МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
НОВОТРОИЦКИЙ ФИЛИАЛ

Е.В. Братковский, А.В. Заводяный,
А.Н. Шаповалов, Е.А. Шевченко

СПЕЦИАЛЬНЫЕ СТАЛИ

Учебное пособие

для студентов направления подготовки 150400 «Металлургия»

Новотроицк
2013

УДК 669.15
ББК 34.327+74.58
С71

Рецензенты:
Заведующий кафедрой металлургии черных металлов
ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», профессор, докт. техн. наук
В.А. Бигеев

Заведующий кафедрой теплотехники и теплоэнергетики ОГТИ ОГУ,
доцент, канд. физ. мат. наук
Д.А. Гюнтер

Братковский Е.В, Заводяный А.В., Шаповалов А.Н., Шевченко Е.А.
Специальные стали: Учебное пособие. – Новотроицк: НФ НИТУ «МИСиС», 2013 – 87 с.

В учебном пособии представлены материалы, необходимые для самостоятельного изучения и закрепления теоретических знаний по дисциплине «Специальные стали». Подробно изложены все основные разделы дисциплины в соответствии с требованиями федерального государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по направлению 150400 «Металлургия».

Рекомендовано Методическим Советом НФ НИТУ «МИСиС»

© Новотроицкий филиал
ФГАОУ ВПО «Национальный
исследовательский технологический
университет «МИСиС», 2013
© Братковский Е.В.
© Заводяный А.В.
© Шаповалов А.Н.
© Шевченко Е.А.

Содержание

Введение 4
1 Специальные стали 5
1.1 Основные понятия и область применения 5
1.2 Современные тенденции развития отрасли 6
2 Классификация специальных сталей 8
2.1 Нержавеющие стали 10
2.2 Инструментальные быстрорежущие стали 14
2.3 Конструкционные износостойкие стали 15
2.4 Мартенситно-стареющие стали 16
2.5 Подшипниковые стали 17
2.6 Пружинные стали 19
2.7 Высокопрочные стали 20
2.8 Рельсовые стали 22
3 Прецизионные стали и сплавы 23
3.1 Магнитно-мягкие сплавы 24
3.2 Магнитотвёрдые материалы 27
3.3 Сплавы с заданным коэффициентом термического расширения 29
3.4 Сплавы с особыми упругими свойствами 31
3.5 Сверхпроводящие материалы 34
3.6 Твёрдые материалы 36
3.7 Жаропрочные стали и сплавы 37
3.8 Полупроводниковые материалы 38
3.9 Порошковые материалы 41
4 Способы получения металлов и сплавов особо высокого качества 44
4.1 Основные способы рафинирования спецсталей 44
4.2 Сравнительный анализ методов получения спецсталей 51
5 Методы получения сталей специального назначения 54
5.1 Вакуумный индукционный переплав 54
5.2 Вакуумный дуговой переплав 59
5.3 Электрошлаковый переплав 67
5.4 Плазменно-дуговой переплав 73
5.5 Электронно – лучевой переплав 79
Библиографический список 86

Введение

На протяжении всей истории металлургии перед металлургами стоит задача улучшения качества металла и прежде всего получения металла, не содержащего вредных примесей (серы, фосфора, газов, примесей цветных металлов, неметаллических включений и т.п.) и с необходимой структурой.

Развитие таких отраслей техники, как авиакосмическая, атомная, энергетическая и ряда других, во многом определяется состоянием и техническим уровнем производства легированных сталей и сплавов, способных работать в самых разнообразных условиях. Современная техника нуждается в материалах, надежно работающих как при температуре, близкой к абсолютному нулю, так и температуре в несколько тысяч градусов, при знакопеременных и вибрационных нагрузках, под воздействием радиоактивных излучений, в агрессивных средах, в условиях глубокого вакуума и резких перепадов температуры.

Решение этих задач потребовало, во-первых, конкретного улучшения качества производимых сталей и сплавов и, во-вторых, создания новых материалов.

Традиционными методами выплавки и разливки в ряде случаев нельзя получить металл требуемого качества. Взаимодействие жидкой стати в процессе выплавки и разливки с огнеупорными материалами, шлаком и атмосферой неизбежно приводит к значительному загрязнению металла неметаллическими включениями и газами. Затвердевание металла в чугунных изложницах сопровождается дефектами кристаллизационного (усадочные раковины, пористость, трещины и т.д.) и ликвационного происхождения.

Поэтому возникла необходимость применения специализированных методов, которые объединяют в особую группу специальной электрометаллургии - вторичные рафинирующие процессы. Общими для них являются переплав расходуемых заготовок (электродов), капельный перенос переплавляемого металла, последовательная кристаллизация его в водоохлаждаемом кристаллизаторе. Во всех этих процессах используется электрический источник тепла, под действием которого металл плавится. В то же время вторичные рафинирующие процессы различаются характером преобразования электрической энергии в тепловую, наличием или отсутствием вакуума и шлака в плавильном пространстве и рядом других особенностей.

Основной задачей курса «Специальные стали» является изучение свойств и назначения специальных сталей, а также рассмотрение основных технологий их получения.

1 Специальные стали

1.1 Основные понятия и область применения

Специальные стали - это сплавы на основе железа, отличающиеся от обычных сталей особыми свойствами, обусловленными либо их химическим составом, либо особым способом производства, либо способом их обработки. Достаточно наличия одного из этих факторов, чтобы сталь можно было назвать специальной. Чаще всего специальные стали характеризуются всеми тремя особенностями. Это относится также и к легированным сталям с высоким содержанием легирующих элементов.

Изучением свойств стали ученые и технологи занимаются с давних времен. В 1851г. впервые русским ученым металлургом Аносовым П.П. был открыт закон о связи строения и свойств металлов, что дало большой скачек для зарождения сталей с особыми свойствами. Сопоставляя макроструктуру изготавливаемых булатов с их режущими свойствами, Аносов П.П. писал: «если коленчатым и сетчатым булатом легко перерезать в воздухе газовый платок, то и моим булатом я могу делать то же самое». В своей работе о булатах он писал: «примесь марганца к стали в малом количествен до 1/200 доли не производит в ней видимой перемены, а если его содержание увеличить до 1/100 доли, то сталь станет тверже, хрупче и вообще грубою. С увеличением количества марганца до 1/50 доли сталь делается столь ломкой, что при ударах колется по длине, соответственно направлению слоев ее составляющих…», « хром и особенно титан, при одинаковом количестве, меньше вредят стали, чем марганец». Исследования и заключения Аносова о влиянии различных элементов на свойства и структуру стали оставались верными в течение века.

Закон о взаимной связи строения и свойств металлов получил развитие в трудах Д.К.Чернова. Он впервые указал на существование критических температур и на их зависимость от концентрации углерода.

Затем были разработаны основы теории легирования сталей. Получены стали с новыми свойствами. И.Н. Богачев с сотрудниками разработал новые кавитационно-стойкие стали с нестабильным аустенитом.

В настоящее время в стране выпускается боле 1000 различных марок сталей, причем доля спецсталей с каждым годом неуклонно растет.

Стали и сплавы специального назначения благодаря своим уникальным свойствам находят широкое применение в электроэнергетике, станкостроении, машиностроении, медицине и здравоохранение, а также в создании различных агрегатов и устройств для нужд автомобильной, химической и авиационно-космической промышленности (таблица 1.1).

Таблица 1.1 - Применение специальных сталей и сплавов на основе никеля

Группа	Основные марки	Применение
Сплавы для электроники	Mi 205	электродная проволока, высоковольтные «свечи»
	NiFe 36	детали для спаев со стеклом, «масочные» кинескопы
	NiFe42	рамки с выводами
	NiCr 80-20	нагревательные элементы
Коррозионностойкие	Alloy 200	корпуса аккумуляторных батарей
	Monel 400: K 500	штифты валов, несущие детали
	Incoloy 925	в нефтегазовой промышленности
Жаростойкие	330	элементы печных конструкций
	600, 601	то же, электродная проволока, теплозащитные фильтры
	800, 800H, 800HT, 825	нефтегазовая промышленность оборудование для термообработки
Жаропрочные	A 286	элементы трубопроводов для дутья
	Inconel 718	реактивные двигатели, газовые турбины, нефтегазовая отрасль
	Nimonic 80A	элементы дизельного двигателя
	Inconel 725	нефтегазовая промышленность
	Hasteloy X	реактивные двигатели, несущие компоненты

Кроме того, практически все емкости, сосуды, реакторы, трубы и другое оборудование химической индустрии изготавливается из аустенитных нержавеющих сталей.

Специальные стали и сплавы остаются незаменимыми материалами для производства специального оборудования авиалайнеров и космических кораблей.

Например, в настоящее время одним из самых широко применяемых двигателей гражданской авиации является CFM56, которые ежегодно устанавливаются на 625 самолетах A320 и Boeing-737. Благодаря современным технологиям производства становится возможным применение новых турбинных лопаток из композиционных монокристаллических сплавов с теплозащитным покрытием, позволяет увеличит ресурс двигателя более чем в 2 раза и достичь показателя в 10000 часов.

Сложившиеся мировые тенденции научно-технического развития в области разработки и использования сплавов и сталей со специальными свойствами, показывает актуальность дальнейшего развития данной отрасли.

1.2 Современные тенденции развития отрасли

Мировое производство стали в 2012 году выросло до нового рекордного уровня и, согласно данным World Steel Association (WSA), составило 1548 млн. т, что на 1,2% превысило результат 2011 года. Рост производства стали и достижение рекордного объема выпуска в основном произошло за счет развиваю-

щихся стран.

В последнее время наблюдается тенденция роста отечественной черной металлургии, ее модернизации и соответствии мировому уровню. К успехам металлургического комплекса, в частности, относится пятое место в мире по объемам выплавки стали (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Десятка крупнейших стран-производителей стали по данным Рейтинговое агентство РИА Рейтинг стали

Место	Страна	2012 г., млн. т	Изменение в % к 2011 г.	Производство на душу населения, т	Доля в мировом производстве,%
1	Китай	708,78	3,7%	0,52	45,79
2	Япония	107,23	-0,3	0,85	6,93
3	США	88,60	2,7	0,28	5,72
4	Индия	76,72	6,3	0,06	4,96
5	Россия	70,61	2,7	0,49	4,56
6	Южная Корея	69,32	1,2	1,49	4,48
7	Германия	42,66	-3,7	0,52	2,76
9	Турция	35,88	5,2	0,48	2,32
8	Бразилия	34,68	-1,4	0,17	2,24
10	Украина	32,91	-6,9	0,73	2,13

Общие тенденции мирового развития в области производства спецсталей показывают, что в настоящее время интенсивно ведутся разработки и исследования в области литейных и деформируемых сплавов и сталей со специальными свойствами, сырья, исходных компонентов для их производства и технологий их переработки в высокотехнологичную наукоемкую продукцию с большой долей инновационной составляющей.

Причем основные направления развития спецэлектрометаллургии за рубежом заключаются в:

1) Совершенствование технологии выплавки и переплава спецметалла, агрегатов, систем контроля и управления процессами, для обеспечения гарантии качества металла, увеличения выхода годного и снижения затрат.

2) Создание новых менее затратных технологий для производства спецметалла «наземного» (не авиакосмической промышленности) применения, для существенного снижение себестоимости металла.

В настоящее время все больше внимания уделяется получению специальных сталей и сплавов методом порошковой металлургии.

Перспективы развития порошковой металлургии прежде всего связываю с созданием новых, лёгких, прочных композиционных материалов и наноструктурных покрытий.

Создание твердосплавных материалов с наноструктурой позволит улучшить режущие свойства и физико- механические характеристики материала не

менее чем в 2-3 раза, а нанесение покрытий с использованием нанопорошков, позволяет увеличить срок службы изделий в 5-6 раз.

Согласно «Стратегии развития металлургической промышленности на период до 2020 года», акценты инновационной политики должны постепенно переходить от задач закрепления предприятий на мировом рынке металлопродукции (основной приоритет 1990-2006 гг.) к задачам мобилизации потенциала развития (приоритет до 2015 г.) и в дальнейшем - к обеспечению условий для повышения технического уровня отечественной металлургической промышленности (приоритет 2010-2025 гг.).

Причем исходя из «Стратегических направления развития материалов и технологий до 2030 года» предусматривается разработка технологий получения сверхчистых по примесям и керамическим включениям ультрадисперсных порошков на основе нового поколения титановых, интерметаллидных, ниобиевых и никелевых сплавов, в том числе «экстра»-порошков для лазерной LMD-наплавки (гранулометрический состав 40-80 мкм), керамоподобных титановых сплавов, работоспособных до температуры 700°С, а также создание центра компетенции (трансфера технологий) по порошковым материалам и аддитивным технологиям.

Контрольные вопросы:

1) Что подразумевают под специальными сталями?
2) Область применения сталей специального назначения?
3) Перечислите основные направления развития спецэлектрометаллургии?

2 Классификация специальных сталей

В металлургии известны сотни сталей и сплавов, отличающихся выдающимися служебными характеристиками. На данный момент нет однозначной их классификации, в связи с тем, что во многих случаях стали относят к специальным даже по одному из трех указанных признаков:

- по химическому составу;
- по способу производства;
- по способу обработки.

По химическому составу к специальным сталям, прежде всего, относятся сплавы железа, легированные никелем, хромом, вольфрамом, молибденом, ванадием и др., например нержавеющие стали с содержанием более 13% хрома и добавками никеля, молибдена и другие. При производстве и термической обработке таких сталей большое значение имеет характер легирования.

Легированными сталями называют сплавы железа, к которым добавлены определенные количества легирующих элементов с целью получения ряда особых свойств.

В зависимости от количества легирующих добавок стали подразделяют на:

- низколегированные (количество добавок не превышает 2,5%);
- среднелегированные (добавок от 2,5 до 10%);

- высоколегированные (добавок свыше 10%).

В процессе производства нелегированной стали вместе с шихтой (в том числе и скрапом) непроизвольно попадают разные легирующие элементы, например никель, медь, хром. В общей сложности их количество составляет около 0,5%. Эти примеси, как правило, оказывают незначительное влияние на свойства сталей и поэтому ими можно пренебречь. Ошибочно такие стали называть легированными. Вместе с тем иногда незначительная добавка легирующего элемента, даже в количестве 0,1% и менее, введенная в определенную сталь, позволяет считать эту сталь легированной.

Таким образом, получение легированной стали предусматривает намеренное введение легирующих элементов в определенном количестве для получения определенных свойств.

При этом даже при небольшом содержание легирующих элементов, если стали приданы определенные свойства, ее относят к разряду спецсталей.

Специальные стали по способу производства.

Стали одинакового химического состава могут выплавлять различными способами, которые подразделяют в зависимости от применяемых печей на: конверторную, мартеновскую, тигельную и электросталеплавильную.

Выбор того или иного способа производства зависит от назначения сталей (области применения). Например, стали с содержанием 0,6– 0,8% С и около 0,6–1% Mn для изделий массового производства, например для закаливаемых рельсов, выплавляют конверторным способом или в основных мартеновских печах большой емкости. Стали примерно такого же химического состава, идущие для изготовления штампов, режущих инструментов и др., можно выплавлять или в мартеновских или в электрических печах.

Исследование влияния минимальных количеств примесей таких элементов, как азот, кислород, сера, водород и фосфор, на свойства сплавов железа позволяет определить особенности, обусловленные процессом производства стали. Изучение металлургических закономерностей показывает, что в большинстве случаев характерные свойства сплавов, обусловленные химическим составом и, в частности, малыми количествами примесей, могут быть достигнуты лишь в результате применения определенных способов производства этих сплавов. Таким образом, специальные стали по способу производства (с учетом влияния незначительных количеств примесей) можно рассматривать одновременно и как специальные стали по химическому составу.

Отдельными способами производства выделяют переплавные процессы объединены в особую группу специальной электрометаллургии их ещё называют вторичные рафинирующие процессы. К ним относят: вакуумный индукционный переплав (ВИП), вакуумный дуговой переплав (ВДП), плазменный дуговой переплав (ПДП), электрошлаковый переплав (ЭШП), электронно-лучевой переплав (ЭЛП) и другие.

Специальные стали по способу обработки.

Большинство сталей выплавляют в мартеновских печах большой емкости или в кислородных конвертерах. После плавки сталь подвергают горячей прокатке или ковке, термической обработке, а также, например, холодной прокат-

ке, протяжке и тому подобным специальным способам обработки, в результате которых получают желаемые специальные свойства. Примером служат мягкие сорта листовой стали для глубокой вытяжки.

Особенности производства и обработки ряда обычных сталей специального назначения позволяют назвать и эти стали специальными, причем в этом случае важное значение имеет изучение влияния небольших количеств примесей

В большинстве случаев принимают к рассмотрению классификацию специальных сталей, приведенную М.И. Гольдштейном [3]:

1) Коррозионно-стойкие (нержавеющие) стали.
2) Инструментальные быстрорежущие стали.
3) Конструкционные износостойкие стали.
4) Машиностроительные
   - Мартенситно-стареющие стали.
   - Подшипниковые стали.
   - Пружинные стали.
   - Высокопрочные стали.
   - Рельсовые стали.

Кроме того отдельной группой стоят прецизионные стали и сплавы, которые в настоящее время находят все большее применение в различных областях производства и техники, начиная от устройств и агрегатов бытовой техники (телефонные, телевизионные системы, холодильные агрегаты) и заканчивая машинами прикладной кибернетики, космической техники, средств связи и т.д.

2.1 Нержавеющие стали

Понятие «легированная нержавеющая сталь» является собирательным для более чем 120 различных марок нержавеющих сталей. В течение десятилетий было разработано множество различных сплавов, которые в каждом случае применения проявляли наилучшие свойства. Все эти сплавы имеют общую отличительную черту: благодаря содержащемуся в сплаве хрому они не нуждаются в дополнительной защите поверхности. Этот присутствующий в сплаве хром образует на поверхности бесцветный прозрачный оксидный слой, который сам залечивается при повреждениях поверхности благодаря содержащемуся в воздухе или воде кислороду.

По химическому составу коррозионно-стойкие стали подразделяют:

- хромистые стали (08Х13, 12Х13, 20Х13, 30Х13, 40Х13, 12Х17, AISI 410, AISI 430, AISI 420, 1.4006, 1.4016, 1.4028);
- хромо-никелевые стали (08Х18Н9, AISI 304, 1.4301);
- хромо-никель-молибденовые стали (03Х17Н14М2);
- хромо-никель-молибдено-медистые стали (Х25Н28М3Д3);
- хром-никель-марганцевые стали (2Х13Н4Г9 (ЭИ100)).

Хромистые стали более дешевые, однако хромоникелевые обладают большей коррозионной стойкостью. Содержание хрома в нержавеющей стали должно быть не менее 12%. При меньшем количестве хрома сталь не способна

сопротивляться коррозии, так как ее электродный потенциал становится отрицательным.

Наибольшая коррозионная стойкость сталей достигается после соответствующей термической и механической обработки. Так, для стали 12Х13 лучшая коррозионная стойкость достигается после закалки в масле (1000-1100°С), отпуска (700-750°С) и полировки.

Кроме основных легирующих компонентов, эти стали могут быть дополнительно легированы молибденом, кремнием, титаном, ниобием, которые вводят в состав сплавов главным образом для повышения их коррозионной стойкости в определенных средах.

Легирующие добавки, особенно хром, облегчают переход металла в пассивное состояние. При достаточном легировании сплавы пассивируются непосредственно кислородом воздуха или раствора, как это имеет место для чистого хрома. Степенью устойчивости пассивного состояния определяется коррозионная стойкость этих сталей.

Широкое распространение получила классификация коррозионностойких сталей по структурным признакам (таблица 2.1).

В зависимости от структуры стали подразделяют на классы:

- ферритный;
- мартенситный;
- аустенитный;
- феррито-мартенситный;
- аустенито-мартенситный;
- аустенито-ферритный.

В отдельный класс обычно выделяют коррозионностойкие сплавы на основе никеля (никеля и хрома, никеля и молибдена).

Таблица 2.1 - Классификация коррозионно-стойких сталей по структурным признакам

Марка (ГОСТ 5632-72)	Класс		Элементы		Прочие элементы
		C	Cr	Ni	
12Х13	Мартенситно-ферритный	0,09 - 0,15	12-14	—	—
40Х13	Мартенсит ный	0,36 - 0,45	12-14	—	—
12Х17 08Х17Т	Ферритный То же	<0,12 <0,08	16-18 16-18	—	5,0 — 0,8 Ti
12Х18Н9 12Х18Н9Т 04Х18Н10 10Х14Г14НЗ	Аустенитный	<0,12 <0,12 <0,04 0,09- 0,14	17-19 17-19 17-19 12,5-14	8-10 8-9,5 9-11 2,8-3,5	5,0-0,8Ti 13-15,5 Mn
09Х15Н8Ю	Аустенитно-мартенситный	<0,09	14-16	7-9,4	0,7-1,3 Al
08Х21Н6М2Т	Аустенитно-ферритный	<0,08	20-22	5,5-6,5	1,8-2,5 Mo 0,2-0,4 Ti

В свою очередь нержавеющие стали аустенитного класса подразделяются:

- хромоникелевые;
- хромомарганцевоникелевые;
- хромомарганцевые.

В зависимости от соотношения углерода и хрома стали могут иметь ферритную (08Х18Т, 12Х17, 15Х25Т, 15Х28), феррито-мартенситную (08Х13, 12Х13) и мартенситную (20Х13, 30Х13, 40Х13) структуру. Стали с более высоким содержанием углерода имеют в структуре мартенсит и карбиды, остаточный аустенит и относятся к инструментальным.

Подразделение сталей на классы по структурным признакам условно и проводится в зависимости от основной структуры, полученной при охлаждении сталей на воздухе после высокотемпературного нагрева. Состав коррозионностойких сталей регламентируется ГОСТ 5632-72, а механические свойства - соответствующими ГОСТами на полуфабрикаты, например ГОСТ 7350-77 (толстый лист), ГОСТ 5582-75 (тонкий лист), ГОСТ 5949-75 (сортовой прокат) и т.д.

Благодаря своим уникальным коррозионным свойствам нержавеющие стали нашли широкое применение в аэрокосмической, химической, строительной и металлургической, пищевой промышленности (таблица 2.2).

Таблица 2.2 - Области применения коррозионно-стойких сталей

Марка (ГОСТ 5632-72)	Рабочая температура, °С, не более	Назначение
12Х1320Х13	450	Лопатки гидротурбин, компрессоров, клапанов и арматура для химической промышленности, предметы домашнего обихода
30Х13	450	Валы, болты, шестерни, пружины, работающие в условиях коррозионной среды и больших напряжений
40Х13	-	Шарикоподшипники, пружины, режущий хирургический и бытовой инструмент
04Х18Н10 12Х18Н10Т	600	Конструкции и детали, изготовляемые сваркой и штамповкой в машиностроении и химической промышленности

Мартенситные и мартенсито-ферритные стали обладают хорошей коррозионной стойкостью в атмосферных условиях, в слабоагрессивных средах (в слабых растворах солей, кислот) и имеют высокие механические свойства. В основном их используют для изделий, работающих на износ, в качестве режущего инструмента, в частности ножей, для упругих элементов и конструкций в пищевой и химической промышленности, находящихся в контакте со слабоагрессивными средами (например, 4-5%-ная уксусная кислота, фруктовые соки и др.). Эти стали применяют после закалки и отпуска на заданную твердость.

