РАСЧЕТ ШИХТЫ.....	26
СПИСОК ОСНОВНЫХ СТАНДАРТОВ ПО ЛИТЕЙНЫМ СПЛАВАМ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА И ШИХТОВЫМ МАТЕРИАЛАМ К НИМ.....	40
ЛИТЕРАТУРА.....	44

# 1. ШИХТОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ВЫПЛАВКИ СТАЛИ

Основу металлургической части шихты для выплавки стали составляет металлический лом (возможен жидкий чугун). Доля лома при выплавке стали в дуговых электрических печах превышает 90 %. В литейных цехах более трети этого количества составляют отходы производства, брак отливок и др. Кроме того, в шихте используют обрезь проката, слитков, стружку и др.

При выплавке особых марок сталей возможно применение специально выплавленной заготовки – мягкого железа, губчатого железа и металлизированных окатышей.

Металлический лом подразделяют на нелегированный (А) и легированный (Б). В стальных ломе и отходах элемент считается легирующим, если его массовая доля в процентах составляет не менее: хром – 1,0 (в сочетании с другими элементами – 0,4); никель – 0,3; медь – 0,4; кремний – 2,0; марганец – 3,0; вольфрам – 0,3; молибден – 0,15; ванадий – 0,3; алюминий – 0,10; титан – 0,2; ниобий – 0,1; бор – 0,005; азот – 0,05; свинец – 0,05; фосфор – 0,040.

В чугунных ломе и отходах элемент считается легирующим, если его массовая доля в процентах составляет не менее: кремний – 3,0; марганец – 1,0; фосфор для фосфористых чугунов – 1,5 [1].

Категория А стального лома состоит из 18 видов и обозначается 1А–16А, 29А, 34А. Качество лома определяется составом, чистотой, габаритами и массой.

Отходы группы Б используют при выплавке легированных сталей, поэтому их тщательно сортируют по маркам, близким по химическому составу. Категория Б стального металлолома состоит из двенадцати видов: 2Б–8Б, 11Б, 13Б–16Б, и по химическому составу распределена по группам Б1–Б64.

Шлакообразующие (флюсы) применяют для образования и корректировки состава шлака. Обычно в качестве флюсов используют известняк (известь), бокситы, плавиковый шпат,

шамотный бой и др. Примерный химический состав некоторых шлакообразующих и окислителей приведен в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Химический состав шлакообразующих и окислителей, %

Компонент	Материал				
	Известняк	Известь	Плавиновый шпат	Железная руда	Боксит
CaO	52,0–54,5	≥ 88,0	–	–	≤ 1,5
CaF <sub>2</sub>	–	–	75,0–95,0	–	20,0–60,0*
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	–	–	–	74,6–96,7	15,0–45,0
SiO <sub>2</sub>	0,7–1,0	2,0	1,5–3,0	1,4–10,0	3,0–20,0
MnO	–	–	–	0,08–0,16	–
MgO	0,2–0,5	≤ 1,5	–	–	< 0,3
CaCO <sub>3</sub>	–	–	2,0–3,0	–	–
P	0,015–0,03	–	–	0,02–0,04	–
S	0,05–0,03	0,15	–	0,013–0,21	–
H <sub>2</sub> O	–	–	1,0	–	–

Примечание: \* Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Для ускорения процессов окисления примесей металлической ванны применяют окислители, например железную руду, окалину, агломерат и окатыши. Основные требования к окислителям: высокое содержание оксидов железа и минимальное – кремнезема. В качестве газообразного окислителя применяют кислород с содержанием азота менее 5 % и реже – воздух.

Металлошихту перед загрузкой в печь необходимо не только готовить к плавке (осматривать, сушить, нагревать при необходимости), но и взвешивать.

Раскислители и легирующие элементы применяют в чистом виде или в виде сплавов с железом, а также друг с другом. К ним предъявляют ряд требований: содержание основного легирующего элемента должно быть по возможности максимальным; содержание нежелательных примесей – минимальным; куски, используемые при раскислении и легировании,

должны иметь определенные размеры, способствующие их быстрому расплавлению или растворению.

Для корректировки концентрации углерода при выплавке сталей вводят науглероживатели. Их применяют либо в составе шихты, либо добавляют в жидкий расплав после окончания плавки. Главные требования к ним: наименьшее содержание вредных примесей и небольшая зольность (табл. 1.2).

Таблица 1.2

### Карбюризаторы (науглероживатели)

Карбюризатор	Массовая доля примесей, %		Влажность, %	Усвоение углерода, %
	летучие	зола		
Электродный бой	–	1,0–1,5	до 0,5	90–95
Электродный порошок	1,0–3,0	1,0–3,0	2,0–4,0	90–95
Графитированный коксик	до 0,1	8,0–10,0	3,0–5,0	80
Графит:				
серебристый	1,0–2,0	6,0–10,0	до 1,0	75–80
черный	2,0–4,0	12,0–16,0	до 1,0	75
тигельный бой	1,0–2,0	2,0–5,0	до 1,0	80–85
древесный уголь	5,0–10,0	1,0–2,0	5,0–10,0	80
Кокс:				
литейный	2,0–4,0	10,0–15,0	4,0–6,0	70
металлургический	2,0–4,0	10,0–15,0	4,0–6,0	75
сланцевый	4,0–8,0	3,0–5,0	2,0–4,0	80
термоантрацит	1,0–3,0	5,0–10,0	3,0–6,0	75–80
уголь донецкий	20,0–30,0	15,0–20,0	3,0–6,0	60

## 2. ВЫБОР ПЛАВИЛЬНОГО АГРЕГАТА

### 2.1. Классификация процессов и их общая характеристика

Плавка стали осуществляется при высоких температурах (1500–1700 °С) и сопровождается сложными физико-химическими процессами взаимодействия расплава, флюсов, шлаков, печных и атмосферных газов, футеровки печи. Методы плавки разнообразны.

Выбор метода плавки и типа плавильного агрегата определяется с учетом:

- марки выплавляемого сплава и предъявляемых к нему требований;
- доступного вида энергии (топлива, электричества);
- массы получаемых отливок;
- номенклатуры отливок и требований к ним;
- объема и характера производства;
- состава шихты;
- используемой (доступной) футеровки;
- геометрических параметров печи и вспомогательного оборудования;
- наличия миксеров (копильников);
- экономических показателей;
- прочих.

В литейных цехах обычно сталь выплавляют в электрических дуговых и индукционных тигельных печах. Для производства сталей с особыми свойствами и высокими требованиями к качеству применяются электрошлаковые, вакуумно-дуговые, плазменно-дуговые, электронно-лучевые, индукционные вакуумные печи.

Главными особенностями различных агрегатов и способов плавки стали являются характер огнеупорной футеровки, способ достижения высокой температуры, необходимой для расплавления шихтовых материалов и нагрева металла, химический

состав газовой среды в рабочем пространстве. В табл. 2.1, 2.2 приведены характеристики плавильных печей и способов плавки сталей в литейных цехах.

Таблица 2.1

Характеристики плавильных агрегатов  
для выплавки стали

Плавильный агрегат	Источник высокой температуры	Характер окислителей	Область применения
Дуговая электропечь с кислой футеровкой	Электрическая дуга	Атмосферный воздух, железная руда	Углеродистые и низколегированные стали для отливок различного назначения
Дуговая электропечь с основной футеровкой	Электрическая дуга	Атмосферный воздух, железная руда, вдуваемый кислород	Углеродистые, низко-, средне-, высоколегированные стали для отливок ответственного и особо ответственного назначения
Индукционная печь с кислой или основной футеровкой	Наведенные токи	Атмосферный воздух	Углеродистые и легированные стали для мелких и средних отливок различного назначения
Вакуумно-дуговая печь	Электрическая дуга	–	Для отливок из специальных сталей
Вакуумно-индукционная печь	Наведенные токи	–	Для отливок специального назначения из легированных сталей
Плазменно-дуговая печь	Плазменный факел	–	Для переплава высоколегированных сталей и тугоплавких сплавов
Электронно-лучевая печь	Поток электронов	–	То же

Таблица 2.2

## Характеристики способов плавки литейных сталей

Способ	Преимущества	Недостатки
Основной электродуговой процесс	Использование рядовой шихты, малый угар легирующих элементов, возможность удаления серы и фосфора, высокое качество стали	Низкая стойкость футеровки при работе с перерывами; пониженная производительность и повышенная стоимость стали по сравнению с кислым процессом
Кислый электродуговой процесс	Повышенная производительность, низкие эксплуатационные расходы, приспособленность к работе с перерывами	Невозможность удаления серы и фосфора, высокий угар легирующих элементов
Индукционный процесс	Высокая производительность, малый угар легирующих элементов, компактность установки, быстрый нагрев и хорошее перемешивание стали	Необходимость применения чистых исходных материалов, низкая температура шлаков, их высокая вязкость и малая активность, что затрудняет диффузионные процессы дефосфорации, десульфурации и раскисления
Специальные процессы плавки (ВДП, ЭШП, ЭЛП, ПДП)	Высокое качество стали за счет глубокого раскисления, рафинирования	Необходимость использования специальной шихты, сложное оборудование, низкая производительность, высокая стоимость стали, малые массы металла

Наиболее широко в сталелитейных цехах используются электропечи. На их долю приходится 90 % всей выплавляемой стали для отливок. Благодаря ряду принципиальных особенностей, электроплавка позволяет получать разнообразные по составу марки литейных сталей с низким содержанием кислорода, серы, фосфора и других нежелательных и вредных примесей. Это могут быть рядовые углеродистые стали (15Л, 30Л

и др.), конструкционные легированные (35ХМЛ, 08ГНДФЛ и др.), высоколегированные со специальными свойствами (12Х18Н9ТЛ, 40Х24Н12СЛ и др.).