Ферритные стали применяют для изготовления изделий, работающих в окислительных средах (например, в растворах азотной кислоты), для бытовых приборов, в пищевой, легкой промышленности и для теплообменного оборудо-

вания в энергомашиностроении.

Ферритные хромистые стали имеют высокую коррозионную стойкость в азотной кислоте, водных растворах аммиака, в аммиачной селитре, смеси азотной, фосфорной и фтористоводородной кислот, а также в других агрессивных средах.

Коррозионная стойкость сталей ферритного класса повышается с увеличением содержания в них хрома, уменьшением содержания углерода и азота. В зарубежной практике разработаны стали с низким суммарным содержанием углерода и азота (0,025-0,035%), содержащие 18-28% Cr и 2-4% Mo, стабилизированные Ti или Nb. Эти стали называют суперферритами; они имеют высокую стойкость во многих агрессивных средах, стойки против коррозии под напряжением, питтинговой и щелевой коррозии.

Основным преимуществом сталей ***аустенитного класса*** являются их высокие служебные характеристики (прочность, пластичность, коррозионная стойкость в большинстве рабочих сред) и хорошая технологичность. Поэтому аустенитные коррозионностойкие стали нашли широкое применение в качестве конструкционного материала в различных отраслях машиностроения.

В хромоникелевых аустенитных сталях промышленных плавок возможны следующие фазовые превращения: 1) образование карбидных, карбонитридных фаз при нагревах в интервале 650-850 °С; 2) растворение этих фаз при нагреве до более высоких температур (1100-1200 °С); 3) образование 5-феррита при высокотемпературных нагревах; 4) образование а- и е-мартенситных фаз при охлаждении и пластической деформации.

Хромомарганцевоникелевые и хромомарганцевые стали. Марганец, как и никель, является аустенитообразующим элементом, однако он обладает менее сильным действием на стабилизацию аустенита.

Коррозионная стойкость хромомарганцевых и хромомарганцевоникелевых сталей во многих агрессивных средах достаточно высокая, однако в средах высокой агрессивности (например, азотная кислота, среды с галогенами, сульфатами, сульфидами) марганец оказывает отрицательное влияние на сопротивление коррозии.

Поэтому коррозионностойкие хромомарганцевые стали следует применять только после тщательных испытаний на коррозионную стойкость в рабочей среде. В настоящее время в технике накоплен большой опыт по рациональному использованию сталей с частичной или полной заменой никеля марганцем в качестве коррозионно-стойкого материала.

Аустенито-ферритные стали находят широкое применение в различных отраслях современной техники, особенно в химическом машиностроении, судостроении, авиации. Принципиальное их отличие состоит в том, что благодаря более высокому содержанию в них хрома аустенит становится более устойчивым по отношению к мартенситному превращению, хотя полностью исключить возможность образования мартенсита в этих сталях не всегда удается.

Аустенито-мартенситные стали относят к сталям переходного класса.

Структура этих сталей после закалки представляет собой неустойчивый (метастабильный) аустенит, который может претерпевать мартенситное $\gamma \rightarrow \alpha_м$-

превращение в результате обработки холодом. Свойства определяются соотношением количества аустенита и мартенсита в структуре. Стали этого класса относятся к сталям повышенной прочности и технологичности.

2.2 Инструментальные быстрорежущие стали

Стали для изготовления инструментов высокой производительности называют быстрорежущими. Основной целью легирования быстрорежущей стали является получение красностойкости и износостойкости. В связи с этим элементы, вводимые для изменения свойств, различны и зависят от ресурсов страны. Основными легирующими элементами, как и раньше, остаются W, Mo, V, Cr, Co, а эталоном служит сталь Р18. По структуре быстрорежущая сталь принадлежит к ледебуритному классу. В этих сталях присутствуют сложные карбиды, количество которых составляет около 30% от массы стали. Считают, что карбиды имеют формулы Fe_4W_2C, Fe_3W_3C, $(Fe,W)_6C$, которые в общем виде можно записывать $(Fe, W, Cr)_3C$ и V_2C. Чем выше температура, тем больше легирующих элементов переходит в твердый раствор, тем меньше их содержится в стали.

Химический состав некоторых быстрорежущих сталей приведен в таблице 2.3.

Таблица 2.3 - Химический состав быстрорежущих сталей

Марка стали	C	Cr	W	Mo	V	Co
Р0М2Ф3	1,10 – 1,25	3,8 – 4,6	–	2,3 – 2,9	2,6 – 3,3	–
Р6М5	0,82 – 0,90	3,8 – 4,4	5,5 – 6,5	4,8 – 5,3	1,7 – 2,1	<0,50
Р6М5Ф2К8	0,95 – 1,05	3,8 – 4,4	5,5 – 6,6	4,6 – 5,2	1,8 – 2,4	7,5 – 8,5
Р9	0,85 – 0,95	3,8 – 4,4	8,5 – 10,0	< 1,0	2,0 – 2,6	–
Р18	0,73 – 0,83	3,8 – 4,4	17,0 – 18,5	<1,0	1,0 – 1,4	<0,50

Быстрорежущие стали изготавливают как классическим способом (разливка стали в слитки, прокатка и проковка), так и методами порошковой металлургии (распыление струи жидкой стали азотом). Качество быстрорежущей стали в значительной степени определяется степенью ее прокованности. При недостаточной проковке изготовленной классическим способом стали наблюдается карбидная ликвация.

В настоящее время использование быстрорежущей стали существенно сократилось в связи с широким распространением твёрдых сплавов. Из быстрорежущей стали изготавливают в основном концевой инструмент (метчики, свёрла, фрезы небольших диаметров). В токарной обработке резцы со сменными и напайными твердосплавными пластинами почти полностью вытеснили резцы из быстрорежущей стали. По применению отечественных марок быстрорежущих сталей существуют следующие рекомендации:

Сталь Р9 рекомендуют для изготовления инструментов простой формы не требующих большого объема шлифовки, для обработки обычных конструкционных материалов (резцов, фрез, зенкеров).

Для фасонных и сложных инструментов (для нарезания резьб и зубьев), для которых основным требованием является высокая износостойкость, рекомендуют использовать сталь Р18 (вольфрамовая).

Кобальтовые быстрорежущие стали (Р9К5, Р9К10) применяют для обработки деталей из труднообрабатываемых коррозионно-стойких и жаропрочных сталей и сплавов, в условиях прерывистого резания, вибраций, недостаточного охлаждения.

Ванадиевые быстрорежущие стали (Р9Ф5, Р14Ф4) рекомендуют для изготовления инструментов для чистовой обработки (протяжки, развёртки, шеверы). Их можно применять для обработки труднообрабатываемых материалов при срезании стружек небольшого поперечного сечения.

Вольфрамомолибденовые стали (Р9М4, Р6М3) используют для инструментов, работающих в условиях черновой обработки, а также для изготовления протяжек, долбяков, шеверов, фрез.

2.3 Конструкционные износостойкие стали

Износостойкими называются стали, характеризующиеся высоким сопротивлением изнашиванию (шарикоподшипниковые, высокомарганцовистые и др.). Шарикоподшипниковые стали марок ШХ6, ШХ9, ШХ15, ШХ15СГ применяются для изготовления колец, шариков и роликов подшипников качения. Высокое содержание углерода (0,95-1,15%) и хром, среднее содержание которого указано в марке в десятых долях процента, обеспечивают их высокую твердость. Кроме того, хром увеличивает прокаливаемость стали. Окончательной термической обработкой является закалка с температур 830-880°С (а зависимости от марок стали) в масле и низкотемпературный отпуск при 150-160°С на твердость не ниже 61-65 HRC.

Износостойкие стали применяют для изготовления деталей, работающих в условиях высоких давлений, ударных нагрузок с одновременным истиранием (трамвайные и железнодорожные стрелки и крестовины, гусеничные траки, звездочки, детали дробильных установок и др.) используется к примеру сталь 110Г13Л. Структура этой стали - высокоуглеродистый аустенит, легированный марганцем. Этот аустенит в условиях трения скольжения при больших удельных нагрузках и ударах наклёпывается и твердость стали повышается до 45-48 HRC при сохранении других свойств.

Высокомарганцовистая сталь аустенитного класса 110Г13Л содержит 13% Mn и 1,2% С. Применяют эту сталь в литом и реже в деформированном состоянии.

Структура стали 110Г13Л в литом состоянии состоит из аустенита и избыточных карбидов $(Fe,Mn)_3C$. Выделение карбидов по границам зерен снижает прочность и вязкость стали. После закалки от 1050–1100 ^oC в воде в стали образуется структура устойчивого аустенита.

2.4 Мартенситно-стареющие стали

Мартенситно-стареющие стали (МСС) интересуют инженеров и технических работников благодаря хорошему сочетанию прочностных и технологических свойств. Разработаны стали, содержащие кроме железа и никеля Co, Mo, Ti, Al и Nb и Cr. Особенностью данных сталей является то, что они практически не содержат углерод (менее 0,03%), в связи с чем после закалки образуется «легкий» мартенсит.

Это стали на Fe–Ni основе, содержащие 7–20% Ni, дополнительно легированные Co, Mo, Ti, Al и Nb (если нужна коррозионная стойкость, то добавляют и Cr). Классическими считают стали, содержащие 18–25% Ni и с минимальным содержанием углерода. Марки наиболее используемых сталей приведены в таблице 2.4, а классификация МСС – на рисунке 2.1.

Таблица 2.4 - Механические свойства (средние) мартенситно-стареющих сталей

Сталь	$T_{стар}$, ºС	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	Ψ, %	δ, %	HRC
Н18К9М5Т (ЭП637)	500	2 200	1 950	-	8	55
Н18К12М5Т2 (Э11809)	500	2 450	2 350	35	7	60
Н16К4М5Т2Ю (ЗИ89)	480	2 050	1 980	40	7,5	55
Н17К12М5Т (ЭП845)	500	2 050	2 000	45	8	54
Н18К14М5Т (ЭИ122)	480	2 400	-	35	9	57
Х12Н8К5М3Т (ЗИ90)	480	1 700	1 600	55	10	48
Х12Н2К16М4 (ЭИ124)	600	1 600	1 550	55	12	46
08Х15Н5Д2Т (ЭП410)	450	1 450	1 350	500	11	43
ХI1Н10М2Т (ЭИ678)	500	1 550	1 480	50	8	46

Наиболее интенсивно упрочняют стали такие легирующие элементы, как Ti и Al. Однако суммарное количество этих элементов не должно превышать 1%.

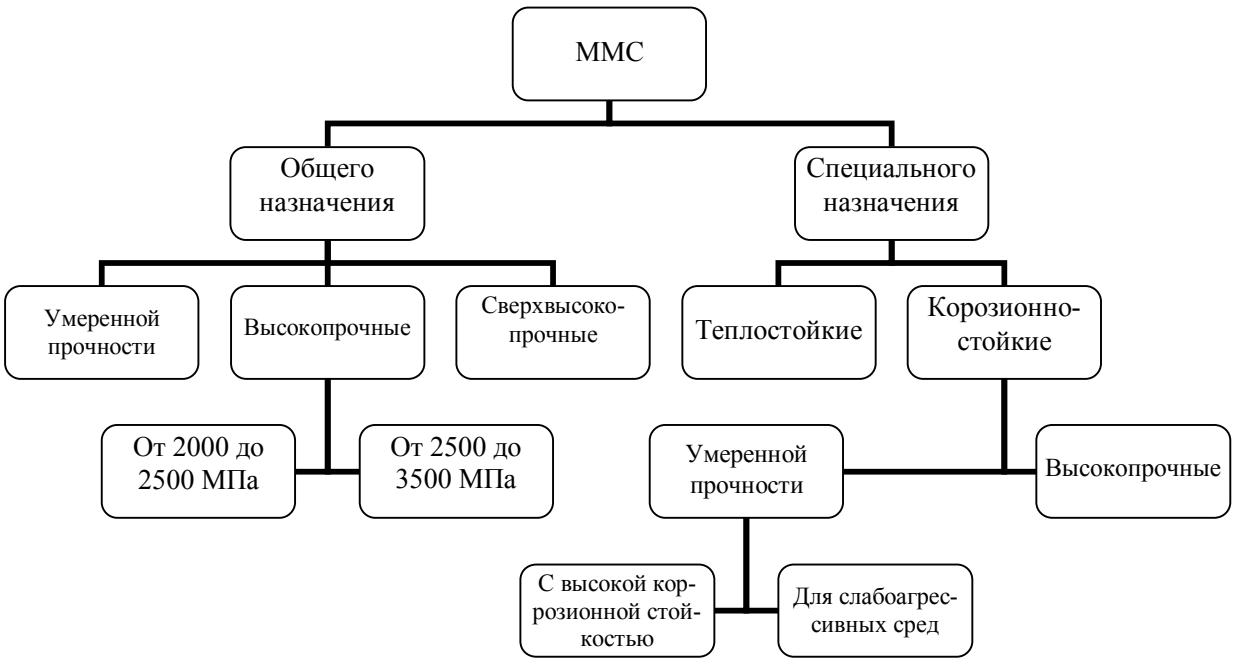


Рисунок 2.1 - Классификация мартенситно-стареющих сталей

При старении мартенсит обедняется легирующими элементами из-за выделения вторичных интерметаллидных фаз типа NiTi, NiTi, NiMo, FeMo, Ni(TiAl). Причем, наибольшее упрочнение сталь достигает на стадии предвыделения, когда интерметаллиды еще когерентно связаны с матричным твердым раствором и имеют малые размеры. При γ→α - превращении получается мартенсит с небольшой твердостью и невысокими прочностными свойствами. При отпуске углеродистых сталей происходит распад мартенсита с образованием ферритокарбидной смеси, что ведет к понижению прочности и твердости.

Мартенситно-стареющие стали применяют для изготовления деталей ответственного назначения, которым нужна высокая прочность и хорошая вязкость при низких и невысоких температурах. Эти стали используют в самолетостроении, ракетостроении, машиностроении, в криогенной технике.

Также эти стали можно использовать для изготовления пружин и упругих элементов, гибких гидравлических шлангов, подшипников и болтов, сосудов высокого давления, в часовой промышленности. Из этих сталей производят полуфабрикаты в виде поковок, сортового проката, листов, полос, лент, труб.

2.5 Подшипниковые стали

Подшипники являются ответственными деталями машин и механизмов. Они во многом определяют точность и производительность металлорежущих станков, надежность электродвигателей, качество автомобилей, тракторов, вагонов и т. д. Отечественная промышленность производит более 5 тысяч типоразмеров подшипников диаметром от 0,5 до 3,0 м.

Стали для подшипников по назначению составляют особую группу конструкционных сталей, но по составу и свойствам они близки к инструментальным сталям.

К особенностям характера работы подшипниковых сталей относятся вы-

сокие локальные нагрузки, и, как следствие этого, чрезвычайно высокие требования к чистоте стали по неметаллическим включениям, карбидной неоднородности и др. Основные требования, которые должны обеспечить подшипниковые стали:

1) Высокая статическая грузоподъемность – предельная нагрузка, при которой остаточные деформации в зоне контакта не превышают 0,01% от диаметра шарика или заэвтектоидных легированных хромом сталей, обработанных на высокую твердость.

2) Высокое сопротивление контактной усталости. Эта характеристика чрезвычайно сильно зависит от наличия металлургических дефектов различного рода, особенно сульфидных и оксидных включений, а также водорода, поскольку подшипниковые стали флокеночувствительны.

При производстве подшипниковых сталей применению рафинирующих переплавов уделяется особое внимание. Рафинирующие переплавы позволяют значительно снизить загрязненность стали неметаллическими включениями, что, естественно, удорожает сталь. Если принять за 100% содержание включений в стали ШХ15 открытой выплавки, то для стали, обработанной синтетическим шлаком (ШХ15Ш), оно составляет 45%, для той же стали вакуумно-дуговой выплавки (ШХ15ВД) - 35%, а для стали, обработанной шлаком и дополнительно переплавленной вакуумно-дуговым способом (ШХ15ШД) - 25%. При этом оставшиеся включения более равномерно распределяются в объеме слитка, уменьшается и средний размер включений.

Не менее вредным фактором, с точки зрения контактной усталости, является карбидная неоднородность (карбидная сетка, строчечные включения карбидов и т. п.). Способ устранения этого дефекта заключается в проведении оптимальной пластической и термической обработки.

Износостойкость, в том числе абразивная, достигается введением сталь ~1,0% C и 1,5% Cr. Влияние хрома на износостойкость определяется тем, что он увеличивает количество карбидной фазы и меняет качественно ее состав, позволяя получать твердые специальные карбиды.

Высокое сопротивление малым пластическим деформациям. Это требование наиболее актуально для подшипников точных приборов.

Размерная стабильность. В зависимости от размеров и класса точности подшипников изменения размеров при эксплуатации не должны превышать 10-4–10-5 мм/мм. Размерная стабильность зависит от содержания остаточного аустенита в стали. При увеличении количества остаточного аустенита размерная стабильность ухудшается, так как остаточный аустенит является нестабильной структурной составляющей и при высоких нагрузках может превращаться в мартенсит, что сопровождается объемными изменениями.

В таблице 2.5 приведены составы некоторых подшипниковых сталей

Таблица 2.5 - Состав и область применения подшипниковых сталей

Марка стали	Содержание основных элементов					Область применения
	C	Si	Mn	Cr	Mo	
ШХ15	0,95–1,05	0,17–0,37	0,20–0,40	1,3–1,65	-	Интервал рабочих температур -60 -+300° С.Для работы в агрессивных средах, для подшипников приборов Интервал рабочих температур 300+500 ºС
ШХ15СГ	0,95–1,05	0,40–0,65	0,90–1,20	1,3–1,65	-	
ШХ20СГ	0,95–1,05	0,55–0,85	1,40–1,70	1,4-1,7	-	
95Х18-Ш	0,9–1,1	0,8	0,7	17–19	-	
11Х18М	1,1-1,2	0,53–0,93	0,5–1,0	16,5–18	0,5–0,8	
8Х4М4В2Ф1Ш	0,75–0,85	0,40	0,40	3,9–4,4	3,9–4,4	
8Х4В9Ф2Ш	0,70–0,80	0,25	0,25	4,0–4,6	0,30	

Подшипниковые стали обычно классифицируются по условиям работы: различают стали общего применения, используемые для изготовления деталей подшипников (колец, шариков, роликов), работающих при температурах от - 60 -+300 °С в неагрессивных средах, и стали специального назначения, предназначенные для изготовления теплостойких и коррозионностойких подшипников. Составы сталей для подшипников общего назначения регламентируются ГОСТ 801–78, а подшипников специального назначения – соответствующими ТУ.

2.6 Пружинные стали

Пружинные стали предназначены для изготовления пружин, упругих элементов, пружинящих деталей приборов и механизмов, а так же рессор различного типа.

По способу изготовления пружинные стали делят на стали, упрочняемые путем пластической деформации и последующего стабилизирующего отпуска (старения), и стали, упрочняемые путем закалки на пересыщенный твердый раствор и последующего отпуска (старения).

Пружинные материалы наиболее часто используют в виде проволоки или ленты, из которых затем путем навивки, резки или вырубки изготовляют пружины и пружинящие детали необходимой конфигурации. При получении пружинной проволоки или ленты нередко применяют совмещенный способ упрочнения, включающий закалку на пересыщенный раствор и пластическую деформацию с последующим отпуском.

По назначению пружинные стали можно разделить на стали общего и специального назначения.

Стали общего назначения предназначены для изготовления изделий, обладающих высоким сопротивлением малым пластическим деформациям (предел упругости) и релаксационной стойкостью, при достаточной пластичности и вязкости, а для пружин, работающих при циклических нагрузках, и высоким сопротивлением усталости. Рабочая температура таких пружин обычно не превышает 100... 120 °С.

Требования к свойствам пружинных сталей определяются условиями работы пружин и механизмов, которые могут быть исключительно разнообразны. Наиболее общим требованием ко всем пружинным сталям является обеспечение высокого сопротивления малым пластическим деформациям (предел упру-

гости) и релаксационной стойкости (сопротивление релаксации напряжений).

Химический состав и свойства пружинных сталей общего назначения регламентируются в ГОСТ 14959-79 (таблица 2.6).

Таблица 2.6 - Химический состав и свойства пружинных сталей общего назначения

Марка стали	Содержание основных элементов,%				$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ
	C	Si	Мп	Сг	МПа		%	
70	0,67 - 0 75	0,17 - 0,37	0,50 - 0,80	<0,25	1050	850	9	30
85	0,82 - 0,90	0,17 - 0,37	0,50 - 0,80	<0,25	1150	1000	8	30
У9А	0,85 - 0,94	0,15 - 0,30	0,15 - 0,30	<0,15	-	-	-	-
У12А	1,15 - 1,24	0,15 - 0,30	0,15 - 0,30	<0,15	-	-	-	-
65Г	0,62 - 0,70	0,17 - 0,37	0,90 - 1,2	<0,25	1000	800	8	30
55ГС	0,52 - 0,60	0,50 - 0,80	0,60 - 0,90	<0,30	-	-	-	-
55ХГР	0,52 - 0,60	0,17 - 0,37	0,90 - 1,2	0,90 - 1,2	1400	1250	5	30
60С2	0,57 - 0,65	1,50 - 2,00	0,60 - 0,90	<0,30	1300	1200	6	25
70С3А	0,60 - 0,74	2,40 - 2,80	0,60 - 0,90	<0,30	1800	1600	6	25
50ХФА	0,46 - 0 54	0,17 - 0 37	0,50 - 0,80	0,80 - 1,1	1300	1100	8	35

Пружинные стали общего назначения в виде проволоки или ленты можно упрочнять холодной пластической деформацией или закалкой на мартенсит с последующим отпуском.

Путем пластической деформации особенно широко обрабатывают углеродистые стали с 0,65 - 1,2% С. Готовые пружины подвергают стабилизирующему отпуску.

Пружинные стали специального назначения кроме высоких значений предела упругости могут иметь еще высокую коррозионную Стойкость, теплостойкость (высокое сопротивление релаксации при Повышенных температурах), немагнитность и др. К таким сталям относятся высоколегированные мартенситные, мартенситно-стареющие и аустенитные стали

В качестве коррозионностойких пружинных сталей применяют мартенситные стали. Для получения высокой коррозионной стойкости стали легируют хромом в количестве более 12% стали типа 30Х13 и 40Х13 после закалки от температур 1000 - 1050 °С и отпуска. Режим отпуска зависит от назначения пружин. Для работы при комнатной температуре применяют отпуск при 300 - 350 °С, а в условиях повышенных температур при 500 - 550 °С. Повышенная прокаливаемость таких сталей позволяет использовать их для пружин больших сечений. Для повышения релаксационной стойкости коррозионностойкие стали мартенситного класса дополнительно легируют вольфрамом, молибденом, ванадием и другими элементами. Так, сталь 12Х12Н2ВМФ имеет рабочую температуру 350 °С, что на 50 °С выше, чем у стали 30Х13.