Преимущества электросталеплавильных печей по сравнению с другими связаны с использованием для нагрева металла электрической энергии. Выделение тепла в электропечах происходит либо в нагреваемом металле, либо в непосредственной близости от его поверхности. Это позволяет в сравнительно небольшом объеме сконцентрировать значительную мощность и нагревать металл с большой скоростью до высоких температур, если потребуется, вплоть до температур кипения. Расход тепла и изменение температуры металла при электроплавке довольно легко контролируются и регулируются.

Наибольшее применение для выплавки стали в литейных цехах нашли кислые и основные дуговые электропечи вместимостью от 3 до 50 т и производительностью от 1,6 до 11,4 т/ч (табл. 2.3).

Таблица 2.3

Технические характеристики дуговых электрических печей

Вместимость печи, т	Обозначение	Мощность трансформатора, кВ · А	Расход электроэнергии, кВт · ч/т		Диаметр электрода, мм	Производительность, т/ч
			фактический на плавку	теоретический на расплавление		
3	ДСП-3	2000	500	750	200	1,6
6	ДСП-6	4000	500	750	300	2,7
12	ДСП-12	8000	470	720	350	4,2
25	ДСП-25	12500	460	700	400	6,6
50	ДСП-50	20000	440	680	500	11,4

Кислая сталь отличается от основной более высокой жидкотекучестью, применяется при изготовлении мелких и тонкостенных отливок, когда требуется горячая сталь. Кислый

шлак в большей степени препятствует проникновению в сталь водорода, чем основной. Поэтому сталь, выплавленная в печи с кислой футеровкой, содержит меньше водорода.

Электроплавку можно проводить в любой атмосфере: окислительной, восстановительной, нейтральной, и в широком диапазоне давлений: при атмосферном или повышенном давлении, в условиях вакуума. Изменяя состав атмосферы и давление газовой фазы, можно регулировать в нужном направлении условия протекания окислительно-восстановительных процессов, осуществлять по ходу плавки вакуумирование стали или насыщать ее элементами из газовой фазы, например азотом.

Электропечи лучше других агрегатов приспособлены для переработки металлического лома и отходов производства литейных цехов. Шихта в электропечь может быть загружена в один или несколько приемов, а период плавления в ней значительно короче, чем в мартеновских печах при скрап-процессе.

Индукционные тигельные печи (типа ИСТ) с основной или кислой футеровкой используются для выплавки сталей в литейных цехах с небольшим объемом производства. Чаще всего это отдельные участки для изготовления мелких или средних отливок специального назначения. Для индукционных печей преимущественным является применение кислой футеровки, более стойкой, чем основная, особенно при работе с перерывами. В таких печах можно выплавлять литейные стали различного состава, за исключением содержащих алюминий, марганец, титан. Алюминий и титан активно взаимодействуют с кремнием футеровки и разрушают ее. Оксиды марганца также взаимодействуют с кислой футеровкой и вызывают ее оплавление. Кроме этих ограничений следует иметь в виду, что при плавке в кислых индукционных печах трудно получить низкокремнистую сталь.

Индукционные печи нашли широкое применение при выплавке стали в цехах мелкого литья. Отечественная промышленность выпускает печи: высокочастотные (100–200 кГц),

средней частоты (500–1000 Гц), промышленной частоты (50 Гц). Для преобразования частоты применяются вращающиеся (ВПЧ) и тиристорные (ТПЧ) преобразователи частоты. Последние обеспечивают существенную экономию затрат вследствие компактности расположения плавильного агрегата, а также снижения шума в цехе. Кроме того, при использовании ТПЧ ток индуктора и частота регулируются автоматически в зависимости от состояния металла в печи и степени заполнения ее шихтой. Печи средней частоты позволяют увеличивать подводимую мощность по сравнению с печами промышленной частоты, что приводит к снижению времени расплавления шихты. Технические характеристики индукционных тигельных печей для выплавки стали приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Технические характеристики индукционных печей

Марка печи	Мощность, кВт	Частота, Гц	Производительность, т/ч	Расход электроэнергии, кВт · ч/т
ИСТ-0,006/0,1-ИЗ	95	2400	0,13	1000–1150
ИСТ-0,16/0,16-И1	250	2400	0,26	1000–1150
ИСТ-0,25/0,32-И1	250	1000	0,4	850–900
ИСТ-0,4/0,32-И1	320	1000	0,48	850–900
ИСТ-1,0/0,5-М4	500	1900	0,79	775–800
ИСТ-2,5/2,4-МЗ	2400	500	3,0	775–800
ИСТ-6/-М1	2400	500	3,0	725
ИСТ-10	2730	1000	5,0	640

Выбор плавильного агрегата в сталелитейных цехах в не-малой степени, помимо получения качественной стали, зависит от массы изготавливаемых отливок, мощности литейного цеха и коэффициентов полезного действия плавильного агрегата. Учитывать эти параметры можно, используя данные табл. 2.5 [2].

## Выбор плавильного агрегата

Масса отливок, кг, до	Выпуск отливок, т/год, до	Вместимость агрегата, т	Рекомендуемый агрегат
100	6000	1,0–3,0	ДСП, ИСТ
1000	10 000	6,0–12,0	ДСП, ИСТ
5000	15 000	12–25	ДСП
15 000 и выше	20 000 и выше	50 и выше	То же

**2.2. Технологии плавки стали****2.2.1. Плавка стали основным процессом**

Основным процессом могут выплавляться все группы марок сталей, но выплавляют наиболее ответственные. Плавку можно осуществлять двумя способами: с окислением и методом переплава. Переплав или плавку без окисления осуществляют на качественной шихте, чистой по фосфору и сере. Плавка с окислением технологически сложнее. Она состоит из заправки печи, загрузки шихты, плавления шихты, окислительного периода, восстановительного периода, доводки по химическому составу и выпуска металла.

Заправку печи производят после выпуска каждой плавки смесью на основе магнезитового порошка. В некоторых случаях допускается использовать для этих целей доломит, хромистый железняк и др. Шихту составляют таким образом, чтобы после расплавления содержание углерода в расплаве на 0,2–0,4 % превышало заданное. Вместе с шихтой загружаются по 2–3 % извести и железной руды для формирования шлака и удаления фосфора. Во время плавления фосфор до 50 % от его содержания в шихте переходит в шлак, в котором содержание  $P_2O_5$  повышается до 1,5 %. После полного расплавления шихты частично скачивают шлак, добавляют в печь известь и руду и приступают к окислительному периоду. Задача этого периода –

дальнейшая дефосфорация металла и достижение заданного состава стали и температуры. Интенсифицируется окислительный период продувкой кислородом через специальные фурмы. Использование кислорода существенно увеличивает скорость выгорания углерода. При окислении рудой она составляет 0,3–0,6 % С/ч, при продувке кислородом – 1,5 % С/ч. Расход кислорода составляет до 5 м<sup>3</sup>/т стали, при этом сокращается длительность окислительного периода на 15–25 мин, увеличивается производительность печей на 5–12 %, снижается расход электроэнергии на 5–10 %. Интенсивное кипение ванны, вызванное окислением углерода, значительно снижает содержание азота в металле, причем эффективность дегазации возрастает с увеличением скорости продувки.

К концу продувки содержание углерода в расплаве должно быть примерно на 0,1 % ниже минимального предела для выплавляемой марки стали, но не ниже 0,1 %, чтобы предотвратить переокисление металла, за исключением тех случаев, когда выплавляются стали, в которых углерод является нежелательной примесью (например, в некоторых марках нержавеющей стали).