2.7 Высокопрочные стали

К высокопрочным относятся стали, временное сопротивление которых $\sigma_В$ >1600 МПа (таблица 2.7). Стали с пределом текучести более 2000 МПа иногда называют сверхвысокопрочными.

Получение сталей высокой прочности неизбежно ведет к понижению характеристик пластичности и прежде всего сопротивления хрупкому разрушению. Поэтому надежность стали в конструкции (изделии) может быть охарактеризована конструктивной прочностью - комплексом механических свойств, находящихся в корреляции с эксплуатационными условиями работы изделий.

Таблица 2.7 - Химический состав и свойства высокопрочных сталей

Марка стали	Страна	Содержание элементов (среднее),%					$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ
		C	Si	Cr	Mo	V	МПа		%	
40Х5М2СФ	СССР	0,40	0,9	5,00	1,3	0,6		1720	12,0	40
40Х5М2СФЕ		0,40	0,9	5,00	1,3	0,45	–	1930	12,0	49
40Х5ФСБ		0,40	0,9	5,00	0,5	0,45	–	1630	13,4	41
H11	США	0,40	1,0	5,00	1,40	0,50	1670	2020	9	34
H13		0,40	1,00	5,00	1,30	1,00	1470	1810	5	–
Хро-Мау		0,35	1,00	5,00	1,40	0,30	–	1580	–	–
Пирлесс 56		0,40	1,00	3,25	2,55	0,35	1720	2100	8	–
MOG510	ФРГ	0,40	1,00	5,00	1,50	0,60	–	1920	–	–
HST120	Англия	0,30	0,20	3,00	2,00	0,45		1890	7	
HST140		0,40	0,20	5,00	2,00	0,45	1780	2250	7	
Хекла 174		0,36	1,35	5,30	1,30	1,00	–	2130	4	
H50		0,40	0,63	5,00	1,30	0,80	1400	1980	10	–
Хромоди		0,35	1,00	5,00	1,50	1,00		1720	12,0	40

Высокопрочные стали должны иметь достаточные пластичность, сопротивление динамическим грузкам, ударную вязкость, усталостную прочность, а для ряда изделий и хорошую свариваемость.

При выплавке высокопрочных сталей применяют чистые шихтовые материалы, специальные методы выплавки, повышающие чистоту стали по неметаллическим включениям, газам и вредным Примесям, такие как электрошлаковый переплав, вакуумные способы плавки и др., которые повышают пластичность стали, но при этом и удорожают сталь.

Существуют разные способы получения высокопрочных сталей: закалка на мартенсит с низким отпуском (300-350 °С) и вторичное твердение в интервале температур 500-650 °С, а также ряд специальных технологических процессов, к которым можно отнести термомеханическую обработку, волочение сталей со структурой тонкопластинчатой феррито-карбидной смеси, получение сталей со структурой сверхмелкого зерна и некоторые другие. К высокопрочным сталям относятся пружинные, а также большинство мартенситостареющих сталей (главы XVII и XVIII). Важное значение имеет группа высокопрочных сталей со структурой метастабильного аустенита.

Прежде всего высокопрочные стали применяют в изделиях, для которых важно уменьшение массы при сохранении высокой прочности. Это могут быть высокопрочные болты и крепежные изделия, некоторые виды тросов и прядей, высокоскоростные роторы, валы и многие другие детали машин и механизмов. Высокопрочные стали используют в космической, ракетной, авиационной технике, а также в ряде отраслей приборостроения.

2.8 Рельсовые стали

Производство рельсов в нашей стране составляет около 3,5% от общего производства готового проката, а грузонапряженность железных дорог в 5 раз выше, чем в США, и в 8 - 12 раз выше, чем на дорогах других развитых капиталистических стран. Это налагает особо высокие требования к качеству рельсов и стали для их изготовления.

Рельсы подразделяют:

- по типам Р50, Р65, Р65К (для наружных нитей кривых участков пути), Р75;
- категориям качества: В – рельсы термоупрочненные высшего качества, Т1, Т2 – рельсы термоупрочненные, Н – рельсы нетермоупрочненные;
- наличию болтовых отверстий: с отверстиями на обоих концах, без отверстий;
- способу выплавки стали: М – из мартеновской стали, К – из конвертерной стали, Э – из электростали;
- виду исходных заготовок: из слитков, из непрерывно-литых заготовок (НЛЗ);
- способу противофлокенной обработки: из вакуумированной стали, прошедшие контролируемое охлаждение, прошедшие изотермическую выдержку.

Химический состав рельсовых сталей представлен в табл. 6. в марках стали буквы М, К и Э обозначают способ выплавки стали, цифры – среднюю массовую долю углерода, буквы Ф, С, Х, Т – легирование стали ванадием, кремнием, хромом и титаном соответственно.

Таблица 2.8 - Химический состав рельсовых сталей (ГОСТ 51685 - 2000)

Тип рельса	Марка стали	Массовая доля элементов, мас.%								
		C	Mn	Si	V	Ti	Cr	P	S	Al
								не более		
Р50, Р65, Р75	К78ХСФ Э78ХСФ	0,74-0,82	0,75-1,15	0,40-0,80	0,05-0,15	—	0,40-0,60	0,025	0,025	0,005
	М76Ф	0,71-0,82		0,25-0,60	0,03-0,15		—	0,035	0,040	0,020
	К76Ф Э76Ф							0,025	0,025	
	М76Т				—	0,007-0,025		0,035	0,040	
	К76Т Э76Т							0,025	0,025	
	М76					—		0,035	0,040	0,025
	К76 376							0,025	0,025	

Рельсы железнодорожные широкой колеи типов Р75 и Р65 изготовляют по ГОСТ 24182-80 из мартеновской стали М76 (0,71 - 0,82% С; 0,75 - 1,05% Mn; 0,18 - 0,40% Si; < 0,035% Р и < 0,045% S), и более легкие типа Р50 - из стали М74 (0,69 - 0,80% С).

Рельсовую сталь, содержащую 0,60 – 0,80% С, и аналогичную ей по составу кордовую обычно выплавляют в кислородных конвертерах и дуговых

сталеплавильных печах. Наиболее сложной задачей при производстве этих марок стали является получение низкого содержания фосфора в металле при прекращении продувки на марочном содержании углерода.

После горячей прокатки все рельсы подвергают изотермической обработке для удаления водорода с целью устранения возможности образования флокенов. Рельсы поставляют для эксплуатации на железных дорогах незакаленными (сырыми) по всей длине и термоупрочненными по всей длине. Концы сырых рельсов подвергают поверхностной закалке с прокатного нагрева или с нагрева ТВЧ. Длина закаленного слоя от торца рельса 50 - 80 мм, а твердость закаленной части IIB 311 - 401. Сырые рельсы из стали М76 должны иметь ов > £ 900 МПа и 5 > 4%. Технология изготовления рельсов должна гарантировать отсутствие в них вытянутых вдоль направления прокатки строчек неметаллических включений (глинозема) длиной более 2 мм (группа I) и более 8 мм (группа II), так как подобные строчки служат источником зарождения трещин контактной усталости в процессе эксплуатации.

Высокая грузонапряженность железных дорог привела к тому, что работоспособность сырых нетермоупрочненных рельсов перестала удовлетворять требованиям тяжелой работы сети железных дорог.

Дальнейшее повышение эксплуатационной стойкости термически упрочненных рельсов может быть достигнуто легированием рельсовой стали. Перспективным является легирование углеродистой рельсовой стали небольшими добавками ванадия (-0,05%), применение легированных сталей типа 75ГСТ, 75ХГМФ и др., а так же применение термомеханической обработки.

Контрольные вопросы:

1) Дайте общую классификацию сталей специального назначения?
2) Нержавеющие стали. Их классификация, свойства и область применения?
3) Инструментальные быстрорежущие стали. Их классификация, свойства и область применения?
4) Конструкционные износостойкие стали. Их классификация, свойства и область применения?
5) Мартенситно-стареющие стали. Их классификация, свойства и область применения?
6) Подшипниковые стали. Их классификация, свойства и область применения?
7) Пружинные стали. Их классификация, свойства и область применения?
8) Высокопрочные стали. Их классификация, свойства и область применения?
9) Рельсовые стали. Их классификация, свойства и область применения?

3 Прецизионные стали и сплавы

Среди них прецизионные сплавы, благодаря высокому уровню присущих им свойств, образуют особую группу сплавов.

В эту группу входят:

-магнитно-мягкие и магнитотвёрдые сплавы;

-сплавы с особыми тепловыми характеристиками;

-сплавы с особыми упругими свойствами;

-сверхпроводящие сплавы;

-сплавы с комплексом разнообразных физических свойств.

Промышленное производство прецизионных сплавов было впервые организовано в начале II-ой мировой войны. Подавляющее большинство прецизионных сплавов являются сплавами на основе металлов подгруппы железа: железа (Fe), кобальта (Co) и никеля (Ni). Но с ростом требований к изделиям, обладающим высоким уровнем различных свойств, получили развитие прецизионные сплавы на основе марганца (Mn), хрома (Cr), титана (Ti), ниобия (Nb) и ванадия (V), а также ряда других переходных и редкоземельных металлов.

Прецизионные сплавы находят применение в следующих областях: в машинах прикладной кибернетики; в технологических схемах преобразования энергии из одной формы в другую; в машинах, аппаратах и приборах электроники, радиотехники, космической техники и средствах связи; в устройствах и агрегатах бытовой техники: телефонные, радио-, телевизионные системы, холодильные агрегаты и другие приборы.

3.1 Магнитно-мягкие сплавы

Магнитно-мягкие стали применяют для получения магнитопроводов постоянного и переменного тока, применяемых для изготовления якорей и полюсов машин постоянного тока, роторов и статоров асинхронных двигателей, для магнитных цепей крупных электрических машин, силовых трансформаторов, аппаратов, приборов и т.д.

Общие требования, предъявляемые к магнитно-мягким материалам – высокая магнитная проницаемость μ, низкая коэрцитивная сила НС, а для деталей магнитопроводов, работающих в переменных магнитных полях, – малые потери при перемагничивании и малые потери на вихревые токи Фуко.

Для получения минимальной коэрцитивной силы и высокой магнитной проницаемости ферромагнитный магнитно-мягкий материал должен быть чистым по примесям и неметаллическим включениям, иметь гомогенную структуру (чистый металл или твердый раствор). Даже слабый наклеп снижает магнитную проницаемость и повышает H_C. Поэтому сплав должен быть полностью рекристаллизован для устранения внутренних напряжений, вызываемых наклепом.

Для характеристики явления намагничивания вводится величина I – намагниченность вещества, которая измеряется в А/м, т.е. в тех же единицах, что и напряжённость магнитного поля. Физический смысл намагниченности веще-

ства состоит в том, что она представляет собой векторную сумму магнитных моментов частиц вещества (молекул) в единице его объёма:

$$\bar{I} = \frac{1}{V}\sum_{i=1}^{n} \bar{p}_{mi} ,$$

где $\bar{I}$ - намагниченность вещества, А/м; V – объём вещества, м^3; $\bar{p}_{mi}$ - магнитные моменты отдельных молекул, А·м^2.

Намагниченное вещество создаёт дополнительное магнитное поле с индукцией B', Тл:

$$B' = \mu_0 I ,$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, Гн/м. Это постоянная величина, $\mu_0 = 4\pi\cdot10^{-7}$ Гн/м =1,26·10^{-6} Гн/м.

Намагниченность вещества связана с напряжённостью магнитного поля:

$$I = \kappa H = (\mu - 1)H ,$$

где H – напряжённость магнитного поля электрического тока, намагничивающего ферромагнетик, А/м; κ - магнитная восприимчивость ферромагнетика; μ - относительная магнитная проницаемость ферромагнетика. Величины κ и μ – безразмерные величины. Относительная магнитная проницаемость равна отношению суммарной магнитной индукции поля в веществе (B) к магнитной индукции поля в вакууме ($B_0=\mu_0 H$) в той же точке среды:

$$\mu = \frac{B}{B_0} = \frac{B_0 + B'}{B_0} = 1 + \frac{B'}{B_0} = 1 + \kappa .$$

Отсюда следует, что магнитная восприимчивость ферромагнетика равна отношению дополнительной магнитной индукции к магнитной индукции поля в вакууме в той же точке среды:

$$\kappa = \frac{B'}{B_0}$$

Из этого следует связь между общей магнитной индукцией и напряжённостью магнитного поля:

$$B = B_0 + B' = \mu_0 H + \mu_0 I = \mu_0 (H + I) = \mu_0 \left(H + (\mu - 1)H\right) = \mu_0 (H + \mu H - H) = \mu_0 \mu H .$$

Иногда в справочной литературе напряжённость магнитного поля приво-

дится во внесистемных единицах – эрстедах (э). Соотношение между А/м и э следующее:

$$1\ э = \frac{10^3}{4\pi}\ А/м = 79{,}577\ А.$$

Петлёй гистерезиса называется сложная кривая зависимости магнитной индукции поля (B) или намагниченности ферромагнетика (I) от напряжённости магнитного поля (H), создаваемого переменным синусоидальным электрическим током, в которое помещён ферромагнетик.

При снятии внешнего поля ферромагнетик остаётся намагниченным с остаточной индукцией B_r. Чтобы размагнитить ферромагнетик, нужно снять остаточную индукцию, для этого нужно создать поле противоположного направления.

Напряжённость поля H_C (отрезок 0-3), при которой индукция обращается в нуль, называется коэрцитивной напряжённостью или коэрцитивной силой. Значению – H (точка 4 на рисунке 1) соответствует намагниченность насыщения $-I_H$ (или индукция насыщения $-B_H$) и, соответственно, $+H$ (точка 1 на рисунке 1) – намагниченность насыщения + I_H (или индукция насыщения $+B_H$). За один цикл изменения напряжённости поля от $+H$ до $-H$ на перемагничивание ферромагнетика расходуется энергия, пропорциональная площади петли гистерезиса.

С учётом требований к магнитно-мягким материалам, нужно отметить, что площадь петли гистерезиса у них должна быть минимальной, т.е. петля гистерезиса должна быть достаточно узкой. Для ферромагнетиков (в частности для магнитно-мягких сталей) обычно указывается начальная относительная магнитная проницаемость ($\mu_н$), когда напряжённость поля и индукция близки к нулю, и максимальное значение относительной магнитной проницаемости (μ_{max}), так как зависимость $\mu=f(H)$ проходит через максимум.

К магнитно-мягким сплавам сейчас предъявляются всё более сложные требования: сплавы не должны подвергаться температурным воздействиям, вибрации, воздействию ионизирующих излучений (не должны стареть) и т.д. С 1950 года, когда Эльменом был изобретён пермаллой – классический магнитно-мягкий материал, было разработано несколько десятков магнитно-мягких сплавов, в основном на основе систем Ni-Fe, Co-Fe, Fe-Al, Fe-Si.

Старейшие магнитно-мягкие материалы – это сплавы системы Ni-Fe – пермаллои, которые наиболее полно изучены. В этой системе сплавы делят на две группы: низконикелевые (45-50% Ni) и высоконикелевые (79-83% Ni). Низконикелевые пермаллои (45Н, 50Н, 60НХС) имеют повышенную магнитную проницаемость и индукцию насыщения. Их свойства колеблются в пределах: $\mu_н$ = 2000 – 3000, μ_{max} = 30000-35000 , B_H = 1,0 – 1,5 Тл, H_C = 8 – 16 А/м.

Высоконикелевые пермаллои (79НМ, 81НМА, 80НХС) характеризуются очень высокой магнитной проницаемостью в слабых полях при сравнительно небольшой индукции насыщения и малой коэрцитивной силе: $\mu_н$ = 20000-35000, μ_{max} =(1,0-1,2)·10^5, B_H = 0,7 – 1,1 Тл, H_C = 1,2 – 2,4 А/м. Пермаллои часто

легируют Si, Mo и Cr, что приводит к уменьшению чувствительности к пластической деформации, повышению удельного электросопротивления (уменьшение потерь с вихревыми токами Фуко) и относительной магнитной проницаемости.

Индукцию насыщения B_H повышают присадками в пермаллои кобальта. Зарубежные аналоги таких сплавов получили название «перминвары» (37НКДП, 35НКХСП, 33НКМСП). «П» в обозначениях сплавов означает то, что их подвергают термообработке в магнитном поле.

Нашли применение магнитно-мягкие сплавы на основе системы Co – Fe. Эти сплавы обычно легируют ванадием (50КФ). Зарубежные аналоги таких сплавов получили название «перминдюры». Положительным качеством сплавов этой системы является их способность сохранять ферромагнитные свойства при сравнительно высоких температурах. Основной недостаток этих сплавов – это низкие значения их удельного электросопротивления (ρ).

Ряд магнитных сплавов разработан на основе системы Fe – Al. Среди легированных железоалюминиевых сплавов наиболее широко применяются 16ЮХ и 12ЮК (легированные Cr и Co). Сплавы системы Fe – Al ферромагнитны при содержании алюминия не свыше 17%. Характерное влияние Al в этих сплавах проявляется в увеличении прочности, повышении стойкости к истиранию, росте удельного электросопротивления (ρ). Резервы свойств сплавов на основе системы Fe – Al могут быть увеличены при легировании хромом (Cr) и рением (Re): 16ЮИХ.

Прецизионные сплавы на основе системы Fe – Si содержат кремния не свыше 7%, так как сплавы с большим содержанием кремния непластичны и хрупки. Обычно содержание кремния в прецизионных магнитно-мягких сплавах 3 – 7%. С повышением содержания кремния увеличивается магнитная проницаемость (μ), твёрдость (НВ), прочность ($\sigma_в$). Кроме того, в сплавах Fe – Si при ударных нагрузках, вибрациях, сжатии и колебаниях температур наблюдается большая стабильность магнитных свойств, чем в сплавах системы Ni – Fe.

3.2 Магнитотвёрдые материалы

Эти стали и сплавы применяют для изготовления постоянных магнитов. Магнитная энергия постоянного магнита тем выше, чем больше остаточная магнитная индукция B_r и коэрцитивная сила H_C. Магнитная энергия пропорциональна произведению B_rHc. Поскольку B_r ограничена магнитным насыщением ферромагнетика (железа), увеличение магнитной энергии достигается повышением коэрцитивной силы H_C.

Для получения высокой коэрцитивной силы стали должны иметь неравновесную структуру, обычно - мартенсит с высокой плотностью дефектов строения. Для постоянных магнитов применяю высокоуглеродистые стали с 1% С, легированные хромом (3%) ЕХ3, а также одновременно хромом и кобальтом, ЕХ5К5, ЕХ9К15М2. Легирующие элементы повышают, главным образом, коэрцитивную силу и магнитную энергию, а также улучшают температурную и

механическую стабильность постоянного магнита. Хромистые и кобальтовые стали сравнительно легко обрабатываются давлением и резанием, но обладают относительно малой магнитной энергией. Коэрцитивная сила легированных сталей составляет 4,8-12 кА/м и остаточная индукция 0,8- 1,0 Тл. Наиболее высокие магнитные свойства имеют стали ЕХ5К5, ЕХ9К15М2 после нормализации, высокого отпуска, закалки и низкого отпуска (при 100°С).

В промышленности наиболее широко применяют сплавы типа алнико (ЮНДК15, ЮН14ДК25А, ЮНДК31Т3БА, ЮНДК40Т8АА, ЮНДК35Т5БА, ЮНДК35Т5АА). Сплавы тверды, хрупки и не поддаются деформации, поэтому магниты из них изготовляют литьём.

Высокие магнитные свойства сплавы получают после нагрева до 1250-1280 °С и последующего охлаждения (закалки) с определенной (критической) для каждого сплава скоростью охлаждения; после закалки следует отпуск при 580-600 °С.

Для создания *магнитной* текстуры сплавы типа алнико подвергают термомагнитной обработке: нагреву до 1300 °С и охлаждению со скоростью 0,5-5 °С/с (в зависимости от состава сплава) в магнитном поле, приложенном вдоль направления важного для магнита данной конфигурации. Затем магнит отпускают при 625 °С. После такой обработки магнитные свойства сплавов становятся анизотропными, их магнитные характеристики *(B_r, H_C, $B_r H_C$)* сильно возрастают в направлении приложенного магнитного поля (магнитная текстура).

Для изготовления магнитов применяют и порошковые сплавы Fe–Ni–Al ММК 1 *(H_C* = 24 кА/м, B_r = 0,6 Тл), ММК7 (Нс = 44 кА/м, B_r = 0,95 Тл), ММК11 *(H_C* = 118 кА/м, B_r = 0,7 Тл). Эти сплавы проходят такую же термическую обработку, как и литые сплавы. Сплавы не обладают хрупкостью.

Некоторое применение нашли деформируемые сплавы 52КФА, 52КФБ и 52КФ13 (51–53% Co, 11–13% V, остальное – Fe), изготовляемые в виде проволоки диаметром 0,5–3,0 мм, полос и лент толщиной 0,2–1,3 мм. После закалки и холодной деформации сплавы подвергают отпуску при 600–620 °С. Свойства сплавов после такой обработки: 58–62 HRC, H_C =28 кА/м и B_r=85 Тл (в зависимости от полуфабриката). Сплавы Fe–Ni–Al–Nb, содержащие 8,4–9,8% Al, 3,7–4,2% Nb и 20–25% Ni (остальное Fe), в виде горячекатаных листов используют для изготовления малогабаритных магнитов. В промышленности используют сплавы на основе системы Fe–Co–Cr, достаточно хорошо деформируемые при прокатке. Свойства сплавов типа К23Х31С1 после термической обработки H_C ~ 52,8 кА/м и B_r = 1,15 Тл.

Использование редкоземельных соединений дает возможность создавать материалы для постоянных магнитов малой массы с большой магнитной энергией $B_r Hc$. Наиболее эффективными для этой цели являются интерметаллические соединения кобальта с легкими редкоземельными металлами, такие как $SmCo_5$, $NdCo_5$, $PrCo_5$.

3.3 Сплавы с заданным коэффициентом термического расширения

Сплавы с заданным коэффициентом термического расширения составляют одну из важнейших групп прецизионных сплавов.

Тепловое расширение – это увеличение линейных размеров и объёмов тел, происходящее при увеличении их температуры. Линейное тепловое расширение характерно для твёрдых тел. Объёмное тепловое расширение характерно для твёрдых тел и жидкостей. Линейное тепловое расширение характеризуется коэффициентом α ($К^{-1}$), а объёмное тепловое расширение – коэффициентом β ($К^{-1}$):

$$l = l_0(1 + \alpha t),$$
$$V = V_0(1 + \beta t),$$

где l и V – соответственно длина и объём тела при температуре t, °С; l_0 и V_0 – соответственно длина и объём тела при температуре 0°С. Для твёрдого изотропного тела между коэффициентами α и β существует связь:

$$\beta = 3\alpha .$$

Более точными являются формулы:

$$\Delta l = l_0(at + bt^2)$$
$$l = l_0(1 + at + bt^2)\text{,}$$

где a и b – коэффициенты, определяемые экспериментально для каждого сплава.