В конце окислительного периода содержание фосфора в стали не превышает 0,01 %, а шлак, количество которого составляет 1–2 % от массы металла, имеет состав, %: CaO 40–50; SiO<sub>2</sub> 10–20; FeO 15–20; MnO 5–12; MgO 6–10; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2–3; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> до 1,5.

Кроме углерода и фосфора в этот период удаляются Si, Mn и другие легко окисляемые примеси.

В этот же период плавления стали окисляется и хром. Скачивание шлака после расплавления и постепенное его обновление в течение окислительного периода способствуют дальнейшему окислению хрома и удалению его со шлаком. Оксиды хрома снижают жидкоподвижность шлака, затрудняя процесс окисления фосфора. Поэтому использование в шихте хромосодержащих отходов при плавках с полным окислением нецелесообразно.

После окончания продувки или присадки последней порции руды делают выдержку 5–10 мин, в течение которой от-

бирают пробу на анализ и измеряют температуру расплава. Продолжительность окислительного периода составляет 30–60 мин. За это время может быть удалено до 50 % серы, вносимой шихтой. Этому способствуют высокая основность шлака (2,7–2,8) и его постоянное обновление.

После окончания окислительного периода сталь раскисляют. Раскисление может быть выполнено двумя путями:

- 1) глубинным без наводки восстановительного шлака;
- 2) в восстановительный период.

В первом случае (при выплавке стали под одним шлаком) после окончания окислительного периода в печь присаживают куски высококремнистого ферросилиция в количестве 0,1 % и ферромарганец для получения средnezаданного содержания марганца в стали.

При выплавке хромосодержащей стали присаживают феррохром для получения средnezаданного содержания хрома. Процесс раскисления в этом случае занимает 10–20 мин, после чего сталь выпускают в ковш, где ее окончательно раскисляют ферросилицием и алюминием. Выплавка стали под одним шлаком сокращает длительность плавки, уменьшает расход электроэнергии и раскислителей.

Однако таким способом выплавить сталь с низким содержанием углерода (0,15 %), серы (до 0,02 %) или сталь, в которую вводят значительное количество легкоокисляющихся элементов (Al, Ti, Cr, V), чрезвычайно сложно или невозможно. В таких случаях раскисление проводят под восстановительным шлаком (второй вариант), который наводят после скачивания окислительного шлака.

Основными задачами восстановительного периода являются удаление серы и кислорода (раскисление), корректировка химического состава стали, достижение необходимой температуры.

После скачивания шлака окислительного периода в металл вводят ферромарганец, обеспечивая содержание марганца в стали на уровне нижнего предела, определяемого ГОСТом.

Одновременно в печь добавляют ферросилиций в количестве, обеспечивающем содержание кремния в металле на уровне 0,1–0,15 %, можно добавить алюминий (0,03–0,1 %). Таким образом проводят предварительное осадочное раскисление. Окисление этих элементов способствует образованию шлака. Если в металле осталось мало углерода, то проводят науглероживание дробленным коксом или углеродным боем.

После раскисления в печь загружают шлакообразующие материалы в количестве 2–4 % от массы металла и в соотношении 5:1:1 – смесь извести, плавикового шпата и шамотного боя. Образовавшийся шлак раскисляют введением на его поверхность молотого кокса, ферросилиция, силикокальция или порошкообразного алюминия. В результате этого содержание оксидов железа в шлаке уменьшается до 0,5 % и ниже. Кроме оксидов железа восстанавливаются оксиды марганца, хрома и др. Одновременно может происходить диффузионное раскисление металла. Этот процесс длительный (период может занимать от 60 до 120 мин), поэтому и необходимо проводить предварительное осадочное раскисление. Одновременно с раскислением в восстановительный период хорошо удаляется сера из металла в шлак.

Такое раскисление можно проводить под белым или карбидным шлаком. Белый шлак образуется в начале восстановительного периода под воздействием порошка кокса и смеси его с 75 %-ным ферросилицием. После выдержки 25–40 мин шлак светлеет. Расход кокса при этом составляет 1–2 кг/т металла. При увеличении расхода кокса до 3 кг/т протекает реакция  $\text{CaO} + 3\text{C} = \text{CaC}_2 + \text{CO}$  и образуется карбидный (серый) шлак, содержащий более 2 %  $\text{CaC}_2$ . Под этим шлаком металл хорошо науглероживается, т. е. им можно раскислять лишь высокоуглеродистые марки сталей. В металл может перейти до 0,1 % С.

Карбид кальция хорошо смачивается металлом, а попадая в него при разливке, способствует образованию грубых шлаковых включений. Чтобы избежать этого, за 20–30 мин до вы-

пуска на шлак присаживают смесь с повышенным содержанием плавикового шпата и шамота и приоткрывают рабочее окно. Приток воздуха окисляет углерод и карбид кальция, и карбидный шлак превращается в белый.

Конечное раскисление стали производят на выпуске, обеспечивая необходимое содержание кремния и марганца, а также вводят небольшое количество алюминия. Для среднеуглеродистых сталей концентрация его должна быть в пределах 0,05–0,08 %, угар алюминия, введенного для раскисления металла, составляет 50–60 %. Иногда для окончательного раскисления металла наряду с алюминием используют ферротитан, силикокальций и др.

В литейных цехах при выплавке легированных сталей после получения из них отливок образуется значительное количество отходов (прибыли, литниковая система, брак), поэтому очень часто плавку ведут методом переплава. Главной задачей такого способа плавки является максимальное сохранение в ломе легирующих элементов. Легкоокисляющиеся примеси (алюминий, титан) почти полностью окисляются в период плавления, а марганец, хром, вольфрам, ванадий переходят в шлак. Чтобы сохранить их, плавку ведут без присадок руды (твердых окислителей) и ограничивая окислительные процессы в период плавления. Так как при переплаве углерод и фосфор почти не окисляются, то в шихте содержание фосфора должно быть минимальным, а углерода – на уровне нижнего предела в готовой стали.

Ферровольфрам и ферромolibден, если выплавляют стали с содержанием соответствующих элементов, вводят во время завалки. Медь и никель можно давать либо в завалку, либо в восстановительный период. Титан и ванадий вводят в сталь перед выпуском. Для раннего формирования шлака и защиты металла от кислорода атмосферы печи шлакообразующие вводят во время завалки и по мере прожигания в металлошихте колодцев от электродов.

Так как ванна кипит очень слабо, то металл может насыщаться газами. Для предотвращения этого иногда в шихте за-

меняют известь на известняк, что способствует некоторой дегазации металла за счет выделения  $\text{CO}_2$ .

Скачивание шлака периода плавления производят лишь после раскисления.

В таком процессе легирующие элементы усваиваются в следующих количествах, %: Al и Ti – 0; Si 50–70; V и Mn 70–80; Cr 85–90; W 90–95; Mo 90–95; Cu и Ni 90–93. Это способствует существенной экономии соответствующих ферросплавов при сокращении длительности восстановительного периода. В целом производительность печи возрастает при переплаве на 20–35 %.

Чтобы интенсифицировать процесс переплава и обеспечить в нем удаление газов, плавку можно вести с частичным окислением, используя кислород. Содержание углерода в этом случае необходимо иметь на 0,1–0,2 % выше верхнего предела в готовой стали. Шихта состоит из отходов выплавляемой стали примерно на 80 % и углеродистых отходов с низким содержанием фосфора (менее 0,02 %). Для ускорения шлакообразования в шихту вводят 1,0–2,0 % извести (известняка) и 0,3–0,5 % шамотного боя. После расплавления шихты берут пробу металла и начинают продувку кислородом, снижая содержание углерода до требуемого. Скачивают полностью шлак и начинают восстановительный период традиционным способом. При таком способе ведения плавки легирующие элементы усваиваются следующим образом, %: Si – 0; Mn 20–30; V 30–40; W 85–90; Cr 60–80. Чтобы увеличить усвоение вольфрама, ванадия и хрома, в шихту вводят отходы динамной стали или кремнистые ферросплавы. В настоящее время существует множество технологий выплавки стали в дуговых электрических печах, которые можно использовать в литейных цехах: плавка с окислением без удаления окислительного шлака, плавка без диффузионного раскисления; плавка с введением в шихту жидкого чугуна, дуплекс-процесс (рафинирование металла, выплавленного в другой печи); смешивание в ковше стали, выплавленной в двух печах и др. Выбор того или иного способа выплавки стали определяется экономической целесообразностью.

### ***2.2.2. Особенности технологии выплавки хромоникелевых и хромоникельмолибденовых сталей***

При плавке с полным окислением шихта состоит из отходов легированных и углеродистых сталей. Шихтовку осуществляют из расчета получения после расплавления не более 0,4 % Cr во избежание значительных потерь хрома с окислительным шлаком. Это ограничивает возможность использования большого количества легированных хромом отходов. Шихта должна содержать такое количество углерода, чтобы в окислительный период можно было окислить 0,3–0,4 % C. Никель и ферромolibден обычно дают в завалку. После проведения окислительного периода скачивают шлак, присаживают феррохром.