Коэффициент линейного расширения изменяется с изменением температурного интервала нагрева тела. Для большинства твёрдых тел $\alpha = (10^{-6} – 10^{-5})$ $К^{-1}$. Например, для чистого железа получена такая зависимость:

$$l = l_0\left(1 + 1{,}17 \cdot 10^{-5} t + 4{,}7 \cdot 10^{-9} t^2\right).$$

Аномалии термического расширения наблюдаются во многих бинарных сплавах. Существует две группы сплавов с заданным коэффициентом термического расширения: сплавы с аномально низким значением коэффициентом термического расширения ($\alpha \approx 10^{-7}$ $К^{-1}$); сплавы с аномально высоким значением коэффициентом термического расширения.

В основе создания той или иной группы сплавов положен принцип экспериментального поиска аномалий коэффициента термического расширения в зависимости от химического состава сплава (рисунок 3.1).

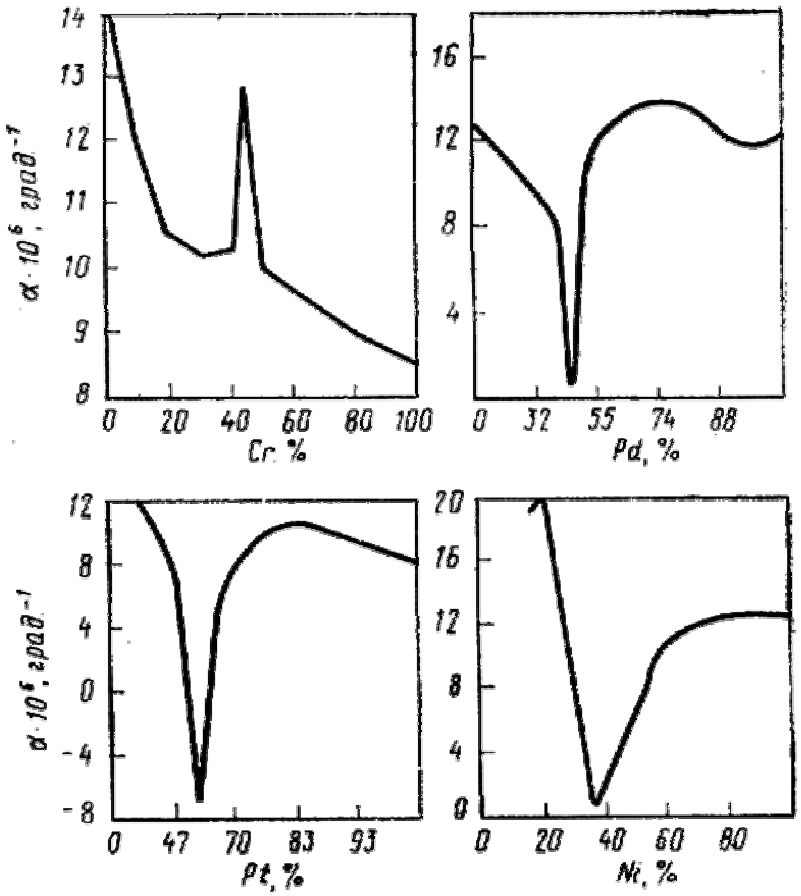


Рисунок 3.1 - Зависимость коэффициента термического расширения от состава для некоторых бинарных сплавов

В зависимости от назначения сплавы с аномалией коэффициента термического расширения должны обладать также хорошими механическими свойствами. Их используют для изготовления измерительных инструментов, которые не должны изменять свои размеры в определённом интервале температур, для изготовления многочисленных устройств вакуумной техники и пр.

Наибольшее применение получили сплавы на основе системы Fe – Ni. Аномалия коэффициента термического расширения сплавов на основе системы Fe – Ni имеет ферромагнитную природу: он минимален лишь в очень узком интервале содержания Ni, где он почти на порядок меньше, чем у чистых железа и никеля.

Среди бинарных железоникелевых сплавов с низким коэффициентом линейного расширения известен и всесторонне изучен сплав инвар. Его аналог – это сплав 36Н. При помощи специальной термомеханической обработки можно ещё более понизить и стабилизировать характерный для инвара весьма низкий коэффициент термического расширения.

Сплав суперинвар (32НКД) имеет ещё более низкий, чем у инвара коэффициент термического расширения и содержит небольшое количество легирующих элементов Co и Cu. Отличительной особенностью сплава 35НКТ является сравнительно высокие механические свойства, приобретаемые в

результате дисперсионного твердения. Основные характеристики сплавов с низким и заданным коэффициентами температурного расширения приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Основные характеристики сплавов с низким и заданным коэффициентами температурного расширения

Сплав	$\alpha_{ср.}\cdot 10^5$, $К^{-1}$	Точка Кюри, °С	ρ, мкОм·м	E, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ,%	H_C, А/м
Сплав с низким коэффициентом температурного расширения							
36Н	1,5 (20 – 100 °С)	220	0,82	14800	447	45	12,7
32НКД	1 (20 – 100 °С)	220	0,78	14100	451	41	12,7
35НКТ	3,5 (20 – 100 °С)	210	0,85	–	1110	17,5	15,1
Сплав с заданным коэффициентом температурного расширения							
47НД	9,5 (20 – 300 °С)	450	0,45	14700	510	40	22,3
47НХР	9,0 (20 – 300 °С)	340	0,9	13700	510	40	19,9
18ХМТФ, 18ХТФ	11,3 (20 – 500 °С)	580	0,62	22000	490	28	127,3

Повсеместное признание получил сплав ковар (29НК). Этот сплав имеет низкий коэффициент температурного расширения в широком интервале положительных и отрицательных температур. Образующиеся в процессе пайки на поверхности этого сплава оксиды легко и полностью растворяются в определённых сортах тугоплавких стёкол, что является предпосылкой получения плотного и прочного спая.

На практике для сплавов, подобных 29НК, требуется ещё больше уменьшить значение коэффициента термического расширения или увеличить температуру Кюри, то есть расширить температурную область использования сплава. Для удовлетворения подобных требований разработаны две модификации сплава 29НК: 30НКД, 33НК.

К сплавам с заданным коэффициентом температурного расширения следует отнести и сплавы с особо высоким коэффициентом температурного расширения. Такие сплавы созданы на основе Mn. Из числа промышленных сплавов на основе Mn следует выделить сплав 75ГНД: он успешно применяется в производстве термостатических биметаллов в качестве их активной составляющей. Сплав с низким коэффициентом температурного расширения используется для изготовления пассивной составляющей. Коэффициент температурного расширения сплава 75ГНД в несколько десятков раз больше, чем у сплавов, применяемых для изготовления пассивной составляющей.

3.4 Сплавы с особыми упругими свойствами

Основное свойство, которыми должны обладать пружинные стали и сплавы со специальными упругими свойствами – высокое сопротивление малым пластическим деформациям в условиях кратковременного (предел упруго-

сти, $\sigma_{упр.}$) и длительного (релаксационная стойкость) нагружения.

$$(\frac{\sigma_0 - \sigma_i}{\sigma_0} \cdot 100\%).$$

Эти свойства зависят от состава и структуры этих материалов и внешних условий: температуры, коррозионной активности внешней среды и др.

Следует особо подчеркнуть, что сопротивление малым пластическим деформациям определяет весь комплекс свойств пружинных сталей и сплавов. Теоретическими исследованиями установлено, что для достижения высокого сопротивления малым пластическим деформациям необходимо обеспечить равномерное распределение дислокаций при их высокой плотности, полном их закреплении, чтобы в максимальной степени затормозить развитие самых начальных стадий пластической деформации. Достижение данного структурного состояния обеспечивается разными механизмами упрочнения или их одновременным использованием.

Наиболее широко используются механизмы упрочнения, основанные на протекании мартенситного превращения ($\gamma \rightarrow \alpha$), на выделении избыточной высокодисперсной фазы, на внутрифазовых превращениях с образованием ближнего упорядочения или ближнего расслоения, на использовании деформационного наклёпа.

Эти материалы классифицируют по основным способам упрочнения и назначению. По основным способам упрочнения различают:

- сплавы, упрочняемые холодной пластической деформацией и последующим низкотемпературным нагревом [стали перлитного класса (0,4-1,2% С);
- стали аустенитного класса; сплавы меди (латуни и бронзы)];
- сплавы, упрочняемые в результате мартенситного превращения $\gamma \rightarrow \alpha$ (мартенситно-стареющие углеродистые и легированные стали);
- сплавы, упрочняемые в результате дисперсного твердения (старения) – это сплавы на основе систем Fe-Ni, Fe-Ni-Cr, Co-Ni-Cr, Ni-Cr и др., с добавками главным образом Ti, Al или Nb, образующих упрочняющие фазы, выделяющиеся в дисперсной форме при последующем старении или отпуске.

По назначению различают пружинные стали и сплавы общего назначения и специального назначения. Пружинные стали общего назначения должны обладать высоким сопротивлением малым пластическим деформациям (предел упругости, $\sigma_{упр.}$), высоким пределам прочности ($\sigma_в$) при достаточной вязкости (KCV, KCU),а также повышенной усталостной прочностью (σ_{-1}) и релаксационной стойкостью ($\sigma_{полз.} \downarrow$); $\frac{\sigma_0 - \sigma_i}{\sigma_0} \cdot 100\%$ -высоко.

К ним относятся:

- углеродистые стали перлитного класса (65, У9А, У12А);
- легированные стали перлитного класса (60Г, 70С3А, 50ХФ);

- стали мартенситного класса (20Х13).

Пружинные стали и сплавы специального назначения кроме вышеперечисленных качеств должны иметь повышенная коррозионная стойкость, немагнитность, малое удельное электросопротивление, независимость модуля упругости от температуры.

Стали и сплавы, относящиеся к этому классу, делятся на следующие группы:

- коррозионно-стойкие;
- немагнитные;
- элинварные ($\frac{\partial E}{\partial T} \to 0$, 30-45% Ni и 6-13% Cr);
- теплостойкие.

Эти стали и сплавы выполняются на основе систем Fe-Ni-Cr, Ni-Cr, Co-Ni-Cr-Mo, которые представляют собой стали мартенситного класса (20Х13), аустенитного класса (12Х18Н9Т), аустенитно-мартенситного класса (09Х15Н8Ю), мартенситно-стареющие стали (03Х12Н10Д2Т), аустенитные сплавы.

Применение сплавов со специальными упругими свойствами непрерывно расширяется. Их выдающиеся свойства:
высокий модуль упругости (E);

- малый температурный коэффициент модуля упругости ($\frac{\partial E}{\partial T} \to 0$);
- высокая прочность ($\sigma_в$,HB);
- высокая коррозионная устойчивость;
- теплостойкость, немагнитность ($\mu \approx 1$).

Основой таких сплавов являются железо, никель и кобальт.

Железоникелевые сплавы имеют минимальное значение модуля упругости при 36% Ni и в то же время наибольший температурный коэффициент $\frac{\partial E}{\partial T}$. Оптимальное сочетание модуля упругости и температурного коэффициента $\frac{\partial E}{\partial T}$ достигается на сплавах с 30-45% Ni. С помощью дополнительного легирования этой основы можно изменять обе эти характеристики в заданных пределах. Эти элементы должны упрочнять твёрдый раствор. Сплавы с минимальным температурным коэффициентом $\frac{\partial E}{\partial T}$ называются элинварами (30-45% Ni и 6-13% Cr). Сплав 35 НХМВ идёт на изготовление волосков – деталей часового механизма. Сплав 42НХТЮА – аналог зарубежного сплава *ниспен*; этот сплав, а также 44НХТЮ, замечателен тем, что изменение температуры не изменяет частоту колебаний изделий из этих материалов.

Сплавы системы Co-Cr-Ni обладают непревзойдёнными упругими и прочностными свойствами (40КХНМ, 40КНХМВ, 40КНХМВТЮ и др.). Упругие элементы, изготавливаемые из этих сплавов, отличаются высокой эксплуатационной долговечностью. Так, пружина из сплава 40КХНМ способна

выдерживать циклические нагрузки в четыре раза больше, чем нагрузки, выдерживаемые пружиной из углеродистой стали. Теплостойкость сплавов граничит с жаропрочностью и жаростойкостью: упругие элементы, изготавливаемые из этих сплавов, могут применяться в устройствах с температурой до 500°С. Легирование этих сплавов увеличивает их прочность. Установлено, что добавка рения Re к сплаву 40 КХНМ повышает твёрдость на 10-12%.

3.5 Сверхпроводящие материалы

Зависимость удельного электросопротивления металлов и сплавов монотонно снижается при уменьшении температуры в довольно широких её пределах:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t),$$

где ρ и ρ_0 – удельное электросопротивление при температуре t и при 0°С соответственно, α - температурный коэффициент сопротивления, $К^{-1}$.

При определённых низких температурах у некоторых металлов удельное сопротивление скачком уменьшается до нуля. Это явление называется *сверхпроводимостью*, оно имеет квантовую природу. Температура перехода в сверхпроводящее состояние – это критическая температура $T_к$. За исключением металлов первой, и восьмой групп периодической системы Д.И. Менделеева и щёлочноземельных металлов, все остальные металлы способны переходить в сверхпроводящее состояние. В сверхпроводящее состояние могут переходить также различные сплавы и химические соединения.

Значения $T_к$ большинства материалов лежат ниже температуры кипения жидкого водорода (20,4 К). Явление сверхпроводимости может быть разрушено сильным магнитным полем, даже если температура металла ниже температуры перехода в сверхпроводящее состояние. Напряжённость такого магнитного поля называется критической напряжённостью $H_{кр}$. Если $H > H_{кр}$, то сверхпроводник переходит в нормальное состояние. С ростом температуры значение $H_{кр}$ уменьшается и при $T \geq T_к$ обращается в нуль. Различают сверхпроводники первого и второго рода по значениям критической напряжённости: если критическая напряжённость имеет порядок нескольких тысяч и выше – это сверхпроводник второго рода, в противном случае – первого. Свойства некоторых сверхпроводников приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Свойства некоторых сверхпроводящих материалов

№ пп*	Вещество	$T_к$, К	$H_к$, кА/м
1	Pb	7,2	63,66
2	Ta	4,5	66,05
3	Sn	3,7	24,67
4	Al	1,2	7,96
5	Zn	0,88	4,22
6	W	0,01	0,08
7	Nb	9,25	318,31
8	65БТ	9,7	7957,75
9	Сплав Ti-Ni	9,8	7957,75
10	V_3Ga	14,5	27852,12
11	Nb_3Sn	18	19894,37
12	$(Nb_3Al)_4Nb_3Ge$	20	–
13	Nb_3Ge	23	–
14	GeTe	0,17	10,35
15	$SrTiO_3$	0,2-0,4	23,87
Примечание: * Вещества 1-6 это сверхпроводники первого рода, 7-12 – сверхпроводники второго рода, 13-15 – полупроводниковые сверхпроводники.			

Одно из важнейших направлений в металлургии прецизионных сплавов – это разработка сплавов обладающими сверхпроводящими свойствами в условиях не сверхнизких температур и сильных магнитных полей. Хотя явление сверхпроводимости было открыто Камерлинг-Онессом давно – в 1911 г., практическое его использование сдерживалось из-за отсутствия жёстких сверхпроводников – сплавов, сочетающих сверхпроводимость в сильных магнитных полях с высокой пластичностью, необходимой для получения ленты и проволоки, используемой при изготовлении сверхмощных малогабаритных электромагнитов. При использовании сверхпроводящих сплавов удаётся создавать мощные и экономически эффективные магнитные установки. Из большого числа разработанных сплавов, особенно эффективными оказались сплавы системы Ti-Nb типа 65БТ, 50БТ, 35 БТ.

Они так пластичны, что могут быть изготовлены в виде тонкой холоднотянутой проволоки и ленты.

Основа сплавов иного типа – это титан, хотя получение особо чистого титана всё ещё сравнительно ложный технологический процесс.

В последние годы в результате исследований были разработаны немагнитные сверхпроводящие сплавы типа 78ТМ, 73ТФ, 73ТФЮ. Их свойства приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 - Свойства сверхпроводников на основе титана

Сплав	λ, Вт/(м·К)	ρ, мкОм·м	$\alpha \cdot 10^3$, $К^{-1}$	$\sigma_в$, МПа	δ,%
78ТМ	9,2	1,3	0,1	1080	10
73ТФ	9,2	1,25	0,2	1100	10
73ТФЮ	7,6	1,4	0,2	1100	9

Малоуглеродистые никелевые стали типа 0Н6А (6-7% Ni), 0Н9А (8,5-9,5%Ni) используют для изготовления сварных конструкций, работающих при температурах до 77 К. Их предел текучести $\sigma_{0,2}$ = 400 – 450 МПа при нормальных температурах, а при 77 К $\sigma_{0,2}$ = 680 – 820 МПа. Ударная вязкость этих сталей при 77 К *KCU* = 1,0 – 1,3 МДж/м^2. Из этих сталей изготовляют цилиндрические и сферические резервуары для хранения и транспортировки сжиженных газов при температуре не ниже 77К.

Аустенитные криогенные стали делят на три группы. К первой группе относятся хромоникелевые стали 08Х18Н10Т и 12Х18Н10Т, получившие наибольшее применение. Из них изготавливают крупногабаритные установки большой мощности для получения сжиженных газов (O_2, N_2, H_2 и др.), транспортные ёмкости и хранилища сжиженных газов. Они хорошо свариваются и обладают большими запасами вязкости при криогенных температурах. Так, при 20К $\sigma_{0,2}$ = 600МПа и *KCU* = 1М Дж/м^2. Ко второй группе сталей относятся сложнолегированные аустенитные стали повышенной прочности 07Х21Г7АН5 и 03Х20Н16АГ5. При 20К у этих сталей $\sigma_{0,2}$ = 1150 – 1350 МПа и *KCU* = 1,0 – 1,3М Дж/м^2. Их применяют для изготовления крупногабаритных сварных конструкций и ёмкостей для транспортировки сжиженных газов. К третьей группе относятся аустенитные стали на хромомарганцевой основе 10Х14Г14Н4Т и 03Х13АГ19. Они используются как заменители дорогостоящих хромоникелевых сталей. Эти стали рекомендуется использовать для изготовления сварных конструкций, работающих при температурах 290 – 77К (03Х13АГ19) и 290 – 20 К (10Х14Г14Н4Т).

3.6 Твёрдые материалы

Твёрдыми называют материалы, изготовленные методами порошковой металлургии и состоящие из карбидов тугоплавких металлов (WC, TiC, TaC), соединённых кобальтовой связкой.

Существуют твёрдые материалы трёх групп: вольфрамовые (ВК3, ВК6, ВК8, ВК10), титан вольфрамовые (Т30К4, Т15К6, Т14К8, Т5К10, Т5К12), титано-тантало-вольфрамовые (ТТ7К12, ТТ8К6, ТТ10К8-Б, ТТ20К9). Если в марке стоит буква «М», например ВК6-М, то материал изготовлен из мелких порошков, «ОМ» – из слабо мелких, а «ВК» – особо крупный карбид вольфрама WC. В марках первые буквы обозначают группу, к которой принадлежит материал ВК – (W), Т – (Ti-W), ТТ – (Ti-Ta-W). Цифры в вольфрамовой группе – это количество кобальта; первые цифры в титановольфрамовой группе – это

количество TiC, а вторые – это количество кобальта; первые цифры в титано-тантало-вольфрамовой группе – это количество карбидов титана и тантала в сумме, а вторые – это количество кобальта.

Для чистовой обработки трудно обрабатываемых материалов и закалённой стали (HRC ≥ 55) используют режущий инструмент, оснащённый пластинами из синтетических поликристаллических сверх твёрдых материалов на основе нитрида бора – композитов. В исходный нитрид бора вводят различные легирующие добавки и наполнители и получают прочно связанные мельчайшие кристаллиты (поликристаллы). К группе сверхтвёрдых материалов относятся: композит 01 (эльбор-Р), композит 02 (белбор), композит 10 (гексанит – Р).

Разработаны твёрдые материалы, не содержащие дефицитного вольфрама. Их выпускают на основе TiC-Ni-Mo (сплав ТН-20) и на основе карбонитрида титана Ti(NC)-Ni-Mo (КНТ-16).

3.7 Жаропрочные стали и сплавы

Жаропрочными называют материалы, способные работать под механическим напряжением при высоких температурах в течение определённого времени и обладающие при этом достаточной жаростойкостью.

Эти материалы применяются для изготовления деталей котлов, газовых турбин, реактивных двигателей, ракет и т. д. При повышении температуры понижается модуль упругости (E), σ_m ($\sigma_{0,2}$) и $\sigma_в$. Следует также иметь ввиду, что даже при $\sigma<\sigma_{0,2}$ происходит деформация металла. Это явление получило название ползучести. Сопротивление материала ползучести и разрушению в области высоких температур называют жаропрочностью. Жаропрочность металлов тем выше, чем выше межатомные силы связи в кристаллической решётке металла. Приближённо можно считать, что чем выше температура плавления металла, тем выше жаропрочность последнего.

Жаропрочные сплавы для работы при высоких температурах (до 700 - 850°С) создают на основе Fe, Ni и Co, а для работы при очень высоких температурах (до 1200 - 1500°С) – на основе Mo, W и других тугоплавких металлов.

Жаропрочные стали благодаря их невысокой стоимости широко применяются в высокотемпературной технике (до 500 - 750°С). При рабочей температуре до 600°С используют стали на основе α-твёрдого раствора, а при более высокой температуре (до 750°С) – стали на основе γ-твёрдого раствора.

К жаропрочным сталям первой группы (на основе α-твёрдого раствора) относятся низколегированные стали перлитного класса 12Х1МФ, 15Х1М1Ф, 12Х2МФСР. Содержание углерода в них 0,08 – 0,2%С. Легирующими элементами в них являются Cr, V, Mo, Nb, Si, B. Также к первой группе жаропрочных сталей относятся стали мартенситного и мартенситно-ферритного класса 15Х11МФ, 18Х12ВМБФР. В зависимости от содержания хрома они относятся к мартенситному (< 10 – 11% Cr) или к мартенситно-

ферритному (11 – 13% Cr) классу. Эти стали помимо жаропрочности обладают и высокой жаростойкостью. Рабочие температуры этой группы сплавов до 580 – 600°С.

К жаропрочным сталям второй группы (на основе γ-твёрдого раствора) относятся легированные стали аустенитного класса. Для получения структуры γ-твёрдого раствора эти стали должны содержать большое количество Ni, Mn и Cr. Для обеспечения достаточной жаропрочности их дополнительно легируют Mo, W, V, Nb и B. Эти стали применяют для деталей, работающих при температурах 500 – 750°С. У этих сталей, однако, затруднена обработка резанием. Аустенитные стали с карбидным упрочнением: 45Х14Н14В2М, 40Х15Н7Г7Ф2МС. Аустенитные стали с интерметаллидным упрочнением: 10Х11Н20Т3Р, 10Х11Н23Т3МР.

Нашли применение сплавы на основе системы Fe-Ni. Их структура – это твёрдый раствор хрома и других элементов в Fe-Ni основе, например это сплавы ХН35ВТЮ (до 0,08% С, 12 – 15% Cr, 33 – 37% Ni), ХН38ВТ (до 0,06 – 0,12% С, 20 – 23% Cr, 33 – 39% Ni). Рабочие температуры этих сплавов не превышают 750°С. Эти сплавы обладают большей пластичностью, чем жаропрочные стали.