Рафинирование металла начинают с предварительного глубинного раскисления (Si, Al или комплексными раскислителями), после чего наводят восстановительный шлак, обрабатывая его углеродом и кремнием. К концу восстановительного периода шлак должен содержать не более 0,4 % FeO и не менее 55 % CaO. За 2–3 мин до выпуска металла на штанге вводят от 0,5 до 0,8 кг алюминия на тонну.

Метод переplava целесообразно проводить с применением газообразного кислорода. При этом шихта должна содержать не менее 60–75 % отходов выплавляемой стали, остальное – углеродистые стали. В завалку дают 2–3 % CaO. В конце плавки ванну продувают кислородом, чтобы окислить не менее 0,20 % C. При достижении необходимого для данной марки стали содержания углерода продувку прекращают, удаляют окислительный шлак и проводят рафинирование стали. Переplав отходов с частичным окислением кислорода предотвращает накопление в стали азота.

### ***2.2.3. Особенности технологии выплавки хладостойких сталей***

Стали выплавляют в дуговых электропечах с основной футеровкой двухшлаковым режимом с использованием стан-

дартных ферросплавов. Основность шлака в период плавления должна быть в пределах 2,5–3,0. К моменту выпуска она не должна быть ниже 2,5, а содержание закиси железа – не более 0,6–0,8 %. Необходимая основность шлака обеспечивается присадкой свежеебоженной извести.

В течение окислительного периода должно быть окислено не менее 0,3 % углерода до получения его содержания на нижнем пределе или на 0,05 % ниже требуемого нижнего предела для этой марки стали. Если в течение расплавления шихты и окислительного периода фосфор удален недостаточно или в расплаве содержится хром (в сталях, не легируемых хромом), то необходимо провести повторное скачивание шлака.

Предварительное раскисление проводят в начале восстановительного периода после максимального удаления окислительного шлака присадкой кускового алюминия (0,03–0,05 %). Легирующие элементы и ферросплавы (никель, медь, ферросилиций, ферромolibден, феррохром, ферромарганец) вводят из расчета среднего марочного их содержания без учета угара, а затем дают шлакообразующие в количестве 2,5–3,5 % от массы расплава.

Количество вводимого для конечного раскисления алюминия зависит от содержания в стали углерода. Для сталей с содержанием углерода более 0,3 % оно составляет 0,15 %, а для сталей с углеродом до 0,3 % – достигает 0,20 % от массы расплава. Алюминий вводят в расплав на штангах за 1–2 мин до выпуска плавки.

Металл из печи выпускают в ковш со шлаком. При наполнении ковша примерно на 1/3 высоты под струю присаживают лигатуру с щелочно-земельными металлами из расчета введения 0,025–0,035 % Са, а затем вводят ферротитан на верхний предел марочного содержания его в стали без учета угара, феррованадий и феррониобий – из расчета на среднее содержание.

При раскислении – модифицировании стали титаном количество вводимого алюминия корректируют в сторону уменьшения.

Массовая доля алюминия всех марок хладостойких сталей должна находиться в пределах 0,03–0,06 %. Для сталей марок

27ХГСНМДТЛ и 30ХГ2СТЛ рекомендуется частичная (или полная) замена алюминия титаном из расчета суммарного содержания алюминия и титана 0,03–0,06 %.

Для повышения уровня и стабилизации ударной вязкости при температуре  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  сталь дополнительно модифицируют редкоземельными металлами. Сплавы с РЗМ (0,05 % РЗМ по расчету) вводят в ковш на штанге после его наполнения. Можно вводить лигатуры ЩЗМ и РЗМ вдуванием их в виде порошка в струе аргона.

#### ***2.2.4. Особенности технологии выплавки высокомарганцевистой стали 110Г13Л***

Эту сталь используют только для фасонных отливок. Она может быть выплавлена в любом из применяемых в сталелитейном производстве плавильных агрегатов. Независимо от способа плавки в стали 110Г13Л должно содержаться минимальное количество  $\text{MnO}$  и фосфора. В настоящее время эту сталь выплавляют либо основным процессом на свежей шихте, либо переплавом отходов. В первом случае основным компонентом шихты служит углеродистый стальной лом. Шихту рассчитывают таким образом, чтобы по расплавлению в металле содержалось 0,4–0,45 % С. Для науглероживания, если это необходимо, в шихту дается электродный бой. Вместе с шихтой заваливают железную руду и известь (приблизительно по 2 % каждого компонента). После расплавления шлак удаляют в том случае, если в расплаве содержится более 0,06 % Р. Кипение ванны осуществляют присадкой железной руды или продувкой кислородом. После окислительного периода в стали должно быть не более 0,15 % С и 0,03 % Р. Удалив шлак окислительного периода, металл раскисляют смесью  $\text{FeSi}$  и  $\text{FeMn}$  или силикомарганцем. Наводят восстановительный шлак с помощью извести, плавикового шпата и электродного боя (40:40:20) и проводят диффузионное раскисление. Под шлак в несколько приемов загружают ферромарганец, после ввода каждой порции  $\text{FeMn}$  шлак раскисляют смесью  $\text{FeSi}$

или алюминием с боркальком (60 % Al + 40 % CaO). Перед выпуском металла из печи шлак должен иметь основность 2,6–3,2 и содержать не менее 40 % CaO и не более 10–12 % MnO. Окончательное раскисление проводят алюминием (0,8–1,0 кг/т стали). Температура стали в заливочном ковше 1440–1450 °С.

Сталь 110Г13Л может выплавляться и методом переплава отходов. В этом случае шихта состоит из 90 % отходов и не более 10 % лома низкоуглеродистой стали. В качестве шлакообразующего материала используют известь, вводя ее в завалку в период расплавления. После расплавления осуществляют предварительное раскисление кусковым ферросилицием, подают в печь смесь извести, плавикового шпата и ферросилиция. До заданного состава по марганцу сталь доводят за 10–15 мин до ее выпуска. Остальные операции проводят так же, как и в случае плавки на свежей шихте.

Получить эту сталь можно также методом смешивания: расплав низкоуглеродистой стали при 1600 °С выпускают в ковш с разогретым кусковым ферромарганцем. Или расплав углеродистой стали, полученной в любом плавильном агрегате, смешивают с расплавленным ферромарганцем. Качество стали, полученной этими методами, значительно ниже качества стали, выплавленной из свежих материалов или переплавом.

### ***2.2.5. Плавка стали кислым процессом***

По сравнению с основным кислый процесс обладает целым рядом преимуществ:

- меньшими тепловыми потерями и более низким расходом электроэнергии, нагрев металла осуществляется быстрее;
- меньшей длительностью плавки и более низким расходом электродов;
- высокой стойкостью футеровки и меньшим расходом огнеупоров;
- более низкой стоимостью и меньшей дефицитностью огнеупорных материалов;
- более высокой производительностью печей.

Основными недостатками кислого процесса являются:

– необходимость применения шихтовых материалов, чистых по фосфору и сере;

– трудности выплавки высокомарганцовистых сталей, так как кремний восстанавливается из футеровки марганцем, при этом содержание кремния в стали резко возрастает, а футеровка печи разрушается. По этой же причине в кислых печах не плавят стали, содержащие алюминий, титан, ванадий.

Особенностью кислого процесса является ведение плавки под шлаком, содержащим до 65 % кремнезема. Под таким шлаком фосфор и сера не удаляются, поэтому шихта должна содержать этих элементов на 0,01 % меньше, чем готовая сталь. Наилучшие показатели плавки достигаются при использовании 60–75 % крупной шихты, 25–30 % мелкой, в том числе до 12 % стальной стружки.

Завалку проводят так, чтобы крупный лом находился в зоне действия электрических дуг, а мелкий – на откосах и поверх крупного лома. Расплавление шихты происходит так же, как и в основной печи. В период плавления образуются оксиды железа (есть они и непосредственно в шихте), которые окисляют кремний и марганец шихты. Если в шихте есть ванадий или хром, то они тоже окисляются. Таким образом, на подине формируется шлак, который растворяет и некоторое количество кремнезема футеровки. Примерный состав этого первичного шлака, %: 40–50  $\text{SiO}_2$ ; 15–30  $\text{FeO}$ ; 10–30  $\text{MnO}$ ; 2–6  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 5–15 прочих оксидов. При простом переплаве шихту составляют таким образом, чтобы содержание углерода было на 0,1 % ниже марочной концентрации, поскольку в процессе плавки углерод электродов будет переходить в расплав. В этом случае выплавка сталей состоит из следующих периодов: загрузки шихты, расплавления, доводки по химическому составу и температуре, раскисления и выпуска металла в ковш.

При кислой электроплавке применяют также кремневосстановительный и активный процессы. Чаще используют активный процесс. При использовании этого процесса после расплавления

в стали содержание углерода превышает требуемое на 0,1–0,3 %. Железная руда в количестве до 1 % от завалки дается в завалку при выплавке углеродистых сталей или в процессе расплавления шихты, если в ней содержится хром или повышенное количество кремния. В процессе окисления выгорает до 0,2 % С, и в процессе кипения ванны осуществляется хорошая дегазация стали, что предупреждает брак по газовой пористости. Чтобы предупредить восстановление кремния из футеровки, во время кипения в шлак добавляют мелко раздробленный известняк. Шлак окислительного периода удаляют только при выплавке ответственных марок стали после чистого кипения.

Длительность окислительного периода составляет 30–50 мин при выплавке легированных и 20–30 мин при выплавке углеродистых сталей.

При получении углеродистых марок стали для фасонного литья восстановительный период отсутствует, а частичное раскисление достигается за счет восстановления кремния. В конце окислительного периода в металл вводят ферромарганец, добиваясь содержания марганца в стали 0,2–0,3 %, а за 5–10 мин до выпуска в металл добавляют ферросилиций, если содержание кремния в стали недостаточно. За 3–5 мин до выпуска вводят оставшееся количество ферромарганца для корректировки концентрации марганца в готовой стали. Иногда ферромарганец вводят в ковш. Угар кремния при раскислении составляет 5–10 %, а марганца – 15–20 %.

Окончательное раскисление стали можно проводить алюминием, но остаточное содержание его в стали не должно превышать 0,025 %, так как иногда алюминий снижает некоторые механические характеристики литой стали.

### ***2.2.6. Техничко-экономические показатели плавки стали в дуговых сталеплавильных печах***

Выплавка стали в дуговых сталеплавильных печах (ДСП) для фасонных отливок наиболее распространенная. Этому

способствует также возможность использования дешевой низкосортной шихты. Практически в ДСП кислым или основным процессом может быть выплавлена любая сталь.

Основным процессом, как правило, выплавляют сталь для отливок ответственного, особо ответственного назначения, включая высоколегированные хромоникелевые, хромоникель-молибденовые, высокомарганцовистые, хладостойкие стали.

Кислый процесс используют для выплавки отливок общего назначения, а также сталей, легированных кремнием.

Выбор технологического процесса плавки должен учитывать технико-экономические показатели плавки, а также качество шихты и требования, предъявляемые к отливкам из выплавляемой стали. Техничко-экономические показатели ДСП (по данным проф. Л. И. Леви) приведены в табл. 2.6.

Таблица 2.6

Техничко-экономические показатели  
электродуговых печей средней вместимости

Показатель	Процесс	
	основной	кислый
Средняя продолжительность плавки, ч	4	3,2
Средняя стойкость свода – количество плавов	20	120
Средняя стойкость стен – количество плавов	50	110
Количество ремонтов в месяц	3	1,5
Расход огнеупорного кирпича, кг/т	97	17
Расход электроэнергии, кВт·ч/т	750	620

### 3. РАСЧЕТ ШИХТЫ

**Шихтой** называют совокупность исходных материалов, из которых путем сплавления и последующей рафинирующей обработки расплава получают жидкую сталь. В качестве шихтовых материалов используют различные металлические и неметаллические материалы.

В плавильных агрегатах шихту нагревают и расплавляют, полученный расплав перегревают до необходимой температуры и доводят до требуемого химического состава, затем раскисляют и рафинируют от неметаллических включений и растворенных газов (водорода), а при необходимости еще и модифицируют. Получение жидкой стали – сложный процесс, который сопровождается различными физическими и физико-химическими процессами – взаимным растворением компонентов сплава и их испарением, взаимодействием жидкого металла с газовой атмосферой плавильных агрегатов, со шлаками и флюсами, а также с материалом футеровки печей.

Задача расчета шихты – определение необходимой комбинации исходных материалов и соотношения между ними, при котором обеспечивается получение стали, по химическому составу и механическим свойствам соответствующей требованиям ГОСТ 977-88 «Отливки стальные. Общие технические требования» или специальным техническим условиям (ТУ). При этом можно решать данную задачу как оптимизационную, параллельно достигая максимума или минимума интересующей цели, например, максимального уровня какого-либо показателя свойств стали или минимальной стоимости шихты.

Угар элементов также зависит от варианта проведения плавки. При плавке стали в печах с основной футеровкой кремний из компонентов завалки выгорает почти полностью, а угар марганца незначителен. При плавке стали в печах с кислой футеровкой, наоборот, марганец из компонентов завалки выгорает значительно больше, чем кремний. Сера и фосфор при плавке стали в печах с основной футеровкой

могут быть удалены на 50–70 %. При плавке стали в печах с кислой футеровкой содержание этих элементов практически не изменяется.

Угар элементов при прочих равных условиях зависит и от их абсолютного содержания в компонентах шихты. Из высококонцентрированных шихтовых материалов легирующие элементы в абсолютном выражении выгорают больше, но в относительном выражении они усваиваются полнее, чем из низкоконцентрированных шихтовых материалов.

При плавке стали в индукционных печах окислительные процессы развиваются слабо, поэтому угар элементов из шихтовых материалов, вводимых в печь при завалке или в качестве присадки, незначителен.

Сведения о коэффициентах усвоения элементов из шихтовых материалов при плавке стали в индукционных и дуговых электропечах приведены в табл. 3.1 и 3.2 [2].

Таблица 3.1

**Коэффициенты усвоения элементов  
из шихтовых материалов при плавке стали  
в индукционных электропечах**

Легирующий элемент	Завалка	Присадка	Легирующий элемент	Завалка	Присадка
Углерод	0,90	1,00	Алюминий	(0)	0,75
Марганец	0,80	0,90	Титан	0,50	0,90
Кремний	0,80	0,95	Молибден	0,97	0,99
Хром	0,85	0,95	Вольфрам, ниобий	0,95	0,95
Никель и медь	0,97	0,99	Цирконий	(0)	0,50
Кобальт	0,95	0,95	Фосфор, сера	1,00	1,00
Ванадий	0,85	0,95			

Таблица 3.2

Коэффициенты усвоения элементов  
из шихтовых материалов при плавке стали  
в дуговых электропечах

Легирующий элемент	Завалка	Присадка
Углерод	0,75–0,90	1,00
Марганец	$\frac{0,30-0,70^*}{0,80-0,90^{**}}$	0,90–0,95*
Кремний	$\frac{0}{60^{**}}$	0,90
Хром	$\frac{0,80}{0,85^{**}}$	0,95
Никель	0,95–0,97*	0,97
Кобальт, медь	0,95	0,97
Ванадий	$\frac{0,20-0,50^*}{0,50-0,85^{**}}$	0,90–0,95*
Молибден	0,95	0,97
Вольфрам	0,90	0,95
Ниобий	$\frac{0,50}{0,80^{**}}$	0,85–0,90*
Титан	$\frac{0}{0,10^{**}}$	0,50
Цирконий	0	0,40
Церий	0	0,50
Алюминий	0	0,75
Фосфор	0,30–0,50	0,80
Сера	0,30–0,90	1,00
* Нижнее значение при малых, а верхнее – при более высоких содержаниях легирующих элементов в шихтовых материалах. ** В числителе коэффициенты усвоения элементов при выплавке стали с окислением, в знаменателе – соответственно без окисления		

Ниже приведены примеры расчета шихты для выплавки стали и легированного чугуна.

*Подбор оптимального состава компонентов шихты  
для выплавки легированной стали  
(без учета угара (пригара) элементов)  
Пример № 1*

Исходные данные: марка выплавляемого сплава – 20Х20Н14С2Л; плавильный агрегат – дуговая электропечь. Химсостав выплавляемого сплава представлен в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Химический состав сплава 20Х20Н14С2Л  
по ГОСТ 977-88

Контролируемые химические элементы, %						
легирующие компоненты					примеси	
С	Si	Mn	Cr	Ni	S	P
до 0,20	2,00–3,00	до 1,50	19,0–22,0	12,00–15,00	до 0,025	до 0,035

Основу шихты для выплавки любой стали составляет стальной лом. В данном примере в таком качестве выступает нелегированный (углеродистый) стальной лом. Необходимые легирующие элементы (Si, Cr, Ni) вводятся в виде соответствующих ферросплавов. Состав лома и ферросплавов подбирается (в пределах существующих марок по ГОСТ) таким образом, чтобы максимально соответствовать выплавляемой марке стали.