Жаропрочные сплавы на основе никеля называются нимониками. Для получения высокой окалиностойкости никель легируют хромом (около 20%), а жаростойкости – титаном (1,0 – 2,8%) и алюминием (0,55 – 5,5%). Примерами таких сплавов являются Х77ТЮР (19 – 22% Cr, 2,6% Ti, 0,8% Al, 0,02% C, 0,01% B) и ХН70ВМТЮ (13 – 16% Cr, 1,8 – 2,3% Ti, 2% Al). Нимоники применяются в литом виде. Литые изделия из нимоников изготавливают методом направленной кристаллизации, обеспечивающей монокристаллическую структуру сплавов. Но такая технология является достаточно сложной. Часто для повышения жаростойкости нимоники алитируют – насыщают их поверхностный слой алюминием.

3.8 Полупроводниковые материалы

Полупроводники – это широкий класс веществ, характеризующихся значениями электропроводности, промежуточными между электропроводностью металлов ($\kappa = 10^6 – 10^8$ Ом$^{-1}$·м$^{-1}$) и диэлектриков ($\kappa = 10^{-10} – 10^{-8}$ Ом$^{-1}$·м$^{-1}$). Характерной особенностью полупроводников, отличающей их от проводников первого рода (металлов), является резкое возрастание электропроводности их с ростом температуры. Как правило, удельная электропроводность полупроводников меняется с температурой по экспоненциальному закону. Для полупроводников, не содержащих примесей:

$$\kappa = \kappa_0 e^{\frac{-\Delta E}{2kT}},$$

где ΔE – ширина запрещённой зоны, эв (1эв = 1,6·10^{-19}Дж).

Электропроводность полупроводников сильно зависит от содержания примесей и наличия дефектов кристаллической решётки, а также от различного рода внешних воздействий (например, различных излучений). Возможность управлять электропроводностью с помощью изменения температуры, легирования и т.д. – это основа применения полупроводников. Свойства некоторых полупроводников приведены в таблице 3.4. В таблице 3.4 u_- и u_+ - это абсолютные подвижности электронов и дырок соответственно. Полупроводники подразделяют на несколько групп по их строению.

Элементы IV группы – Si и Ge – это классические полупроводники. Они наиболее полно изучены и широко применяются в электронике.

Алмазоподобные полупроводники. Это соединения элементов III группы (B, Al, Ga, In) с элементами V группы (P, As, Sb): GaAs, InSb, InP, GaP и др.

Таблица 3.4 - Свойства некоторых полупроводников

Полупроводник	$n_{л.}$, °C	ΔE, эв	u_-, см^2/(В·с)	u_+, см^2/(В·с)
B	2300	1,1	10	10
C (алмаз)	4027	6	1800	1600
Si	1410	1,12	1500	600
Ge	937	0,75	3900	1900
Sn (серое)	–	0,08	3000	–
Te	449	0,36	1700	1200
I	113,5	1,3	25	–
SiC	3100	–	400	50
AlSb	1050	–	200	420
BP	1300	–	200	420
GaN	1700	–	–	–
GaSb	706	–	4000	1400
GaAs	1239	–	8500	400
GaP	1467	–	110	75
InSb	527	–	78000	750
InAs	943	–	33000	460
InP	1060	–	4600	150
CdS	1750	–	300	50
1	2	3	4	5
CdSe	1258	–	800	–
CdTe	1045	1,45	450	100
ZnO	1975	3,2	200	–
ZnS	1650	–	165	–
ZnTe	1240	0,6	100	–
PbS	1114	1,2	650	800
PbSe	1065	0,5	1400	1400
Ag_2Te	955	0,17	4000	100
AgBr	430	1,35	35	–
B_2Te_3	585	0,25	600	–

Элементы V и VI групп и их аналоги: Te, Se, As, Sb, Bi, PbSe, PbS, PbTe, GeTe, SnTe и др.

Соединения элементов IV и VI группы с переходными или редкоземельными металлами и элементами II группы, например с Ti, V, Mn, Fe, Ni, Sm, Eu, Gd, Mg, Hg, Zn, Cd и др., а также другие типы неорганических веществ.

Органические полупроводники. Это некоторые кристаллы и полимеры на основе тетрацианхинодиметана, комплексы на основе перилена, виолантрена и др.

Общим свойством полупроводников является наличие двух типов разноимённо заряженных носителей тока – электронов и дырок. В идеальных кристаллах эти носители всегда появляются парами. Но это не означает, что их вклад в электропроводность одинаков, так как скорость их перемещения различна.

О скорости перемещения электронов и дырок можно судить по их абсолютной подвижности $u_{\pm}$, выражаемой в $м^2/(В \cdot с)$ или $см^2/(В \cdot с)$:

$$u_{\pm} = \frac{V_{\pm}}{E},$$

где $V_{\pm}$ – это скорость движения частиц, м/с; E – напряжённость электрического поля, В/м.

Таким образом, абсолютная подвижность частицы – это скорость её перемещения, приобретаемая в электрическом поле напряжённостью 1В/м. В реальных кристаллах вследствие наличия примесей и дефектов кристаллической решётки, равенство концентраций электронов и дырок нарушается, поэтому электропроводность осуществляется в этом случае преимущественно только одним типом носителей. Примеси в полупроводниках бывают двух типов – донорные и акцепторные. Донорные примеси – это примеси, поставляющие электроны проводимости без возникновения такого же количества дырок. Например, примесь As в кремнии – это донорная примесь, а такой полупроводник называется полупроводником n-типа. Акцепторные примеси – это примеси, захватывающие электроны и создающие тем самым избыточное количество дырок. Например, примесь In в кремнии – это акцепторная примесь, а такой полупроводник называется полупроводником p-типа.

Главные технические задачи полупроводниковой технологии – это получение полупроводниковых материалов с заданными свойствами, включая реализацию сложных полупроводниковых структур (сложных совокупностей p-n переходов). Образование p-n переходов сводится к введению в полупроводник необходимого количества нужных примесей. В настоящее время распространены три способа получения p-n переходов: сплавление, диффузия, ионное внедрение (имплантация).

Основные контролируемые параметры полупроводников:

- химический состав;
- тип проводимости;
- удельная электропроводность;
- время жизни носителей;
- подвижность носителей;
- уровень легирования.

Исходными материалами для создания полупроводниковых приборов являются материалы, которые должны иметь строго заданные состав и структуру. Нередко эти материалы должны обладать исключительно высокой чистотой и совершенством структуры. В этой связи предъявляются очень жёсткие требования к условиям производства по влажности, запылённости, спецодежде и чистоте рук и т.п. Так, одна пылинка в несколько микрон, попавшая на поверхность пластинки в ходе изготовления полупроводника, всегда приводит к неисправимому браку. Поэтому воздух в таких цехах не должен содержать более четырёх пылинок размером ≤0,5мкм в 1 литре.

3.9 Порошковые материалы

Материалы, полученные методами порошковой металлургии, называются порошковыми материалами или спечёнными материалами.

Первые спечённые материалы – это платиновые изделия и полуфабрикаты (чаши, тигли, медали) были изготовлены П.Г. Соболевским и В.В. Любарским в 1826 г. На рубеже XIX – XX веков были изготовлены тугоплавкие спечённые материалы, например, вольфрам, получение которого плавлением ($T_{пл.}$=3680К) было тогда невозможно. Первые композиты из спечённых материалов, которые можно получать только порошковой металлургией были изготовлены в 1900г. Это композит медь – графит для щёток генераторов и электродвигателей). Во время I мировой войны были разработаны магнитодиэлектрики на основе ферромагнитных металлических порошков, распределённых в диэлектрической связке. В начале 30-х годов XX века начали выпускать спечённые твёрдые сплавы на основе систем вольфрам – медь, серебро – графит и др. композиции из спечённых материалов на основе Cu – Sn, Pb, Zn с добавками неметаллических компонентов (обычно SiO_2) для фрикционных дисков.

В дальнейшем производство пористых спечённых материалов непрерывно прогрессировало, и на их основе стали получать: металлические фильтры для тонкой очистки жидкостей и газов; снарядные пояски из пористого железа, заменявшие медные во время II мировой войны; порошковые материалы для топливных элементов; порошковые материалы для антиобледенителей в самолётах; пламегасители во взрывоопасной атмосфере; порошковые материалы для химических реакций; порошковые материалы для транспорта сыпучих материалов в «кипящем» слое и др.

В 30-х годах началось массовое производство спечённых материалов на основе железа и меди в виде точных деталей, не требующих обработки

резанием (шестерни, зубчатые колёса и др.). С 50-х годов для атомной промышленности получают спечённый бериллий, так как литой бериллий крупнозернистый и обладает пониженными механическими свойствами. В конце 60-х начали производить спечённую быстрорежущую сталь. В 70-х годах разработаны теплообменные металлические трубы с пористым слоем из меди, никеля, нержавеющей стали и жаропрочные порошковые суперсплавы на основе никеля.

Последняя по времени возникновения группа спечённых материалов – это высококачественные спечённые материалы, которые по свойствам (прочность, жаропрочность, износостойкость и др.) превосходят литые сплавы аналогичного состава и назначения (у литых сплавов крупнее зерно и есть ликвация). Получены жаростойкие спечённые материалы на основе Ni-Mo, Ni-Cr, Ni-Mo-Cr.

В общем виде технологический процесс порошковой металлургии состоит из четырёх основных этапов:

1) производство порошков;

2) смешивание порошков;

3) уплотнение (прессование, брикетирование);

4) спекание.

Основные способы производства порошковых материалов представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Основные способы получения порошковых материалов

Степень нагруженности деталей	Класс точности	Группа сложности	Низкосерийное производство		Среднесерийное массовое производство	
			Основные технологические операции	Дополнительные операции	Основные технологические операции	Дополнительные операции
Малонагруженные	4-7	1-7	А	М, И, П	А	К, И, П
	1-3	1-7	А	М, И, П	А, Б	К, И, П
Умеренно-нагруженные	4 , 7	1-7	Б , Е . Ж	М, ТО, И, П	Б, Е, Ж	И, П
	1 , 3	1-4	Б	М, ТО, И, П	Б	ТО, И, П
		5 , 7	Б	ТО, Д, И, П	Б	ТО, Д, И, П
Средне-нагруженные	4-7	1-7	Г, Е, Ж	М, ТО, П	Г , Е , Ж	ТО, П
	1-3	1-7	В, Г, Ж	ТО, Д, П	В, Г, Ж	ТО, П, Д
Тяжело-нагруженные	4-7	1-7	В, Г, Н	М, ТО, П	В, Г, Н	ТО, П
	1-3	1-7	В, Г, Н	ТО, Д, П	В, Г, Н	ТО, Д, П

Примечание: А – холодное прессование + спекание. Б – двойное прессование + спекание. В – холодное прессование + спекание + холодная штамповка + отжиг. Г – холодное прессование + спекание + горячая штамповка + отжиг. Д – шлифовка или доводка. Е – холодное прессование + пропитка легким металлом. Ж – спекание порошка в форме + пропитка легким металлом. И – пропитка кремнийорганической жидкостью и полимеризация. К – калибровка. М – механическая обработка. Н – холодное прессование + спекание + горячая штамповка с истечением металла + отжиг. П – нанесение покрытий. ТО – термическая обработка

Производство порошковых материалов развивается в связи с рядом их преимуществ по сравнению с металлическими материалами, получаемыми

плавлением. Путём плавления трудно или даже невозможно производить материалы с некоторыми особенностями свойств и состава: композиции из металлических и неметаллических материалов и псевдосплавы из компонентов, не смешивающихся в жидком виде (Fe-Pb, W-Cu и др.); пористые металлы и материалы (самосмазывающиеся подшипники, например). Их можно изготовить только способами порошковой металлургии. Путём спекания получают сразу готовые изделия, не требующие дальнейшей обработки резанием. Спечённые материалы в ряде случаев имеют более высокий уровень свойств, чем аналогичные материалы, получаемые плавлением (например, некоторые быстрорежущие и твёрдые материалы, жаропрочные сплавы, бериллий и др.).

Производство спечённых материалов развивается более высокими темпами, чем получение плавленых металлических материалов, так с 1964 по 1972 годы выпуск спечённых материалов в США возрос в 2,5 раза, а в Японии в 4 раза.

Имеются следующие ограничения по применению спечённых материалов:

- наибольший экономический эффект возможен лишь при достаточно массовом выпуске деталей;
- высокая стоимость исходных порошков;
- необходимость получения достаточно чистых по примесям исходных порошков, особенно железа и его сплавов, так как спечённые материалы не могут быть эффективно очищены от примесей, находящихся в исходных материалах.

Последнее ограничение постепенно теряет своё значение ввиду расширения производства порошков методом распыления расплава железа.

Контрольные вопросы:

1) Что подразумевают под прецизионными сталями и сплавами?
2) Дайте общую классификацию прецизионным сталям и сплавам?
3) Магнитно-мягкие сплавы. Общие понятия и область применения?
4) Магнитотвёрдые материалы. Общие понятия и область применения?
5) Сплавы с заданным коэффициентом термического расширения. Общие понятия и область применения?
6) Сплавы с особыми упругими свойствами. Общие понятия и область применения?
7) Сверхпроводящие материалы. Общие понятия и область применения?
8) Твёрдые материалы. Общие понятия и область применения?
9) Жаропрочные стали и сплавы. Общие понятия и область применения?
10) Полупроводниковые материалы. Общие понятия и область применения?
11) Порошковые материалы. Общие понятия и область применения?

4 Способы получения металлов и сплавов особо высокого качества

4.1 Основные способы рафинирования спецсталей

Традиционными методами выплавки и разливки в ряде случаев нельзя получить металл требуемого качества. Взаимодействие жидкой стати в процессе выплавки и разливки с огнеупорными материалами, шлаком и атмосферой неизбежно приводит к значительному загрязнению металла неметаллическими включениями и газами. Затвердевание металла в чугунных изложницах сопровождается дефектами кристаллизационного (усадочные раковины, пористость, трещины и т.д.) и ликвационного происхождения.

Для повышения чистоты металлов и улучшения их физико-химических свойств металлурги используют различные виды воздействия на металл. Эти виды воздействия можно условно разделить на четыре группы:

1) применение шлаков или газов в качестве рафинирующих реагентов для проведения реакций дефосфорации и десульфурации, экстрактивного удаления из металла растворенных газов и неметаллических включений;

2) повышение температуры металлов, которое приводит к интенсификации процессов раскисления их растворенным углеродом, всплыванию неметаллических включений и т.д.;

3) вакуумирование металла, значительно повышающее раскислительную способность углерода и снижающее содержание растворенных газов и легкоплавких примесей цветных металлов, а также неметаллических включений в результате их флотации при барботировании металла;

4) принудительная кристаллизация в водоохлаждаемых кристаллизаторах, что дает возможность, регулируя скорость кристаллизации, получать желаемую макроструктуру, повышать плотность металла, оттеснять в металлическую ванну неметаллические включения с низкой адгезией, получать слитки без зональной ликвации, газовых пузырей и практически без усадочных раковин.

В конце 50-х - начале 60-х годов XX в. с началом освоения на заводах качественной металлургии процессов электрошлакового переплава (ЭШП) и вакуумно-дугового переплава (ВДП), а затем и вакуумно-индукциоиного переплава (ВИИ) связано рождение новой промышленной отрасли - специальной электрометаллургии (СЭМ). Эти и последующие годы ознаменовались значительными успехами в повышении качества металла, что главным образом связано с успешным развитием процессов ВИП, ВДП, ЭШП, электронно-лучевого переплава (ЭЛП), плазменно-дугового переплава (ПДП). Успехи специальной металлургии связаны с применением одного или нескольких рафинирующих воздействий для коренного улучшения качества металла.

В таблице 4.1 показано, как при различных процессах рафинирующей обработки используются эти средства повышения качества металла. Наиболее прогрессивными являются процессы переплава, так как они позволяют одновременно использовать почти все средства.

Таблица 4.1 - Эффективность различных способов обработки металла

Способ производства	Рафинирование ишаком и газом	Перегрев металла	Вакуумирование	Принудительная кристаллизация
Вакуумирование в ковше при разливке	–	–	+	–
Обработка синтетическим шлаком в ковше	+	–	–	–
Продувка металла в ковше газом	+	–	–	–
Вакуумно-индукционная плавка	–	–	+	–
Вакуумно-дуговой переплав	–	+	+	+
Электрошлаковый переплав	+	+	–	–
Электроннолучевой переплав	–	+	+	+
Плазменно-дуговой переплав в регулируемой атмосфере	+	+	–	+
Плазменный переплав в вакууме	–	+	+	+

Переплавные процессы объединены в особую группу специальной электрометаллургии - вторичные рафинирующие процессы. Общими для них являются переплав расходуемых заготовок (электродов), капельный перенос переплавляемого металла, последовательная кристаллизация его в водоохлаждаемом кристаллизаторе. Во всех этих процессах используется электрический источник тепла, под действием которого металл плавится. В то же время вторичные рафинирующие процессы различаются характером преобразования электрической энергии в тепловую, наличием или отсутствием вакуума и шлака в плавильном пространстве и рядом других особенностей.

Источником нагрева при ПДП является энергия дугового разряда, при ЭЛП - энергия электронного луча, при ЭШП - тепло, выделяемое при прохождении тока через шлак, при ПДП - низкотемпературная плазма, температура которой колеблется в пределах 5000 - 30000 К.

ЭШП, ВДП, ЭЛП и ПДП являются высокоэффективными рафинирующими процессами, гак как они повышают общую чистоту металла, снижают содержание в нем вредных примесей, а получаемый слиток имеет минимальное развитие физической и химической неоднородности. Указанные процессы позволяют устранить ликвациопные и усадочные дефекты, повысить служебные характеристики металла.

Электрошлаковый переплав - отечественный способ улучшения качества сталей и сплавов, разработанный в 1952 г. в Институте электросварки им. Е.О. Патона при академии наук СССР. Он широко применяется для производства

шарикоподшипниковых, быстрорежущих, нержавеющих, теплоустойчивых, жароупорных сталей и жаропрочных сплавов. В последние годы способ ЭШП начали интенсивно развивать за рубежом, однако до настоящего времени приоритет в развитых капиталистических странах принадлежит вакуумно-дуговому переплаву (ВДП). В значительно меньшей степени за рубежом и в России используется электронно-лучевой переплав (ЭЛП).

Плазменно-дуговой переплав, так же как и электрошлаковый переплав, - отечественный способ вторичного рафинирования стали. Первый слиток методом ПДП получен в 1963 г. в Институте электросварки им. Е.О. Патона АН СССР. В создании и разработке метода плазменно-дугового переплава активное участие приняли Институт металлургии им. А.А. Байкова при академии наук СССР, Московский институт стали и сплавов, а также ряд других организаций, в том числе и металлургических предприятий. Отечественные разработки в области плазменно-дугового переплава занимают главенствующие позиции, что подтверждается патентованием способа и оборудования ПДП в развитых странах. Зарубежные фирмы проявляют интерес к указанному виду переплава и работают над технологическими схемами переплава и созданием мощных плазмотронов.

К началу 90-х годов прошлого века на отечественных предприятиях насчитывалось около 120 печей ЭШП, 70 печей ВДП, 3 печи ЭЛП и 3 печи ПДП. Па печах ЭШП производили около 400 - 450 тыс. т стали. ВДП - 100 - 110 тыс. т. В настоящее время во всем мире только методом ЭШП производят около 800 - 900 тыс. т стали с ежегодным приростом 10%. Выплавка металла методами спецэлектрометаллургии составляет 15% от объема выплавки электростали и продолжает наращиваться.

Сортамент сталей и сплавов, выплавляемых методами спецэлектрометаллургии включает более 300 различных по своему химическому составу и назначению сталей и сплавов. Это высоколегированные жаропрочные сплавы на никелевой и хроможелезоникелсвой основе, нержавеющие стали, высокопрочные мартенситностареющие стали, стали и сплавы специального назначения, дисперсионно-твердеющие жаропрочные суперсплавы нового поколения.

В обобщенном виде сортамент легированных сталей и сплавов по методам выплавки распределяется следующим образом:

Конструкционные:	
-цементуемые и улучшаемые	ЭШП, ВДП;
-высокопрочные	ВДП, ВИП+ВДП;
-углеродистые	ЭШП, ПДП;
Коррозионно-стойкие	ВДП, ВИП, ЭШП, ЭЛП, ПДП;
Сварочные	ВИП;
Высокопрочные мартенситиостареющие	ВИП, ВИП+ВДП, ВИП+ЭЛП;
Жаропрочные и жаростойкие сплавы	ВИП. ВИП+ВДП, ВИП+ЭЛП;
Приборные стали и сплавы, прецизионные	ВИП, ВИП+ВДП. ВИП+ЭЛП, ПДП.

Распределение марочного состава по объему выплавки методами

спецэлектрометаллургии на примере ОАО «Мечел» приведено ниже. Метод ВИП:

- 55% нержавеющие и коррозионно-стойкие стали типа 03Х181112, 08Х 18Н1 ОТ, ЭИВ44, Э11543У;
- 29% жаропрочные сплавы типа ЭП718 и ЭП696.
- 15% мягкое железо, специальные и прецизионные стали и сплавы типа ЭП-678, ЭП637А, 29НК.

Более 70% объема металла, получаемого методом ВИП, идет на электроды для ВДП.

Метод ВДП:

- 75% конструкционные стали типа 30ХГСИ2А, 55СМ5ФА, СН28(33) и др.;
- 20% нержавеющие и специальные коррозионно-стойкие стали типа 12Х181 ПОТ, ОИ810, ЭП494 и др.;
- 3% жаропрочные сплавы типа ЭП718, ЭИ698, ЭП742;
- 2% другие марки.

Каждый из рассмотренных методов имеет свою сферу применения в зависимости от сортамента и требований, предъявляемых к стали. Некоторые марки стали ответственного назначения могут выплавляться только способами спецэлектрометаллургии.

Основными способами, позволяющими получать весьма чистые стали и сплавы методами спецэлектрометаллургии, являются:

- плавка в вакууме;
- воздействие на металл плазменной дугой;
- вторичный переплав металла в кристаллизатор.

Вакуум используется в процессах ВИП, ВДП, ВДП и ЭЛП, плазма - в процессах ВИП, ПДП, вторичный рафинирующий переплав - в процессах ВДП, ВИП, ЭЛП, ЭШП и ПДП.

Использование вакуума для рафинирования стали

Вакуумирование стали [steel vacuum treatment (processing)] - обработка жидкой стали под вакуумом с целью улучшения ее качества за счет уменьшения в ней содержания газов (H_2, N_2, O_2) и неметаллических включений, а при специальных методах выплавки и некоторых других элементов (например, Mn, Pb, Zn, Cu).