Для повышения содержания С применяют карбюризаторы либо чугуны.

Используемые компоненты шихты подобранного состава представлены в табл. 3.4.

Процент возврата рассчитывается как сумма ЛПС годных и бракованных отливок + бракованные отливки + скрап, сливы и прочие возвращаемые отходы [3].

Эти данные в расчете шихты считаются константой. Выбирается для первого примера 45 %.

Компоненты шихты оптимального состава для выплавки сплава 20X20N14C2Л

№ п/п	Название, марка, ГОСТ (ТУ)	Химический состав, % (числитель – интервал значений по ГОСТ, знаменатель – выбранное значение)									
		C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P			
1	Стальной лом 2А СТБ 2026-2010*	$\frac{0,14-0,22}{0,15}$	$\frac{0,00-0,05}{0,05}$	$\frac{0,30-0,60}{0,60}$	-	-	$\frac{0,000-0,050}{0,010}$	$\frac{0,000-0,040}{0,020}$			
2	Возврат собственного производства**	0,15	2,50	0,75	21,0	14,00	0,010	0,010			
3	Ферросилиций, FeSi65, ГОСТ 1415-93	$\frac{0,00-0,20}{0,15}$	$\frac{63-68}{65,00}$	$\frac{0,0-0,4}{0,40}$	$\frac{0,0-0,4}{0,4}$	-	$\frac{0,0-0,4}{0,01}$	$\frac{0,00-0,05}{0,01}$			
4	Феррохром низкоуглеродистый с низким содержанием фосфора, FeCr90C2LP, ГОСТ 4757-91	$\frac{0,10-0,25}{0,15}$	$\frac{0,0-1,5}{1,5}$	-	$\frac{85-95}{90,0}$	-	$\frac{0,00-0,03}{0,01}$	$\frac{0,00-0,05}{0,01}$			
5	Ферроникель ФН-1 ТУ 48-3-59-84	$\frac{0,00-0,06}{0,06}$	$\frac{0,00-0,05}{0,05}$	$\frac{0,00-0,03}{0,03}$	$\frac{0,00-0,07}{0,07}$	$\frac{20-25}{25,00}$	$\frac{0,00-0,09}{0,010}$	$\frac{0,000-0,015}{0,010}$			

Примечание:

\* См. СТБ 2026-2010 «Металлы черные вторичные. Общие технические условия», с. 32. Приложение В «Рекомендуемое применение металлолома в различных плавильных агрегатах». Выбирается для примера – дуговые электроды, вид 2А-«Металлолом стальной № 2»).

\*\* Устанавливается в соответствии с требуемым составом сплава (желательные значения – близкие к средним).

Один из рассчитанных вариантов процентного состава компонентов шихты представлен ниже:

стальной лом – 14 %;

возврат – 45 %;

ферросилиций – 2 %;

феррохром – 12 %;

ферроникель – 27 %

и соответствующий ему химический состав сплава (без учета угара (пригара) элементов): С = 0,11 %; Si = 2,63 %; Mn = 0,44 %; Cr = 20,3 %; Ni = 13,05 %; S = 0,010 %; P = 0,012 %.

*Подбор компонентов шихты  
известного (установленного) состава  
для выплавки легированной стали марки 20Х20Н14С2Л  
Пример № 2*

В табл. 3.5 представлен пример шихты, образованной из имеющихся на складе компонентов, состав которых уже невозможно менять (подбирать) в отличие от предыдущего примера.

В данном случае для получения необходимой марки сплава могут понадобиться новые компоненты шихты. Состав новой шихты, представленной в табл. 3.5, отличается от предыдущего присутствием никеля первичного вместо ферроникеля и другими составами ферросплавов.

Один из вариантов процентного состава компонентов новой шихты для выплавки указанной легированной стали:

возврат – 45,0 %;

стальной лом – 34,0 %;

ферросилиций – 2,4 %;

феррохром – 11,6 %;

никель – 7,0 %,

которому соответствует химсостав сплава (без учета угара (пригара) элементов): С = 0,18 %; Si = 2,77 %; Mn = 0,48 %; Cr = 19,8 %; Ni = 13,30 %; S = 0,014 %; P = 0,017 %.

Таблица 3.5

**Компоненты шихты известного состава  
для выплавки сплава 20Х20Н14С2Л**

Порядковый номер компонента	Название (марка)	Химический состав, %						
		C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P
1	Возврат собств. пр-ва	0,15	2,50	0,75	21,0	14,00	0,010	0,010
2	Стальной лом вид – 2А	0,30	0,01	0,40	–	–	0,020	0,030
3	FeSi65	0,10	64,00	0,20	0,1	–	0,020	0,030
4	FeCr90C2LP	0,10	0,90	–	89,0	–	0,020	0,010
5	Никель первичной марки Н-1 ГОСТ 849-70	0,005	0,001	–	–	99,94	0,001	0,001

Расчетный состав выплавляемого сплава определяется следующим образом:

- 1) принимается полный состав шихты за единицу (100 %);
- 2) устанавливается доля каждого компонента шихты (например, 45 % – это 0,45; 2,4 % – 0,024 и т. д.);
- 3) определяется, сколько вносит каждый компонент шихты данного элемента (например,  $0,45 \cdot 0,15 \%C = 0,0675 \%C$  и т. д.);
- 4) устанавливается, сколько вносят все компоненты шихты данного элемента (на примере № 2 расчетное содержание углерода будет:

$$0,45 \cdot 0,15 \%C + 0,34 \cdot 0,30 \%C + 0,024 \cdot 0,10 \%C + 0,116 \cdot 0,10 \%C + 0,07 \cdot 0,005 \%C = 0,18 \%C).$$

*Подбор оптимального состава шихты  
для выплавки легированного чугуна  
Пример № 3*

Исходные данные: марка выплавляемого сплава – ЧХ16М2.  
Химсостав выплавляемого сплава представлен в табл. 3.6.

Таблица 3.6

Химический состав сплава 4Х16М2  
по ГОСТ 7769-82

Контролируемые химические элементы, %							
легирующие компоненты						примеси	
С	Si	Mn	Cr	Cu	Mo	S	P
2,4–3,6	0,5–1,5	1,5–2,5	13,0–19,0	1,0–1,5	0,5–2,0	до 0,05	до 0,10

Как правило, за основу шихты выплавляемого чугуна берутся обычные литейные чушковые чугуны марок Л1, Л2, Л3, Л4, Л5, Л6, содержащие от 1,2 до 3,6 % Si, до 1,5 % Mn, до 1,2 % P и до 0,06 % S или рафинированные магнием литейные чушковые чугуны марок от ЛР1 до ЛР7 с содержанием Si = 1,2–3,6 %, Mn ≤ 1,0 %; P ≤ 0,12 % и S ≤ 0,01 %.

Литейный и литейный рафинированный магнием чугун всех марок изготавливают с нормированной массовой долей углерода от 3,4 до 4,5 % включительно.

Литейный чугун марки Л1 и литейный рафинированный магнием чугун марки ЛР1 допускается изготавливать с массовой долей Si > 3,6 %.

В литейном чугуне марок Л1–Л6, выплавленном из медьсодержащих руд, дополнительно определяется массовая доля Си и указывается в документе о качестве.

Литейный чугун изготавливают с массовой долей Cr ≤ 0,04 % – для отливок из ковкого чугуна и с массовой долей Cr ≤ 0,1 % – для отливок из серого чугуна.

Литейный чугун марок Л2, Л3, Л4 для производства поршневых колец изготавливают с массовой долей  $Mn = 0,6-0,8 \%$  и  $P = 0,4-0,6 \%$ .

Литейный рафинированный магнием чугун изготавливают с нормированной долей микропримесей:  $Ti \leq 0,06 \%$ ;  $V \leq 0,05 \%$ ;  $Cr \leq 0,04 \%$ ;  $Pb \leq 0,005 \%$ ;  $Al \leq 0,005 \%$  и  $Mg \leq 0,019 \%$ .

Для литейного производства допускается использование и передельного чугуна марок ПЛ1 и ПЛ2, содержащих  $C = 4,0-4,5 \%$ ;  $Si = 0,5-1,2 \%$ ;  $Mn \leq 1,5 \%$ ;  $P \leq 0,3 \%$  и  $S \leq 0,05 \%$ .

Тугоплавкие легирующие элементы чаще всего вводят в плавильную печь в виде ферросплавов, относительно легкоплавкие, например,  $Cu$ , – в чистом виде. Для снижения содержания легирующих элементов в шихте для выплавки чугунов часто используется стальной лом. Используемые компоненты шихты подобранного состава представлены в табл. 3.7.