Основная идея технологии вакуумной обработки стали основана на термодинамической возможности смещения равновесия химических реакций в сторону выделения газообразных продуктов в результате снижения атмосферного давления. Прежде всего, это относится к растворенным в стали водороду, азоту, а также кислороду. При этом в результате химической реакции с углеродом кислород выделяется из расплава в виде CO и CO_2, обеспечивая, наряду с раскислением, обезуглероживание стали по реакции 4.1.

$$[C] + [O] = CO_{газ};\ K = p_{CO} / a_{[C]} \cdot a_{[O]} \qquad (4.1)$$

Как отмечалось выше, равновесие реакции 4.1 сдвигается вправо, кислород реагирует с углеродом, образуя оксид углерода (II). Из этого следует, что обработка стали в вакууме позволяет уменьшить концентрацию кислорода в расплаве пропорционально снижению остаточного давления.

В тех случаях, когда кислород в металле находится в составе оксидных неметаллических включений, снижение давления над расплавом приводит к частичному или полному их разрушению по реакции 4.2.

$$(MeO) + [C] = [Me] + CO_{Г}. \qquad (4.2)$$

При этом такие оксиды, как MnO или Cr_2O_3, восстанавливаются почти полностью. Для восстановления более прочных включений, ($A1_2O_3$ или TiO_2) требуется очень глубокий вакуум.

Обработка металла вакуумом также влияет на содержание в стали водорода и азота.

Процесс очищения металла от водорода и азота под вакуумом ускоряется одновременно протекающим процессом выделения пузырьков окиси углерода. Эти пузырьки интенсивно перемешивают металл и сами являются маленькими «вакуумными камерами», так как в пузырьке, состоящем только из CO, парциальные давления водород и азота равны нулю ($P_{H2} = 0$ и $P_{N2} = 0$).

Максимальная степень рафинирования стали, достигается благодаря выполнению следующих условий:

- создание максимального разряжения над жидким металлом;
- максимальная поверхность взаимодействия между металлом и вакуумом;
- достаточное время взаимодействия металла с вакуумом.

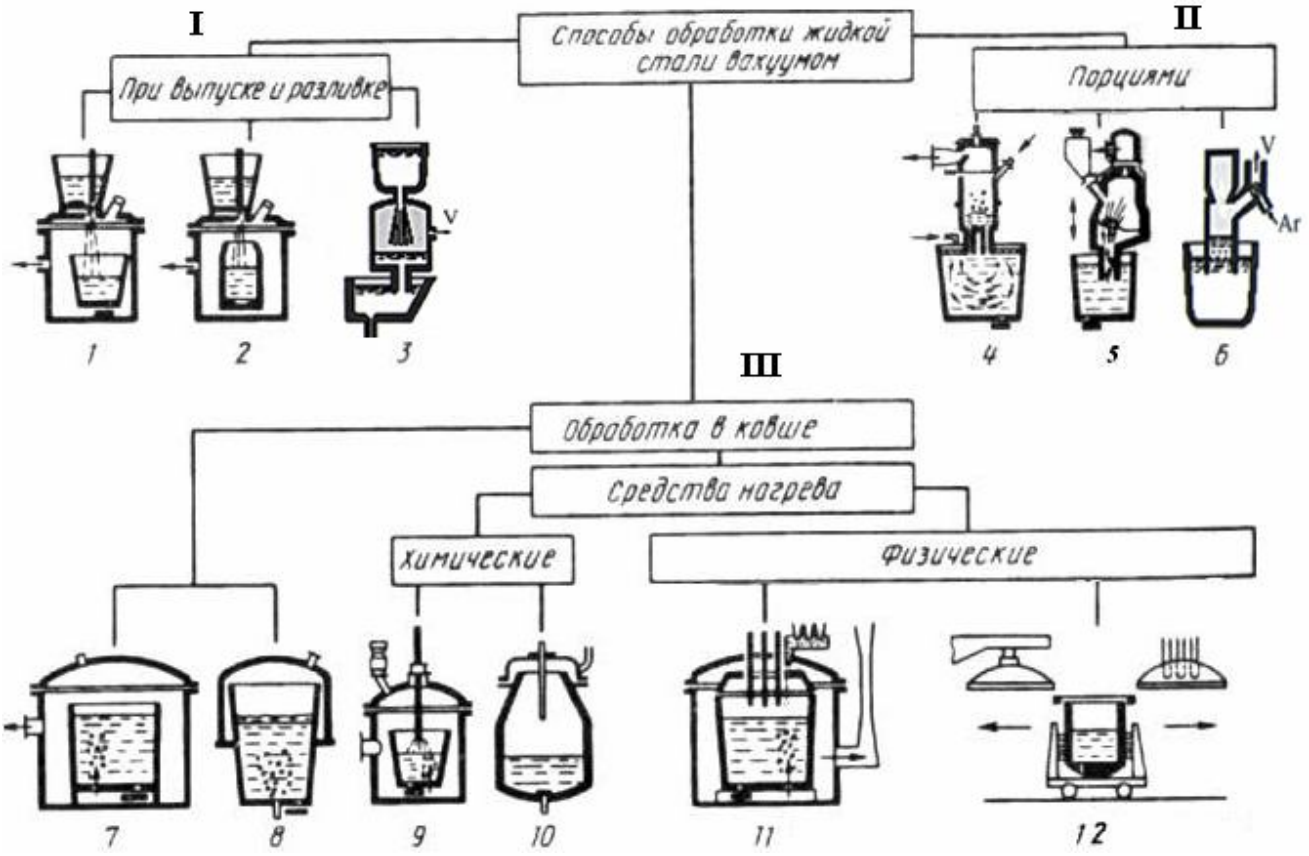
Для обеспечения достаточной площади поверхности раздела фаз вакуумную обработку раскисленной стали совмещают с продувкой расплава инертным газом. При продувке, массу металла пронизывают тысячи пузырьков инертного газа (обычно аргона). При этом под вакуумом достижим принципиально новый количественный результат перемешивания металла инертным газом, так как величина мощности перемешивания при снижении давления увеличивается в 4-5 раз. Следует отметить, что при атмосферном давлении такая величина мощности перемешивания практически недостижима [1, 3].

Таким образом использование вакуума позволяет обеспечить глубокую дегазацию металла (удаление [O], [H], [N]), снизить содержание углерода и неметаллических включений. Кроме того происходит усреднение химического состава и выравнивание температуры по всему объему металла.

Кроме того, в тех случаях, когда металл содержит в повышенных концентрациях примеси цветных металлов (свинца, сурьмы, олова, цинка и др.), заметная часть их при обработке вакуумом испаряется. Примеси цветных металлов в некоторых случаях, особенно при производстве высокопрочных сплавов, заметно ухудшают свойства металла, и обработка вакуумом является по существу единственным способом уменьшить это вредное влияние.

Поэтому обработка стали вакуумом используют при производстве сталей высокого качества, необходимых для производства целого ряда изделий авиационной, радиоэлектронной, приборостроительной промышленности, а также для изготовления конструкций (например, трубопроводов, мостов и т. п.), работающих на крайнем Севере, для космической техники и т. п.

В настоящее время в промышленно развитых странах успешно работают сотни установок внепечного вакуумирования различной конструкции. Схемы наиболее распространенных конструкций представлены на рисунке 4.1.[5].



I – вакуумирование в струе: 1– при переливе из ковша в ковш; 2 – при разливки в изложницу; 3 – поточное вакуумирование;

II – вакуумирование в вакуум-камере: 4 – циркуляционное вакуумирование; 5 – порционное вакуумирование; 6 – поточное вакуумирование;

III – вакуумирование металла в ковше: 7, 8 – вакуум-кислородное рафинирование; 9, 10 – вакуум-кислородное рафинирование; 11, 12 – комбинированные с дуговым нагревом и вакуумированием.

Рисунок 4.1 – Способы вакуумирования стали

На современном рынке высококачественных сталей постоянно растет спрос на продукцию, отвечающую строгим требованиям по минимизации содержания углерода и вредных примесей, поэтому во всем мире увеличиваются объемы выпуска вакуумированной стали.

Воздействие на металл плазменной дугой.

Плазму из-за особенностей протекания в ней физико-химических процессов относят к четвертому агрегатному состоянию вещества. В технике, в том числе и в металлургии, используют низкотемпературную плазму, получаемую за счет электрического разряда в газах, степень ионизации которой, как правило, составляет 1 - 2%. Частица в такой плазме обладает энергией в пределах 0,5 - 3 эВ. В связи с тем что 1эВ соответствует энергии теплового движения при температуре около 11600 К, область существования используемой в металлургии плазмы находится в интервале температур 5-103 - 50-103 К.

Плазменное состояние вещества характеризуется наличием заряженных частиц, которые в отличие от нейтральных молекул обычного газа взаимодействуют друг с другом на больших расстояниях. Общий заряд плазмы равен нулю, т.е. плазма квазинейтральна.

Плазмообразующие газы могут состоять из чистых газов или их смесей, т.е. быть одно- и многокомпонентными. От состава плазмообразующего газа зависят конструкция и энергетические параметры плазматрона, тип и электрический режим источника питания, основные технологические и экономические показатели металлургического процесса.

В качестве плазмообразующей среды применяют аргон, гелий, азот и водород. Подбором состава компонентов можно создать любую среду:

- окислительную, например кислородсодержащие смеси при плазменной резке;
- восстановительную, например водородсодержащие смеси для рафинирования металлов.

При вторичных рафинирующих процессах направленное затвердевание обеспечивается применением водоохлаждаемого поддона и тепловой изоляцией боковых стенок кристаллизатора в сочетании с наличием теплового центра в головной части слитка.

Условия ведения переплавных процессов позволяют получить химически и физически однородные слитки с минимальным содержанием вредных примесей.

Взаимодействие жидкого металла с рафинирующей средой происходит на трех стадиях переплава:

1 - пленке жидкого металла на торце расходуемой заготовки (электрода);

2 - поверхности капли, перемещающейся от заготовки (электрода) к ванне жидкого металла;

3 - поверхности плоской металлической ванны.

Несмотря на то что рафинирующей средой при ПДП является плазменная дуга, при ЭЛП - электронный луч, при ВДП - вакуумная дуга, при ЭШП - шлак, существуют общие закономерности, характерные для переплавных процессов.

К общим закономерностям, протекающих в переплавных процессах относятся химические реакции, протекающие между металлом и рафинирующей средой, которые являются гетерогенными. Например, поглощение и выделение газовых примесей, рафинирование от

неметаллических включений и примесей цветных металлов, взаимодействие расплавленного металла со шлаком и газами и т.п. - все это гетерогенные процессы.

Гетерогенные процессы характеризуются наличием многих стадий, основными из которых являются три: 1-я - перенос (диффузия) реагирующих веществ к поверхности раздела фаз - реакционной зоне, 2-я - собственно химическая реакция, 3-я - отвод продукта реакции из реакционной зоны.

Кроме того существенную роль в переплавных процессах играет процесс каплеобразования, который носит ярко выраженный периодический характер: после ухода предыдущей капли расплавленный металл остается в пленке большую часть периода каплеобразования, во время которого происходит его перегрев, необходимый для преодоления сил поверхностного натяжения. Металл стекает и накапливается на конце конуса электрода, а затем отделяется в виде капли.

Преимущественным протеканием процессов рафинирования на поверхности переплавляемой заготовки и в ванне жидкого металла объясняется возможность получения чистого металла при переплавных процессах.

4.2 Сравнительный анализ методов получения спецсталей

В настоящее время новые методы внепечной обработки жидкой стали обеспечивают весьма глубокое рафинирование металла, а установки непрерывной разливки – благоприятные условия кристаллизации. Поэтому более дорогие методы переплава используются лишь тогда, когда к качеству металла предъявляются особые требования.

Наиболее широкое распространение получили следующие переплавные процессы: вакуумный индукционный переплав (ВИП), вакуумный дуговой переплав (ВДП), плазменный дуговой переплав (ПДП), электрошлаковый переплав (ЭШП), электронно-лучевой переплав (ЭЛП) и другие. Сравнительный анализ данных процессов представлен в таблице 4.2 и таблице 4.3.

Кроме того, необходимо отметить, что в настоящие время широко распространение получило технология внедрения в производство сочетаний различных методов выплавки металла методами спецэлектрометаллургии - метод ИД (ВИП+ВДП), метод ИЛ (ВИП+ЭЛП), ЭШП+ВДП и др. Это значительно расширяет номенклатуру сталей, подвергающихся переработке, и технологические возможности последующих переделов.

Таблица 4.2 - Сопоставление основных технологических показателей работы переплавных процессов

Показатель	ВИП	ВДП	ЭЛП	ЭШП	ПДП
Источник энергии	Индукционный нагрев	Электрическая дуга	Электронный луч	Нагрев сопротивлением	Плазменная дуга
Футеровка	Огнеупоры	Медный водоохлаждаемый тигель			
Максимальная масса слитка	30	56	18	160	6
Возможные сечения слитка	Круглое, квадратное прямоугольное	Круглое	Круглое, квадратное прямоугольное	Круглое, прямоугольное, квадратное фигурное	Круглое
Шихтовые материалы	Одна или несколько деформированных или литых заготовок	Одна деформированная или литая заготовка	Одна или несколько деформированных или литых заготовок	Литые или деформированные заготовки	То же, что и при ВДП
Требования к подготовке поверхности заготовки	Механическая или наждачная обработка поверхности	Механическая или наждачная обработка поверхности	То же, что и при ВДП	Возможен переплав без подготовки поверхности заготовки	То же, что н при ВДП
Присадка легирующих	Возможна	Невозможна	Возможно в печах с промежуточной емкостью или при холодном деформировании	Невозможна	То же. что и при ВДП
Возможность модифицирования металла	Возможно	Исключается	Возможна в печах с промежуточной емкостью иди при холодном деформировании	Возможно (в результате взаимодействия со шлаком специального состава)	То же, что и при ВДП
Температурный режим	Зона высоких температур, возможно регулирование	Зона высокой температуры, не поддающаяся регулированию	Зона высокой температуры (в фокусе), возможен перегрев расплавляемого материала	Зона высоких температур, возможно регулирование	То же, что при ЭШП
Реакции со шлаком	Возможны	Невозможны	Возможны в специальных случаях	Составляют суть способа	Возможны
Расход энергии, кВт-ч/кг	1,0	1,0	1 - 2	1,0	1,2
Производительность, кг/с (т/ч)	Ориентировочно до 0,11 (0,40)	Ориентировочно в крупных печах до 0,15 (0,54)	До 0,101 (0,36)	Ориентировочно в крупных печах до 0,15 (0,54)	0,15. ..0,157 (0.5 - 0,6)
Удаление: кислорода водорода, азота	Возможно, Возможно, Возможно	Полное, Приблизительно до достижения равновесия, Ограниченное	Полное, приблизительно до достижения равновесия, ограниченное	Значительное снижение, Не наблюдается, Не наблюдается	Возможно, Возможно, Возможно
Эффект испарения	Зависит от условий плавки	Отмечается увеличение потерь на испарение тяжелых металлов при переходе от ВДП к ЭЛП.	Практически не наблюдается	Зависит от условий плавки	Зависит от условий плавки

Таблица 4.3 - Основные технологические особенности удаления вредных примесей методами спецэлектрометаллургии

Технологический фактор	ВИП	ВДП	ЭЛП	ЭШП	ПДП
Снижение содержания кислорода	Возможно при введении дополнительных металлических раскислителей до 0,001 - 0,003% [О]	Возможно при переплаве хорошо раскисленного металла до 0,001.„0,003% [О]	Возможно при переплаве хорошо раскисленного металла до 0,001% [О]	Возможно до 0,002..0,003%[О]	Невозможно
Снижение содержания водорода	Возможна глубокая дегазация и высокая степень удаления водорода	То же. что и при ВИП	То же. что и при ВИП	Возможно повышение содержания водорода при повышенном в атмосфере	Возможно в вакууме
Снижение содержания азота	Достигается высокая степень удаления азота (до 80%), ограничивается только временем пребывания металла в жидком состоянии	Степень удаления азота составляет 30 - 35%	Степень удаления азота достигает 50. ..80%	Практически не происходит	То же, что и при ВДП
Снижение содержания серы	Возможно при использовании шлаков различного состава И футеровки на основе СаО	Не удаляется	Не удаляется	В зависимости от исходного содержания - до 60%	Возможно за счет вакуума; измельчение включений
Снижение содержания нитридных включений	Возможно с использованием шлаков, ассимилирующих включения этого типа	Достигается снижение нитридных включений при равномерном распределении по сечению слитка	Степень снижения количества нитридных включений выше, чем при ВДП, при равномерном распределении по сечению слитка	Не происходит	
Снижение содержания оксидных включений	Возможно при рациональном режиме раскисления и обработке расплава инертными газами и шлаками	Достигается высокая степень снижения неметаллических включений при равномерном их распределений по сечению слитка	То же что и ВДП, но степень снижения неметаллических включений может быть выше	То же, что и при ВДП	То же, что и при ВДП
Удаление примесей цветных металлов	Степень удаления примесей 50 - 80%	Степень удаления примесей (30 - 40%) ограничивается скоростью слитка	Степень удаления примесей (60 - 90%) ограничивается скоростью слитка	Не происходит	Возможно при использовании шлаков

Контрольные вопросы:

1) Перечислите основные способы получения металлов и сплавов особо высокого качества?
2) Дайте общую классификацию способам рафинирования спецсталей?
3) Дайте сравнительный анализ методов получения спецсталей?
4) Дайте сравнительную оценку методов получения спецсталей по эффективности удаления кислорода из металла.
5) Дайте сравнительную оценку методов получения спецсталей по эффективности удаления водорода из металла.
6) Дайте сравнительную оценку методов получения спецсталей по эффективности удаления азота из металла.
7) Дайте сравнительную оценку методов получения спецсталей по эффективности удаления серы из металла.
8) Дайте сравнительную оценку методов получения спецсталей по эффективности удаления неметаллических включений из металла.
9) Дайте сравнительную оценку методов получения спецсталей по эффективности удаления примесей цветных металлов.

5 Методы получения сталей специального назначения

Переплавные процессы представляют собой различные способы переплава (с целью повышения качества металла) слитков или заготовок, предварительно полученных обычными способами выплавки. При реализации переплавных процессов в металле уменьшается содержание вредных примесей и включений. Иногда переплавные процессы объединяют общим термином «Спецэлектрометаллургия». Существует множество вариантов переплавных процессов: вакуумный индукционный переплав (ВИП), вакуумный дуговой переплав (ВДП), плазменный дуговой переплав (ПДП), электрошлаковый переплав (ЭШП), электронно-лучевой переплав (ЭЛП) и другие.

5.1 Вакуумный индукционный переплав

Общая характеристика.

Вакуумная индукционная плавка является одним из самых распространенных процессов индукционной плавки как в промышленности, так и в области лабораторного эксперимента. Развитие ВИП идет по трем направлениям:

1) выплавка металла для слитков, предназначенных для последующего передела методами обработки металлов давлением;
2) производство литых изделий (в частности, турбинных лопаток) способами как точного, так и центробежного литья;
3) выплавка электродов и заготовок для последующего переплава (ВДП, ЭЛП, ЭШП и др.).

На заводах черной металлургии, когда поставлена цель получить металл

наивысшего качества, ВИП используются в основном для выплавки заготовок для дальнейшего переплава.

Методом ВИП выплавляют в основном две группы марок стали:

-жаропрочные сплавы на никелевой основе (это главный сортамент ВИП);

- особонизкоуглеродистые коррозионностойкие стали.

Стали занимают меньший объем и если коррозионностойкие стали можно сразу передавать из ВИП на прокатку, то жаропрочные сплавы нельзя, так как структура слитка, получаемого при выплавке стали и сплавов ВИП, обладает теми же дефектами, что и обычный слиток, так как разливка производится в обычную изложницу.

Основные преимущества ВИП:

- отсутствие электродов;

- возможность глубокой дегазации металла;

- низкое содержание оксидных и нитридных неметаллических включений;

- рафинирование металла от вредных примесей цветных металлов за счет дистилляции;

- высокая однородность за счет хорошей циркуляции металла;

- получение металла в узких пределах по химическому составу;

- при большой вместимости - малый угар легирующих элементов;

- возможность интенсификации процесса: продувка газами, ЭМП, обработка шлаками;

- высокая производительность и др.

Основные недостатки ВИП:

1) Взаимодействие металла с огнеупорной футеровкой. Оксиды из которых изготавливают тигли, могут реагировать с углеродом или другими компонентами расплава по реакциям:

$$MeO_т+[C] = [Me]+CO;$$
$$MeO_т+[K] = [Me]+KO_{т,ж}.$$

Таким образом, металл может загрязняться оксидами и растворенным кислородом. Восстановленные Mg и Ca, имеющие высокое давление насыщенного пара и плохо растворяющиеся в железе и никеле, могут испаряться.

Взаимодействие металла с футеровкой отсутствует при так называемой «плавке в холодном тигле», когда тигель изготовлен из электрически изолированных водоохлаждаемых медных трубок.

2) Получение слитков с дефектами, характерными для обычного слитка, и зерном более крупным, чем в обычном слитке из-за большей чистоты металла по неметаллическим включениям - которые служат центром кристаллизации. Это приводит к ухудшению деформируемости ряда сплавов и требует последующего переплава металла с целью улучшения его структуры.

3) Низкая стойкость тиглей.

4) Металлоактивные шлаки.

5) Высокая стоимость оборудования.

Принцип действия установок ВИП.

В расплавление металла в вакуумных индукционных печах осуществляется за счет индукционного нагрева, который основан на наведении в электропроводящем материале вихревых токов Фуко переменным магнитным полем, которое создаётся индуктором. При этом в металле, согласно закону электромагнитной индукции Фарадея, наводится ЭДС индукции:

$$\mathrm{E} = -\frac{\partial \Phi}{\partial \tau}$$

ЭДС индукции создаёт в металле вихревой ток силой *I*, величина которого определяется из выражений:

$$I = \frac{\mathrm{E}}{Z};\ Z = \sqrt{R^2 + \left(X_C - X_L\right)^2};\ X_C = \frac{1}{2\pi f C};\ X_L = 2\pi f L.$$

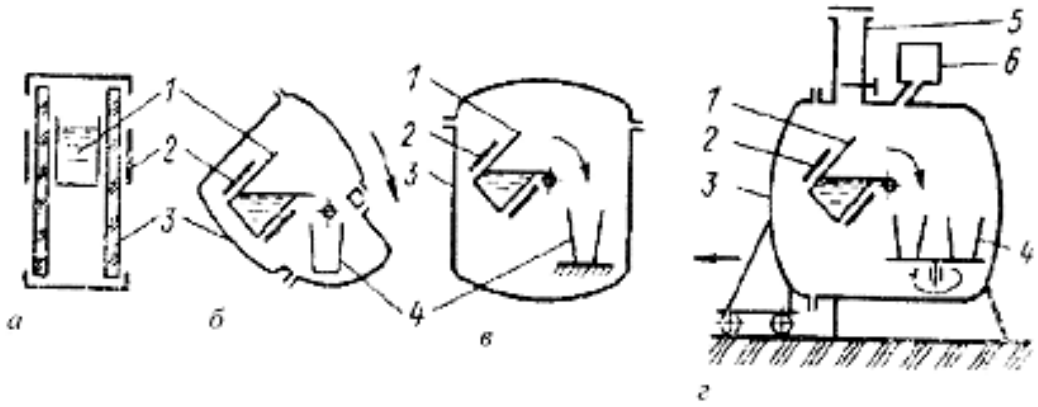
При прохождении через металл вихревого тока, металл нагревается и плавится.

В то же время вихревой ток нагревает только поверхность кусочков шихты, так как при увеличении частоты тока наблюдается скин-эффект: ток «выжимается» на поверхность проводника.

Таким образом, для увеличения силы тока нагрева нужно увеличивать частоту тока, питающего индуктор, или магнитный поток. Обычно в промышленности индукционные печи питают токами с частотой от 50Гц до 10кГц, которые получаются в генераторах токов высокой частоты различных конструкций (тиристорные, ламповые, машинные).

Конструктивно-технологические особенности

Принципиальная схема вакуумных индукционных печей приведена на рисунке 5.1.



а - индуктор расположен вне вакуумной камеры; *б-г* - индуктор расположен внутри вакуумной камеры; *в* - разливка путем наклона вакуумной камеры; *в, г* - разливка путем наклона тигля; *г* - ВИП полунепрерывного действия; 1 - тигель; 2 - индуктор; *3* - кожух; *4* - изложница; 5 - камера загрузки; *6* - дозатор

Рисунок 5.1 - Схема вакуумной индукционной плавки

Для малых печей слив металла может проводиться путем наклона камеры, для больших печей - только тигля внутри камеры. Разливка проводится в изложницы (рисунок 5.1,е), на центробежной машине (рисунок 5.1,г), в кристаллизатор или литейные формы.

Печи, работающие в течение всей компании без разгерметизации камеры, называются печами полунепрерывного действия (рисунок 5.1,г). Они оборудованы шлюзовыми камерами для загрузки шихты, разливки, подачи изложниц или литейных форм, дозаторами для присадок, устройствами для отбора проб и измерения температуры жидкого металла по ходу плавки и другим технологическим оборудованием. По режиму работы ВИП разделяются на печи:

1) периодического действия, в которых операции по загрузке шихты в тигель, установке изложниц, форм и кокилей, очистке, заправке и подготовке тигля к очередной плавке производят в разгерметизированной печи ВИП;
2) полунепрерывного действия, в которых все вышеперечисленные операции производят без нарушения герметичности ВИП.

Такие печи имеют многокамерную конструкцию, т.е. помимо основной (плавильной) камеры должны быть дополнительные шлюзовые камеры загрузки и изложниц, оборудованные вакуумными затворами и дающие возможность загружать тигель шихтовыми материалами, подавать порожние и извлекать заполненные изложницы, не нарушая вакуума в плавильной камере.

Печи периодического действия в конструктивном отношении выполнять проще и поэтому затраты на их сооружение меньше. Однако ввиду необходимости откачивать в начале каждой плавки большое количество газов, понижая давление от атмосферного до рабочего, установки периодического действия оборудуют более мощными вакуумными насосами. Кроме того, металл, выплавленный в печах периодического действия, может содержать больше кислорода и газов, чем металл, полученный в печах полупериодического действия. Это связано с тем, что при нарушении вакуума стенки тигля пропитываются оксидами, образующимися из остатков металла, а поверхность печи, вакуумной камеры и расположенных в ней устройств адсорбирует газы. В процессе вакуумной плавки в результате десорбции газов в атмосфере над расплавом поддерживаются более высокие парциальные давления вредных (примесей) газов и, следовательно, уменьшаются возможности его рафинирования, а переход оксида железа (II) из футеровки загрязняет расплав кислородом.

Еще одним недостатком печей периодического действия является их низкая производительность, связанная с разгерметизацией печи.

Стойкость футеровки ниже по сравнению с печами полупериодического действия из-за более резких перепадов температур футеровки, обусловленных разгерметизацией печи, а отсюда - удлинение операций, связанных с разгерметизацией и подготовкой печи к плавлению шихты.

В индукционных печах можно переплавлять магнитную или немагнитную шихту. Магнитная шихта нагревается (пока её температура не достигнет точки Кюри) кроме того, за счёт потерь энергии на

перемагничивание (их величина определяется шириной петли гистерезиса).

После расплавления металл в индукционных печах находится в непрерывном движении из-за электродинамических эффектов. Естественное электромагнитное перемешивание металла способствует выравниванию температуры и химического состава металла и ускоряет дальнейшую плавку. Этот метод позволяет получить сплав заданного состава, относительно чистый по содержанию газов и примесей цветных металлов.

Основные потребители и пути совершенствования технологии.

Основными потребителями металла ВИП являются авиационная, химическая, атомная, ракетная, космическая, радиоэлектронная промышленность, энергетическое машиностроение. В связи с этим основ0й сортамента ВИП являются жаропрочные и прецизионные сплавы на основе никеля, кобальта, железа, а также низко- и особонизкоуглеродистые коррозионностойкие и конструкционная стали. К ним относятся:

1) Прецизионные - сплавы с особыми физическими свойствами:

а) магнитомягкие, из которых изготовляют сердечники трансформаторов и дросселей. Магнитные свойства сплавов при получении их методом ВИП повышаются на 20 - 30% по сравнению со сплавами, полученными открытой индукционной плавкой;

б) пружинные с заданными упругими свойствами;

в) с заданным минимальным коэффициентом расширения (инвар);

г) сплавы сопротивления, например Х20Н80 (нихром). Выплавленные в ДСП сплавы имеют стойкость 40 ч (диаметр проволоки 0,8 мм), а в печах ВИП - 250 ч.

2) Жаропрочные стали и сплавы на основе Fe и Ni. При применении ВИП жаропрочность увеличивается на 10 - 20%, а по отдельным маркам на 30 - 40% (ЭИ437, ЭИ 617, ЭП 220, ЭИ 617).

3) Нержавеющие и конструкционные стали ответственного назначения с [С] < 0,03%, обладающие весьма высоким коррозионностойкими свойствами.

Задача получения металла, чистого по примесям и неметаллическим включениям, методом ВИП может решаться двумя путями:

- использованием особочистых шихтовых материалов - в большинстве своем дефицитных и дорогих. При этом главная цель ВИП - обеспечение стабильного химического состава и предотвращение загрязнения расплава из атмосферы и футеровки тигля. Этот путь, как более дорогой, наиболее применим для выплавки особо ответственных марок стали и сплавов;

- использованием менее дефицитных и более дешевых шихтовых материалов, обеспечивающих при этом достаточную эффективность рафинировочных процессов в ходе плавки.

В настоящее время вакуумный индукционный переплав используется как метод предварительной плавки шихты и получения заготовки для других переплавных процессов. Этот метод используется для производства жаропрочных сплавов для изготовления деталей реактивных двигателей и лопаток газовых турбин.

5.2 Вакуумный дуговой переплав

Сущность процесса ВДП состоит в переплаве металла в вакуумной дуговой печи в результате его нагрева и плавления электрической дугой большой мощности, капельном переносе электродного металла и последовательном затвердевании металла в водоохлаждаемом кристаллизаторе.

Принципы получения отливок электродуговой плавкой металлургических электродов сформулированы изобретателем дуговой сварки Н.Г. Славяновым в 1892 г. В 1903 г. В. Болтон применил процесс ВДП в Германии. На его печи, усовершенствованной О.А. Симпсоном, в 1904 г. получена первая тонна литого тантала. В 1909 г. Вайс и Штиммельмайер переплавляли вольфрам в атмосфере водорода, азота, а также в вакууме.

Первые результаты промышленного использования ВДП в СССР получены к 1960 г., а еще через четыре года начал действовать первый специализированный цех вакуумных дуговых печей для выплавки сталей и сплавов.

Интенсивное развитие и промышленное применение ВДП вызвано бурным развитием атомной энергетики, авиации и стало возможным с появлением достаточно производительного вакуумного оборудования.

При ВДП качество металла повышается в результате действия следующих основных факторов:

1) направленной снизу вверх кристаллизации слитка;

2) обработки металла вакуумом на трех стадиях его существования в жидком виде (на торце оплавляемого электрода в виде тонкой пленки, в процессе формирования капли и протекания ее с торца электрода в ванну кристаллизатора, в ванне кристаллизатора);

3) достаточно высокой температуры металла и значительного развития поверхности реагирования, что способствует протеканию физико-химических процессов.

Качество металла, переплавленного в вакуумной дуговой печи, значительно выше качества металла, выплавленного традиционными методами (в дуговой печи, конверторе, мартеновской печи) и отлитого в чугунные изложницы:

1) слиток ВДП более плотен и однороден, в нем значительно меньше развиты дефекты кристаллизационного и ликвационного происхождения;

2) содержание газов и неметаллических включений при переплаве значительно снижается, неметаллические включения и избыточные фазы (карбидные, боридные и т.д.) диспергированы и распределены более равномерно;

3) меньше содержание вредных примесей цветных металлов (свинца, сурьмы, цинка, висмута, олова, меди и т.д.);

4) выше пластические характеристики металла (относительное удлинение, относительное сжатие, ударная вязкость) в поперечном направлении при комнатной и рабочих температурах, что повышает изотропность металла;

5) выше технологическая пластичность металла при температурах деформации;

6) лучше обрабатываемость изделий и их эксплуатационные свойства (полируемость, ресурс работы изделий, склонность к образованию трещин, ус-

талостные характеристики и т.п.).

Анализ технико-экономических показателей ВДП и качества вакуумного дугового металла показывает, что метод ВДП имеет ряд серьезных недостатков:

1) сравнительно сложное и дорогостоящее оборудование (высоковакуумные насосы большой производительности, уникальные источники постоянного тока);

2) проведение плавки только на постоянном токе снижает электротехнические возможности ВДП. Трехфазные печи переменного тока, созданные фирмами «Лектромелт» и «Титанизм Метлз» в 1965 г., не получили распространения вследствие серьезных недостатков;

3) наличие жесткой связи источника нагрева и переплавляемой заготовки при малых диапазонах варьирования параметров плавки затрудняет в ряде случаев получение слитков без дефектов. Указанное обстоятельство является принципиальным препятствием при получении слитка большого диаметра (больше 1,5 м);

4) методом ВДП нельзя улучшать качество сталей, легированных марганцем и азотом вследствие удаления последних при переплаве;

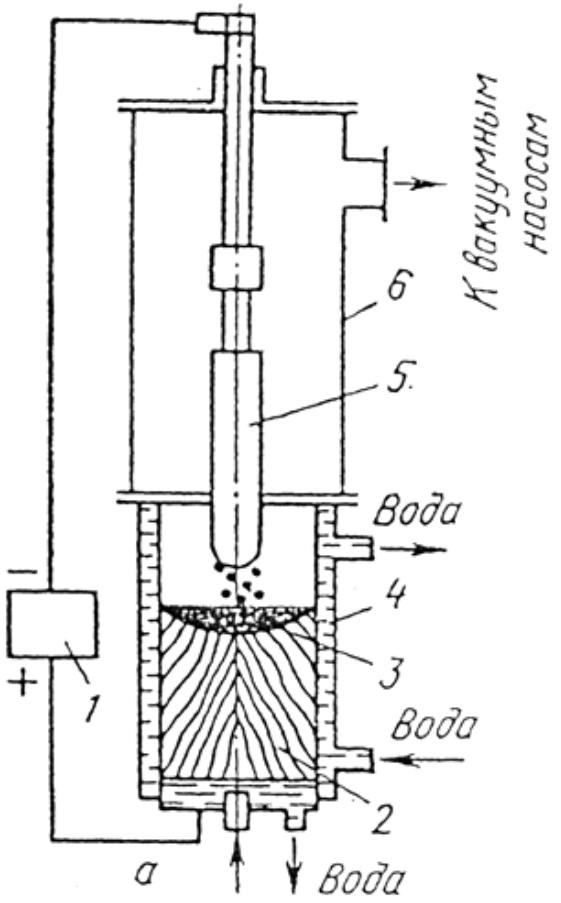
5) низкое качество поверхности слитка ухудшает экономическую эффективность ВДП;

6) сложность производства слитков квадратного или прямоугольного сечения. Круглые слитки ВДП перед прокаткой необходимо перековывать на квадратную или прямоугольную заготовку, что усложняет схему передела и повышает себестоимость металла.

Отсутствие крупных печей, работающих по принципу переплава двух и более электродов, не позволяет исключить при производстве крупных слитков методом ВДП дефект типа зональной ликвации, который органически присущ переплавляемому электроду.

Принцип действия установок ВДП.

При реализации этого метода переплава под действием высоких температур, возникающей в зоне электрической дуги, горящей между электродом и поддоном кристаллизатора в вакууме, металл расплавляется, и капли его падают в кристаллизатор. В водоохлаждаемом кристаллизаторе из капель металла формируется слиток. Электрод в этом процессе может быть расходуемым (тогда он и переплавляется) и не расходуемым (тогда переплавляются порошок или губчатый металл). До начала плавки установка вакуумируется до $p = 1{,}33 Па$, далее вакуумная система работает в течение всей плавки. Таким образом, капли металла падают в жидкую лунку расплава, находящуюся поверх кристаллизуемого слитка, через разрежённое пространство. Кристаллизация расплава в водоохлаждаемом кристаллизаторе имеет выраженный направленный характер – вдоль направления теплоотвода. Схема процесса с расходуемым электродом рассмотрена на рисунке 5.2.



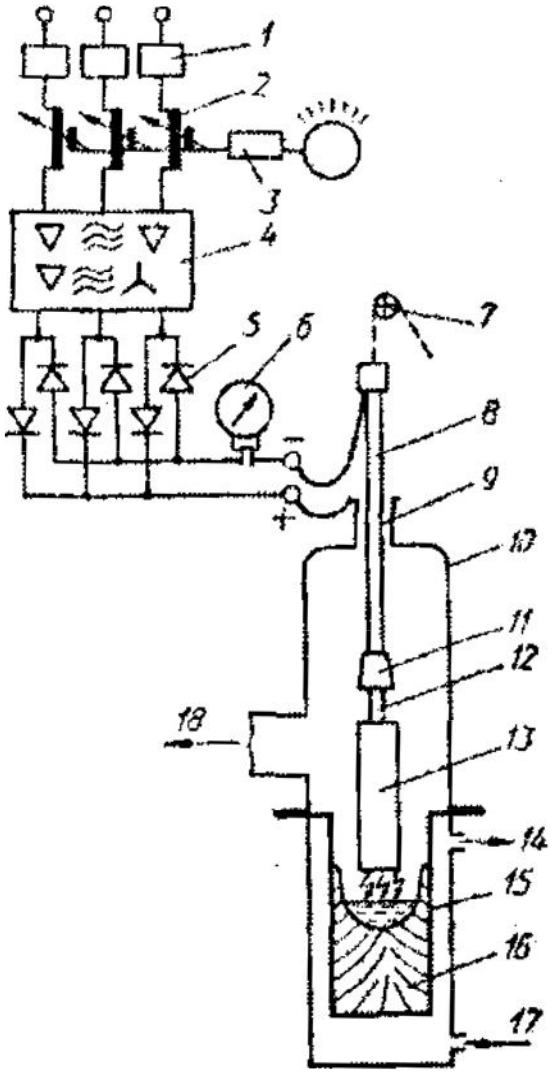
1 – источник питания; 2 - слиток; 3 – ванна расплава; 4 – кристаллизатор; 5 – электрод; 6 – герметизированная камера

Рисунок 5.2 - Схема вакуумного дугового переплава

При этом обеспечивается весьма полное очищение металла от газов, оксидных неметаллических включений и примесей некоторых цветных металлов. Слиток в этом процессе получается плотным. В результате переплава механические характеристики металла улучшаются и становятся почти изотропными.

Конструктивно-технологические особенности.

Технологическое оборудование вакуумной дуговой плавки представляет собой достаточно сложную конструкцию. Схема конструкции и электропитания печи ВДП представлена на рисунке 5.3.



1 - выключатель-предохранитель; 2 - дроссели насыщения; 3 - регулятор напряжения; 4 - трансформатор; 5 - выпрямители; б - амперметр; 7 - механизм перемещения электрода; 8 - шток; 9 - вакуумное уплотнение; 10 - вакуум-камера; 11 - электрододержатель; 12-головк электрода; 13 - расходуемый электрод; 14 - отвод воды; 15 - кристаллизатор; 16- слиток; 17 - ввод воды; 18 - вывод к вакуумным насосам

Рисунок 5.3 - Схема конструкции и электропитания печи ВДП

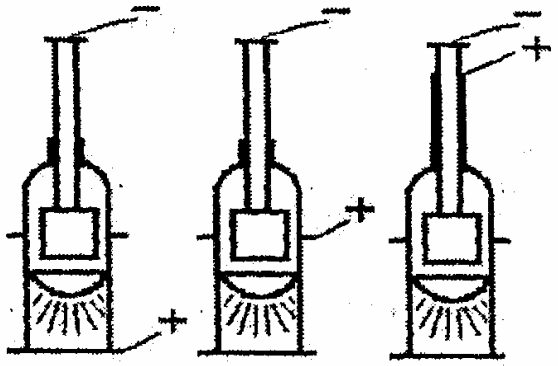
Камера печи 10, представляющая собой сварной цилиндр, жестко соединена с водоохлаждаемым кристаллизатором 15. Снизу кристаллизатор плотно закрывается водоохлаждаемым поддоном при помощи вакуумного уплотнения. Во многих случаях кристаллизатор снабжен соленоидом. Электрод 13 вакуумной дуговой печи при помощи переходника и замка электрододержателя 11 крепится к водоохлаждаемому штоку 8, который представляет собой охлаждаемую водой полированную стальную трубу. Часто шток состоит из двух труб - из наружной стальной, которая несет механическую нагрузку, и внутренней медной, по которой протекает ток. Шток вводится в камеру через вакуумное уплотнение 9. Перемещение штока вместе с электродом осуществляется посредством дифференциального электропривода. ВДП проводится при остаточном давлении

0,655 - 6,55 Н/м^2 (5-10^{-3} - 5'10^{-2}мм рт. ст.). Откачка воздуха осуществляется через патрубок 18 вакуумными насосами. Наблюдение за плавкой осуществляется через специальные окна с использованием перископов или телевизионных систем.

Для повышения энергетической эффективности переплава расходуемый электрод подключают к отрицательному полюсу источника питания (прямая полярность). В камере печи поддерживают разрежение 0,13 - 1,3 Па (10^{-3} - 10^{-2} мм рт. ст.).

Электрическая дуга горит между торцом электрода и поверхностью металлической ванны, соединенной с положительным полюсом источника питания по цепи слиток - кристаллизатор. Место подсоединения токоведущих шин к кристаллизатору имеет очень большое значение. При неблагоприятной схеме подключения электромагнитное взаимодействие тока дуги и тока, проходящего через жидкий металл, вызывает вращение ванны со скоростью 0,08 - 0,1 с$^{-1}$, нестабильность горения дуги (переход дугового в тлеющий разряд) и ее смещение относительно устойчивого положения. Это приводит к ухудшению качества поверхности и тела слитка, к опасности переброса дуги на стенку кристаллизатора и его прожога.

Вредное влияние магнитных полей при переплаве устраняют за счет коаксиального токоподвода (рисунок 5.4) и равномерного распределения тока по контакту верхнего.

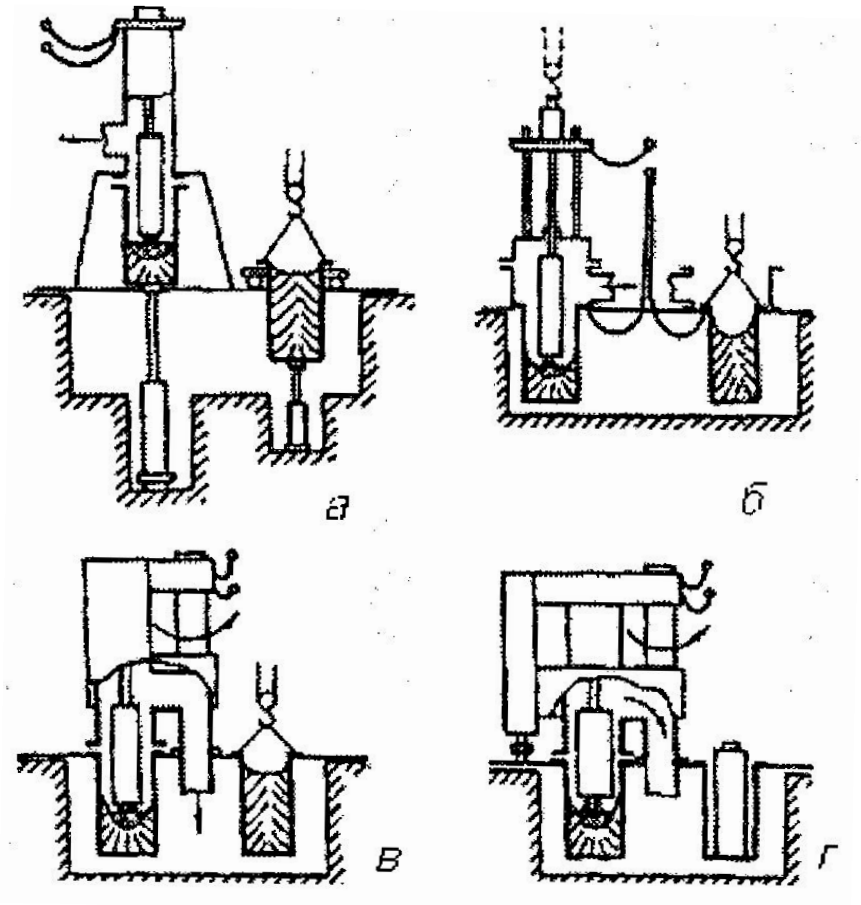


а - с токоподводом к поддону; б - с токоподводом к камере; в - с токоподводом к штоку

Рисунок 5.4 - Схемы печей ВДП с различным токоподводом

Иногда для стабилизации дуги при ВДП применяют соленоид, располагаемый между охлаждаемым кожухом и внутренней стенкой кристаллизатора. Однако включение соленоида интенсифицирует вращение и перемешивание металлической ванны, что увеличивает количество дефектов в слитках сталей и сплавов, склонных к ликвации. Поэтому применение соленоида ограничено ВДП титана и сплавов на его основе.

Для сокращения межплавочных простоев печи ВДП оснащают несколькими кристаллизаторами (рисунок 5.5).



а - стационарная; б - съемная; в – поворотная с одноколонная верхней частью поворотная с двухколонной верхней частью

Рисунок 5.5 – Основные виды печей ВДП

Смена их осуществляется по-разному, в зависимости от конструктивных особенностей печи. В СССР построены печи со стационарной верхней частью (вакуум-камерой) и подвижной нижней частью, в которой устанавливается кристаллизатор (рисунок 5.5а). Современные печи ВДП выполняют также двухпозиционными, но поворотными. В этих печах верхняя часть (портал) поворачивается вокруг стационарной колонны. В портале расположены вакуум-камеры, шток и механизм его перемещения. В колодце ниже уровня пола устанавливают два водоохлаждаемых кожуха, в которые помещают кристаллизаторы.