Нужный состав сплава может быть получен при следующем соотношении компонентов шихты (без учета угара (пригара) элементов): чугун литейный – 50,0 %; возврат – 37,0 %; феррохром – 11 %; ферромolibден – 1,2 %; медь – 0,8 %, что позволяет изготовить сплав следующего состава:  $C = 3,1 \%$ ;  $Si = 1,1 \%$ ;  $Mn = 1,6 \%$ ;  $Cr = 14,4 \%$ ;  $Cu = 1,3 \%$ ;  $Mo = 1,1 \%$ ;  $S = 0,01 \%$ ;  $P = 0,04 \%$ .

Необходимо отметить, что такой состав шихты годится только для одной плавки с учетом высокого содержания  $Mn$  в возврате – 2,4 %. Использование возврата последующей плавки будет характеризоваться относительно низким содержанием в нем  $Mn = 1,6 \%$ , что не позволит выйти на нужное содержание в сплаве (1,5–2,5 %). Поэтому, уже начиная со второй плавки, понадобится вводить дополнительно в шихту ферромарганец.

Если рассмотреть на следующем примере случай, когда невозможно влиять на состав компонентов шихты, то возникает ситуация, при которой нельзя получить сплав заданного состава (см. табл. 3.8 – первые 5 позиций шихты, аналогичной по составу той, что рассматривалась в примере № 3).

Таблица 3.7

**Компоненты шихты подобранного оптимального состава  
для выплавки сплава ЧХ16М2**

№ п/п	Название, марка ГОСТ (ТУ)	Химический состав, % (числитель – интервал значений по ГОСТ, знаменатель – выбранное значение)									
		C	Si	Mn	Cr	Cu	Mo	S	P		
1	Чугун литейный Л6 ГОСТ 4832-95	$\frac{3,4-4,5}{3,4}$	$\frac{1,2-1,6}{1,2}$	$\frac{0,9-1,5}{1,5}$ (IV группа)	–	–	–	$\frac{0,00-0,02}{0,01}$ (I категория)	$\frac{0,00-0,08}{0,06}$ (класс А)		
2	Возврат собственного производства	3,0	1,0	2,4	15	1,2	1,3	0,02	0,03		
3	Феррохром. ГОСТ 4757-91. FeCr80C40LP (среднеуглеродистый с низким содержанием фосфора)	$\frac{2,0-4,0}{3,0}$	$\frac{0,0-1,5}{1,1}$	–	$\frac{75-85}{80}$	–	–	$\frac{0,00-0,03}{0,01}$	$\frac{0,00-0,03}{0,01}$		
4	Ферромолибден. ГОСТ 4759-91. ФМо 50	$\frac{0,00-0,05}{0,05}$	$\frac{0,0-3,0}{1,2}$	–	–	$\frac{0,0-2,0}{1,2}$	$\frac{50-55}{50}$	$\frac{0,00-0,50}{0,03}$	$\frac{0,00-0,10}{0,07}$		
5	Медь катодная. ГОСТ 859-2001. М1к, группа 2	–	–	–	–	$\frac{99,95-99,97}{99,96}$	–	–	$\frac{0,000-0,002}{0,001}$		

*Подбор компонентов шихты  
известного (установленного) состава  
для выплавки легированного чугуна марки ЧХ16М2  
Пример № 4.*

Введение дополнительных компонентов (ферромарганец и стальной нелегированный лом) по отдельности не приводит к получению чугуна заданного состава. Только совместное введение в шихту указанных дополнительных компонентов позволяет выйти на нужный состав выплаваемого сплава (табл. 3.8).

Таблица 3.8

Компоненты шихты известного состава  
для выплавки сплава ЧХ16М2

№ п/п	Название (марка)	Химический состав, %							
		C	Si	Mn	Cr	Cu	Mo	S	P
1	Чугун	4,4	1,5	1,0	–	–	–	0,03	0,08
2	Возврат (37 %)	3,0	1,0	2,0	15	1,2	1,3	0,02	0,03
3	Феррохром среднеуглеродистый с низким содержанием фосфора, FeCr90C40LP, ГОСТ 4757-91	3,8	1,2	–	78	–	–	0,01	0,01
4	Ферромolibден. ГОСТ 4759-91. ФМо 50	0,03	1,5	–	–	1,2	53	0,04	0,07
5	Медь катодная. ГОСТ 859-2001. М1к, группа 2	–	–	–	–	99,9	–	–	0,001
<b>Дополнительные компоненты шихты</b>									
6	Ферромарганец высокоуглеродистый со сверхнизким содержанием фосфора, FeMn75C80VLP, ГОСТ 4755-91	5	1,1	76	–	–	–	0,02	0,08
7	Стальной лом 2А СТБ 2026-2010	0,16	0,03	0,4	–	–	–	0,02	0,03

Один из вариантов подходящей шихты, состоящей из всех 7-ми компонентов:

1. Чугун чушковый – 42 %;
2. Возврат – 37,0 %;
3. Феррохром – 11,0 %;
4. Ферромolibден – 2,0 %;
5. Медь – 1,0 %;
6. Ферромарганец – 0,5 %;
7. Стальной лом – 6,5 %.

В результате без учета угара (пригара) элементов получается следующий расчетный состав сплава: C = 3,4 %; Si = 1,2 %; Mn = 1,6 %; Cr = 14,1 %; Cu = 1,5 %; Mo = 1,5 %; S = 0,02 %; P = 0,05 %.

В табл. 3.9 приведены составы некоторых основных материалов для раскисления и легирования сталей.

Таблица 3.9

Составы некоторых основных материалов  
для раскисления и легирования сталей

Материал	Содержание элемента, %					
	углерод	кремний	фосфор	сера	основной элемент	другие элементы
	не более					
1	2	3	4	5	6	7
Ферросилиций (ГОСТ 1415-93)						
ФС90	0,1	–	0,3	0,02	87–95	Al ≤ 3,5; Mn ≤ 0,3
ФС75	0,1	–	0,04–0,05	0,02	74–80	Al ≤ 3,0; Mn ≤ 0,4
ФС70	0,1	–	0,04	0,02	–	–
ФС65	0,1	–	0,05	0,02	65–68	Al ≤ 2,5; Mn ≤ 0,4
ФС45	0,2	–	0,05	0,02	41–47	Al ≤ 2,0; Mn ≤ 1,0
ФС20	1,0	–	0,10	0,02	19–23	Al ≤ 1,0; Mn ≤ 1,0
Ферромарганец (ГОСТ 4755-91)						
ФМн90	0,5	1,8	0,05–0,30	0,02	85–95	–
ФМн88	2,0	3,0	0,10–0,40	0,02	85–95	–
ФМн78	7,0	6,0	0,05–0,70	0,02	75–82	–
ФМн70	7,0	6,0	0,30–0,70	0,02	65–75	–

Продолжение табл. 3.9

1	2	3	4	5	6	7
Феррохром (ГОСТ 4757-91)						
ФХ001А	0,01	0,8	0,02	0,02	> 68	А1 < 0,2
ФХ100А	1,0	2,0	0,03	0,02	> 65	–
ФХ650А	6,5	2,0	0,05	0,06	> 65	–
ФХ800Б	8,0	2,0	0,05	0,08	> 65	N > 4,0
ФХН100А	0,06	1,0	0,02	0,02	> 65	А1 < 0,2
ФХН400А	0,06	1,0	0,03	0,04	> 65	N > 4,0
ФХН600А	0,03	1,0	0,04	0,04	> 60	N > 6,0
Ферромolibден (ГОСТ 4759-91)						
ФМо58	0,08	7,0	0,06	0,12	58	–
ФМо55	0,10	1,5	0,10	0,15	55	–
ФМо50	0,50	5,0	0,10	0,20	50	–
Силикомарганец (ГОСТ 4756-91)						
МнС27	0,2	26,0–32,0	0,05	0,03	60	–
МнС17	2,5	14,0–16,9	0,10–0,35	0,03	65	–
МнС12	3,5	14,0–16,9	0,20–0,35	0,03	65	–
Ферротитан (ГОСТ 4761-91)						
ФТн70С05	0,2	0,5	0,05	0,05	68	–
ФТн35С5	0,2	5,0	0,04	0,04	28–40	А1 8,0; Cu 2,0
ФТн25	1,0	5,0–30,0	0,08	0,03	20–30	А1 5,0–25,0
Ферровольфрам (ГОСТ 17293-93)						
ФВ80а	0,10	0,8	0,03	0,02	80	Mo < 6,0; А1 < 3,0
ФВ70а	0,20	2,0	0,06	0,06	70	Mo < 7,0; А1 < 6,0
ФВ70	0,5	0,8	0,06	0,10	70	Mo < 2,0;
ФВ65	0,7	1,2	0,10	0,15	65	Mo < 6,0
Алюминий (ГОСТ 295-98)						
АВ97	Σ примесей Cu, Zn, Mg, Si, Pb, Sb не более 3,0–13,0			> 97 > 87		Σ примесей не более 3,0–13,0
Медь (ГОСТ 859-2001)						
МВЧк	–	–	0,0005	0,002	99,993	–
М00к	–	–	0,0005	0,002	99,99	–
М1	–	–	–	0,045	99,9	–
М2	–	–	–	0,01	99,7	–
Феррофосфор (ТУ 14-5-72-80)						
ФФ14	–	2,0	14,0	0,5	–	–

Окончание табл. 3.9

1	2	3	4	5	6	7
Феррованадий (ГОСТ 27139-86)						
ВД1	0,75	2,0	0,10	0,10	35	–
ВД2	0,75	3,0	0,20	0,10	35	–
ВД3	1,0	3,5	0,25	0,10	35	–
Силикокальций (ГОСТ 4762-85)						
СК10	0,2	45	0,02	–	> 10,0	Fe > 25 Al 1,0
СК15	0,2	45	0,02	–	> 15,0	Fe > 20 Al 1,0
СК30	0,5	< 50	0,02	–	> 30,0	Fe < 6,0 Al 2,0

## **СПИСОК ОСНОВНЫХ СТАНДАРТОВ ПО ЛИТЕЙНЫМ СПЛАВАМ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА И ШИХТОВЫМ МАТЕРИАЛАМ К НИМ**

1. Железо и сплавы на его основе.

1.1. Отливки стальные.

1.1.1. ГОСТ 19200-80. Отливки из чугуна и стали. Термины и определения дефектов.

1.1.2. ГОСТ 977-88. Отливки стальные. Общие технические условия.

1.1.3. ГОСТ 30153-94. Отливки стальные по выплавляемым моделям. Общие технические условия.

1.1.4. ГОСТ 21357-87. Отливки из хладостойкой и износостойкой стали. Общие технические условия.

1.1.5. ГОСТ 25639-83. Магниты литые постоянные. Технические условия.

1.1.6. ГОСТ 17809-72. Материалы магнитотвердые литые.

1.2. Отливки чугунные.

1.2.1. ГОСТ 26358-84. Отливки из чугуна. Общие технические условия.

1.2.2. ГОСТ 1412-85. Чугун с пластинчатым графитом для отливок. Марки.

1.2.3. ГОСТ 28394-89. Чугун с вермикулярным графитом для отливок. Марки.

1.2.4. ГОСТ 7293-85. Чугун с шаровидным графитом для отливок. Марки.

1.2.5. ГОСТ 1215-79. Отливки из ковкого чугуна. Общие технические условия.

1.2.6. ГОСТ 1585-85. Чугун антифрикционный для отливок. Марки.

1.2.7. ГОСТ 7769-82. Чугун легированный для отливок со специальными свойствами.

1.3. ГОСТ 4832-95. Чугун литейный. Технические условия.

1.4. ГОСТ 805-95. Чугун передельный. Технические условия.

1.5. Ферросплавы.

1.5.1. ГОСТ 1415-93. Ферросилиций. Технические требования и условия поставки.

1.5.2. ГОСТ 4755-91. Ферромарганец. Технические требования и условия поставки.

1.5.3. ГОСТ 4756-91. Ферросиликомарганец. Технические требования и условия поставки.

1.5.4. ГОСТ 4757-91. Феррохром. Технические требования и условия поставки.

1.5.5. ГОСТ 11861-91. Ферросиликохром. Технические требования и условия поставки.

1.5.6. ГОСТ 4759-91. Ферромолибден. Технические требования и условия поставки.

1.5.7. ГОСТ 27130-94. Феррованадий. Технические требования и условия поставки.

1.5.8. ГОСТ 4761-91. Ферротитан. Технические требования и условия поставки.

1.5.9. ГОСТ 14848-69. Ферробор. Технические требования и условия поставки.

1.5.10. ГОСТ 17293-93. Ферровольфрам. Технические требования и условия поставки.

1.5.11. ГОСТ 16773-2003. Феррониобий. Технические требования и условия поставки.

1.5.12. ГОСТ 16773-2003. Феррониобий. Технические требования и условия поставки.

1.5.13. ISO 6501: 1988 Ферроникель. Технические условия и требования к поставке.

1.5.14. ТУ 48-3-59-84. Ферроникель. Технические условия.

1.5.15. ТУ 1732-010-00201365-96. Ферроникель легированный.

1.5.16. ТУ 1732-014-00201365-97. Ферроникель гранулированный.

1.6. ГОСТ 4762-71. Силикокальций. Технические условия.

1.7. ГОСТ 380-2005. Сталь углеродистая обычного качества.

1.8. ГОСТ 1050-74. Сталь углеродистая качественная конструкционная. Технические условия.

1.9. ГОСТ 13610-79. Железо карбонильное радиотехническое. Технические условия.

1.10. ГОСТ 9849-86. Порошок железный. Технические условия.

1.11. СТБ 2026-2010. Металлы черные вторичные. Общие технические условия.

2. Некоторые цветные металлы.

2.1. ГОСТ 11069-2001. Алюминий первичный. Марки.

2.2. ГОСТ 11070-74. Чушки первичного алюминия. Технические условия.

2.3. ГОСТ 295-98. Алюминий для раскисления, производства ферросплавов и алюмотермии. Технические условия.

2.4. ГОСТ 859-2001. Медь. Марки.

2.5. ГОСТ 193-79. Слитки медные.

2.6. ГОСТ 804-93. Магний первичный в чушках. Технические условия.

2.7. ГОСТ 3640-94. Цинк. Технические условия.

2.8. ГОСТ 860-75. Олово. Технические условия.

2.9. ГОСТ 3778-98. Свинец. Технические условия.

2.10. ГОСТ 22861-93. Свинец высокой чистоты. Технические условия.

2.11. ГОСТ 849-97. Никель первичный. Технические условия.

2.12. ГОСТ 17746-96. Титан губчатый. Технические условия.

2.13. ГОСТ 19807-91. Титан и сплавы титановые деформируемые. Марки.

2.14. ГОСТ 16099-80. Ниобий в слитках. Технические условия.

2.15. ГОСТ 16100-79. Ниобий в штабиках. Технические условия.

2.16. ГОСТ 6008-90. Марганец металлический и марганец азотированный. Технические условия.

2.17. ГОСТ 5905-2004. Хром металлический. Марки и технические требования.

2.18. ГОСТ 1089-82. Сурьма. Технические условия.

2.19. ГОСТ 1467-93. Кадмий. Технические условия.

2.20. ГОСТ 22860-93. Кадмий высокой чистоты. Технические условия.

2.21. ГОСТ 10928-90. Висмут. Технические условия.

2.22. ГОСТ 123-98. Кабальт. Технические условия.

2.23. ГОСТ 17614-80. Теллур технический. Технические условия.

2.24. ГОСТ 19709.1-83. Теллур высокой чистоты.

2.25. ГОСТ 8774-75. Литий. Технические условия.

2.26. ГОСТ 4658-73. Ртуть. Технические условия.

3. Некоторые неметаллические материалы.

3.1. ГОСТ 2169-69. Кремний технический. Технические условия.

3.2. ГОСТ 19658-81. Кремний монокристаллический в слитках. Технические условия.

3.3. ГОСТ 10298-79. Селен технический. Технические условия.

3.4. ГОСТ 16153-80. Германий монокристаллический. Технические условия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Металлы черные вторичные. Термины и определения. – ГОСТ 16482-70. – Введ. 01.01.1972. – 6 с.

2. Производство стальных отливок : учебник для вузов / Л. Я. Козлов [и др.] ; под ред. Л. Я. Козлова. – М. : МИСИС, 2003. – 352 с.

3. Довнар, Г. В. Проектирование литейных цехов : учебно-методическое пособие для практических занятий, по курсовому и дипломному проектированию для студентов специальности 1-42 01 01 «Металлургическое производство и материалобработка» / Г. В. Довнар. – Минск, БНТУ, 2017. – 68 с.

Учебное издание

**ДОВНАР** Геннадий Витольдович  
**НЕМЕНЁНОК** Болеслав Мечеславович  
**РУМЯНЦЕВА** Галина Анатольевна

## **РАСЧЕТ ШИХТЫ ДЛЯ ПЛАВКИ СТАЛИ**

Пособие  
для студентов специальности  
1-42 01 01 «Металлургическое производство  
и материалобработка (по направлениям)»

Редактор *Е. О. Германович*  
Компьютерная верстка *Е. А. Беспанской*

Подписано в печать 04.03.2022. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 2,62. Уч.-изд. л. 2,05. Тираж 100. Заказ 688.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.