Существуют две модификации поворотных печей. Агрегаты с одной колонной рассчитаны на получение слитков массой до 7 т. (рисунок 5.5в). Их портал поворачивают вручную. Более крупные печи имеют две колонны - поворотную и поддерживающую, оснащенную механизмом поворота (рисунок 5.5г). Основание поворотной колонны объединено с входным патрубком вакуумной системы. Печь автоматически присоединяется к системе, когда фланец вакуум-камеры опускается на кристаллизатор. Такие печи компактнее и проще, чем печи со стационарной верхней частью.

Надежное удержание и электрический контакт многотонного электрода

со штоком осуществляются электрододержателем. В нем зажимается специальная головка, которая либо изготовляется отдельно и приваривается в вакууме к торцу электрода, либо протачивается на одном из концов электрода. Существуют различные конструкции электрододержателей, в том числе и автоматических, позволяющих в несколько секунд освободиться от огарка.

Скорость опускания электрода по мере его оплавления регулируется на основании контроля электрического режима процесса, массовой скорости переплава, а также наблюдения оператора за характером дугового разряда.

Величину дугового промежутка контролируют регуляторами напряжения дуги. Однако за рубежом такой контроль признается неполноценным, поскольку зависимость величины напряжения от длины дуги в вакууме выражена слабо. Более надежным инструментом контроля считают высокочастотную составляющую напряжения дуги, вызванную короткими замыканиями при стекании капель с электрода в ванну, а также переходом дугового разряда в тлеющий.

Стоимость электродов составляет значительную долю затрат на ВДП. На раннем этапе его освоения их изготовляли только из деформированного металла. Теперь кованые или катаные электроды применяют лишь в случаях, когда переплав литого металла затруднителен. Например, при ВДП инструментальных (быстрорежущих) и подшипниковых сталей от литых электродов откалываются куски, поэтому к электродам ВДП предъявляются повышенные требования в отношении однородности химического состава по длине, отсутствия крупных экзогенных НВ, газовых пор и раковин, трещин. Поэтому подготовка электродов к ВДП предусматривает тщательную обработку их поверхности: кислотное травление, дробеструйная очистка, обдирка на абразивных и токарных станках.

Технология выплавки в промышленных печах.

Непосредственно перед загрузкой в печь поверхность расходуемого электрода протирают мягкой ветошью, смоченной в бензине или ацетоне. На большинстве печей электрод загружают снизу. При этом вначале собирают поддон с кристаллизатором, на поддон устанавливают электрод, центрируют его относительно кристаллизатора и механизмом подъема поддона весь узел поднимают вверх, вводя верхний конец электрода в вакуумную камеру. Через люк вакуумной камеры обслуживающий персонал закрепляет электрод в штоке и механизмом перемещения электрода шток с электродом поднимают в верхнее положение.

Печь герметизируют, откачивают до технологического вакуума и проверяют натекание. При достижении заданного разрежения и допустимой величины натекания начинают процесс переплава. Процесс можно разделить на три стадии: разведение ванны, переплав и выведение усадочной раковины. Начинается процесс переплава при максимальной мощности, чтобы быстрее получить в кристаллизаторе ванну жидкого металла. Для уменьшения тепловой нагрузки от дуги на поддон иногда на него укладывают так называемую затравочную шайбу - диск диаметром несколько меньшим, чем у кристаллизатора, толщиной 20 - 30 мм, из того же металла, что и электрод. Благодаря этому дуга возбуждается не между поддоном и электродом, а между электродом и затравочной

шайбой. Для исключения возможности приваривания шайбы к электроду в момент короткого замыкания и появления при подъеме электрода дуги между шайбой и поддоном на шайбу укладывают несколько витков стружки, благодаря которой исключается непосредственный контакт при коротком замыкании между шайбой и электродом.

После возбуждения дуги из металла электрода и затравочной шайбы формируется жидкая ванна. Когда жидкий металл полностью закроет поддон, процесс переводят на рабочий режим, понижая мощность до оптимальной для данных условий.

Продолжительность переплава составляет основную долю продолжительности плавки и на печах разной мощности колеблется от 3 до 20 ч. Основное в процессе переплава - поддержание стабильного режима; при этом нельзя допускать переброса дуги на стенки кристаллизатора, коротких замыканий между электродом и ванной, появления объемного разряда.

В конце плавки постепенным плавным снижением мощности можно уменьшить скорость плавления и полностью исключить образование усадочных дефектов. При этом по всей высоте слиток будет плотным, что в некоторых случаях позволяет существенно уменьшить головную обрезь слитка. Однако изменение скорости плавления вызывает изменение скорости кристаллизации, что влияет на строение слитка, поэтому в случае выведения усадочной раковины структура верхней части отличается от структуры тела слитка. При переплаве металла ответственного назначения изменение структуры, а следовательно, и свойств является недопустимым, поэтому для увеличения производительности печи выведение усадочной раковины проводить нецелесообразно, лучше печь отключить сразу после сплавления электрода.

После отключения печь выдерживают под вакуумом до полной кристаллизации слитка. Затем напускают воздух, охлаждают слиток до темно-красного цвета для того, чтобы произошла его усадка и он легче извлекался из кристаллизатора, и выгружают слиток. Вакуумную камеру, кристаллизатор и поддон чистят от конденсата и готовят для следующей плавки.

Основные потребители и пути совершенствования технологии.

Применение ВДП для улучшения качества специальных сталей и жаропрочных сплавов на основе железа, никеля и кобальта началось еще в США в 50-х годах. В настоящее время ВДП широко распространен во всех высокоразвитых промышленных странах. В основном печи ВДП рассчитаны на получение слитков массой до 30 т.

ВДП принадлежит ведущая роль в производстве высококачественной стали и сплавов для атомной энергетики, авиации, космической промышленности и т.д.

Повысить технико-экономические показатели ВДП могут следующие мероприятия:

Механизация вспомогательных операций по обслуживанию печей, применение двух сменных кристаллизаторов.

Повышение скорости кристаллизации слитков при переплаве сталей, склонных к ликвационным дефектам, за счет использования гелия, жидкого

висмута и других эффективных охладителей.

Широкое применение средств воздействия на структуру слитка (ультразвуковая обработка, знакопеременное магнитное поле соленоида).

Переплав под слоем шлака (за счет специального покрытия -обмазки поверхности кристаллизатора).

Применение фигурных поддонов, дифференцированных токовых режимов и рациональных режимов выведения усадочной раковины, позволяющих исключить обрез хвостовой и головной частей слитка.

Применение электродов, полученных с МНЛЗ, пригодных для переплава без предварительной обдирки.

5.3 Электрошлаковый переплав

Процесс электрошлакового переплавава разработан институтом электросварки им. Е.О. Патона АН СССР, первая промышленная печь пущена в 1958 г. на заводе «Днепроспецсталь».

Характерной особенностью ЭШП является отсутствие электрической дуги. Электрическая цепь между расходуемым электродом и наплавляемым слитком, к которым подается разность потенциалов, замыкается через слой расплавленного шлака. Шлак в твердом виде ток не проводит, а в жидком состоянии становится электропроводным, но при этом обладает высоким электросопротивлением. На этом участке электрической цепи выделяется значительная часть тепла: $Q = kT_lR_x$.

Шлак нагревается до температуры 1700 - 2000°С, в результате чего начинает оплавляться погруженный в него конец расходуемого электрода. Металл электрода в виде капель перетекает в жидкую ванну в кристаллизаторе и спустя некоторое время затвердевает.

При нормальном течении процесса ЭШП оплавляющийся торец электрода имеет форму правильного конуса, на вершине которого образуется капля. Отрыв капли происходит в момент, когда гравитационные и динамические силы превысят силы межфазного натяжения. После отрыва капля проходит межэлектродный промежуток за 0,1 - 0,3 с.

Важнейшее влияние на металлургические процессы и электротехнические параметры переплава оказывают состав и свойства шлаков (флюсов).

Шлак при ЭШП не только рафинирует металл от нежелательных примесей, но и является генератором тепла, формирует поверхность слитка, защищает металл от взаимодействия с газами, участвует в замыкании электрической цепи и выполняет ряд других функций. Поэтому к шлаку предъявляют особые требования по химическому составу, физическим и физико-химическим свойствам.

Основные требования сводятся к следующему:

1) Состав шлака должен обеспечивать протекание определенных физико-химических процессов, связанных с рафинированием металла от нежелательных растворенных примесей и неметаллических включений, защиту активных легирующих элементов (Al, Ti и др.) от окисления, стабильность химического состава по высоте наплавляемого слитка.

2) При рабочих температурах теплопроводность шлака должна составлять порядка 1 - 6 $Ом^{-1}$ $см^{-1}$. Слишком высокая проводимость шлака может не обеспечить необходимую концентрацию тепла, а слишком малая - привести к дуговому разряду.

3) Шлак должен быть легкоплавким, иметь высокую температуру кипения и мало изменять вязкость в широком интервале температур, т.е. быть «длинным». Такой шлак образует ровную тонкую корочку гарнисажа и позволяет получить слиток с весьма хорошей поверхностью. Использование тугоплавких «коротких» шлаков приводит к а, а появлению ряда поверхностных дефектов.

4) Шлаки должны отличаться высоким межфазным натяжением на гуру границе с металлом и обладать высокой адгезией к неметаллическим тур, включениям. Это способствует хорошему отделению шлака от металла, предотвращает его запутывание в металлической ванне и обеспечивает хорошее отслоение корочки шлака от поверхности слитка, а также способствует извлечению шлаком неметаллических включений.

Составы шлаков при ЭШП различны; чаще всего используют шлак, состоящий из CaF_2 с добавками CaO, $A1_2O_3$, SiO_2. Проходя через такой шлак, капли металла очищаются от серы; в них снижается содержание неметаллических включений, а в кристаллизаторе образуется плотный качественный слиток.

Электрошлаковый переплав позволяет получать наплавляемый слиток высокого качества за счет снижения содержания вредных примесей, особенностей кристаллической структуры и однородности по химическому составу.

В настоящее время установлены следующие преимущества электрошлакового переплава перед другими способами получения стали:

1) Хорошее качество слитка, отсутствие усадочной раковины и пористости.
2) Меньшее количество и меньший размер включений.
3) Однородность структуры и химического состава.
4) Высокий выход годного.
5) Возможность регулируемого снижения содержания серы, кислорода, а в некоторых условиях и азот; возможность сохранения легирующих элементов, которые могут быть окислены, таких как кремний и титан.
6) Возможность корректирования состава металла путем применения соответствующего флюса.
7) Общее улучшение характеристик пластичности и ударной вязкости.
8) Улучшение свариваемости.
9) Обеспечение такого качества поверхности, которое исключает необходимость в зачистке поверхности при горячей обработке.
10) Облегчение условий отливки электродов по сравнению с разливкой слитков для непосредственной прокатки.
11) Возможность управления направлением и скоростью затвердевания.
12) Возможность регулирования крупности зерен и величины карбидов, особенно в быстрорежущих инструментальных сталях.
13) Расплавленный металл защищен от атмосферного окисления.

Такое большое число преимуществ процесса ЭШП является следствием большого числа степеней свободы, свойственного этому процессу. Важность степеней свободы в технологии стала приобретать все большее значение по мере усложнения требований к современным продуктам.

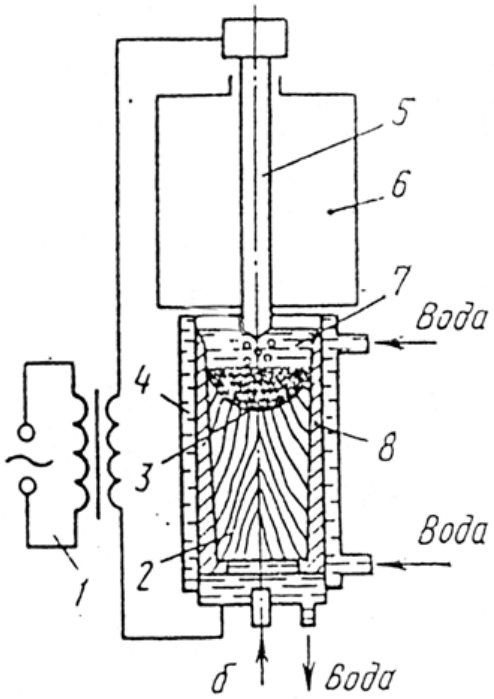
Оборудование ЭШП проще и дешевле, чем при ВДП.

Недостатком ЭШП является невозможность организовать в открытом агрегате удаление водорода. В связи с этим широкое распространение получили дуплекс-процессы ВИП–ЭШП и ЭШП-ВДП.

Конструктивно-технологические особенности.

Процесс ЭШП разработан в Институте электросварки им. Е. О. Патона АН Украины. Практическое распространение метода ЭШП началось с 1958 г. на металлургическом заводе «Днепроспецсталь».

Принципиальная схема электрошлакового переплава представлена на рисунке 5.6



1 – источник питания;2 – слиток; 3 – лунка расплава;4 – кристаллизатор; 5 – электрод; 6 – вакуумная камера; 7 – шлаковая ванна

Рисунок 5.6 - Схема электрошлакового переплава

Существует два типа установок ЭШП: с расходуемым электродом и с нерасходуемым электродом. Суть процесса при этом остается неизменной: капли металла проходят через слой жидкого шлака (через шлаковую ванну). Нерасходуемые электроды, используемые для поддержания требуемой температуры в шлаковой ванне, бывают графитовые или металлические водоохлаждаемые. Проходя через слой жидкого шлака, капли металла попадают или в кристаллизатор, или в огнеупорный тигель. В последнем случае плавка ведется в так называемых установках с керамическим тиглем. Для производства стальных слитков обычно используют процесс с расходуемым электродом и охлаждае-

мым кристаллизатором.

Расходуемые электроды получают, выплавляя предварительно металл нужного состава в обычном сталеплавильном агрегате (чаще в дуговой сталеплавильной печи) и разливая его на слитки или непрерывно-литую заготовку. Для получения расходуемых электродов необходимых размеров (по сечению) слитки могут подвергаться прокатке или ковке. Получаемые ЭШП слитки имеют обычно развес до 5–6т. В отдельных случаях (например, при получении заготовок для последующего изготовления роторов турбин электростанций) отливаются ЭШП слитки массой 60т и более. В СССР была разработана специальная электрошлаковая технология, позволяющая отливать слитки массой до 300т. Большие слитки массой 200– 300 т (для роторов турбин, валов судовых двигателей и т. п.) выплавляют редко, и заводам нерационально иметь у себя крупные агрегаты для того, чтобы использовать их только несколько раз в году. Поэтому для производства сверхкрупных слитков Институтом им. Е. О. Патона совместно с рядом заводов создан способ, получивший название *порционной электрошлаковой отливки* (ПЭШО). В отличие от обычного ЭШП, основанного на переплаве расходуемых электродов, способ ПЭШО предусматривает получение слитков непосредственно из жидкого металла. В водоохлаждаемой изложнице с помощью нерасходуемых электродов расплавляется смесь шлакообразующих компонентов. При этом в изложнице образуется слой жидкого шлака (шлаковая ванна), обладающий высокой рафинирующей способностью (рисунок 5.7, *а)*. Через слой шлака заливают первую порцию стали, полученной в печи, емкость которой равна части емкости изложницы. В период заливки металла погруженные в шлак электроды автоматически поднимаются (рисунок 5.7, *б)*.

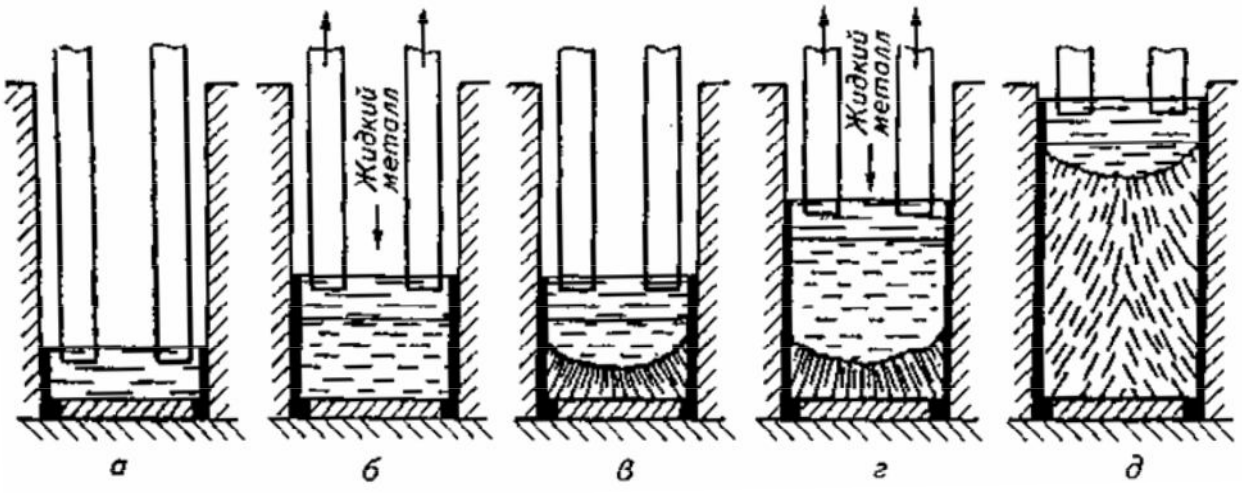


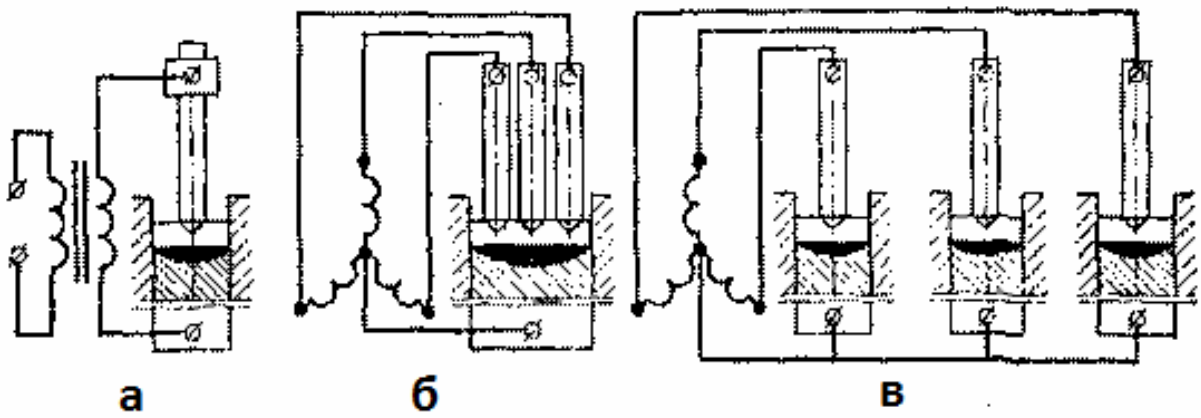
Рисунок 5.7 - Схема порционной электрошлаковой отливки

После заливки первой порции металла ведут электрошлаковый обогрев зеркала металла. За счет подводимой мощности зеркало должно оставаться жидким по всему сечению изложницы. При этом залитый металл постепенно затвердевает в направлении снизу вверх, и к моменту заливки следующей порции металла под слоем жидкого шлака остается небольшой объем жидкого

металла (рисунок 5.7, *в)*. Металл следующей порции аналогичным образом заливают в изложницу, и он смешивается с остатком жидкого металла первой порции (рисунок 5.7, г). Этот процесс повторяют несколько раз до заполнения всей изложницы. После заливки последней порции металла постепенно снижают электрическую мощность, подводимую к шлаковой ванне, с тем чтобы предотвратить образование усадочной раковины в головной части слитка (рисунок 5.7, *д)*. Интенсивная обработка металла рафинирующим шлаком обеспечивает высокую чистоту металла слитка по сере и неметаллическим включениям. Направленная снизу вверх последовательная кристаллизация металла в изложнице при постоянном наличии сравнительно небольшого объема жидкого металла и высокого градиента температур в металлической ванне ограничивает развитие в слитке зональной ликвации и исключает образование в нем дефектов усадочного и ликвационного происхождения.

Другим технологическим приемом, позволяющим получать высококачественные крупные слитки, является технология, названная *ЭШП с расходуемым электродом,* согласно которой у отлитого по обычной технологии крупного слитка удаляется осевая зона (здесь металл обычно поражен дефектами вследствие ликвации вредных примесей, неметаллических включений, скопления газов и т. п.). Образовавшуюся таким образом полость в слитке с помощью ЭШП заполняют доброкачественным металлом.

Разновидностью ЭШП является электрошлаковая отливка (ЭШО), для получения которой жидкий металл заливается в водоохлаждаемые кристаллизаторы через слой жидкого шлака. Кристаллизация в этом случае протекает при электрошлаковом обогреве головной части слитков.



а – однофазная; б – трехфазная в одном кристаллизаторе; трехфазная в трех кристаллизаторах

Рисунок 5.8 – Основные виды электрошлакового переплава

Установки ЭШП могут работать и на переменном, и на постоянном токе. Применение постоянного тока было вызвано возможностью использовать электролиз расплава и таким образом добиться очистки металла от некоторых примесей (серы, кислорода, водорода и др.), а также использовать одно и то же

оборудование для ЭШП и ВДП. Отечественные установки ЭШП работают на более дешевом переменном токе. Практика показала, что переплав на переменном токе способствует более глубокому рафинированию металла, в частности от серы. Печи ЭШП могут быть однофазными и трехфазными.

Конструкции ЭШП имеют различные схемы перемещения электрода, кристаллизатора и слитка:

1) кристаллизатор и поддон неподвижные, электрод опускается по мере его оплавления. В конструкциях таких печей кристаллизатор имеет большую высоту, чем слиток;
2) кристаллизатор неподвижен, опускаются по ходу плавки электрод и слиток;
3) слиток неподвижен, электрод и кристаллизатор перемещаются навстречу друг другу.

В печах 2-го и 3-го типа применяется короткий кристаллизатор.

Кристаллизатор. Кристаллизатор является наиболее ответственной частью печи. Именно в кристаллизаторе происходит плавление металла, его рафинирование и формирование слитка. Температура шлака во время плавки достигает весьма высоких значений, что обусловливает тяжелые условия работы кристаллизатора. При этом работа кристаллизатора осложняется тем, что через него протекает электрический ток большой силы. Кристаллизаторы разделяются по форме поперечного сечения или фасонного профиля. Вследствие высокой тепловой нагрузки все кристаллизаторы охлаждаются водой.

Поддон является основанием кристаллизатора и, как правило, охлаждается водой. Верхнее основание изготавливают из медного листа толщиной 10 - 40 мм. Кожух - сварной из нержавеющей стали; к нему приварены патрубки для входа и выхода воды. Поддон устанавливается на специальную тележку.

Расходуемый электрод. Чаще всего металл для расходуемого электрода ЭШП получают в ДСП, но экономически в ряде случаев выгоднее выплавлять его в мартеновских печах или конвертерах. Электроды изготавливают методом ковки, прокатки, литья на МНЛЗ и в специальные изложницы. Электроды изготавливают круглого, квадратного и прямоугольного сечения.

Механизм перемещения электродов. Механизм перемещения электродов состоит из электродной тележки, электрододержателя (чаще всего в виде консоли) и привода. В конструкциях отечественных ЭШП применяются в основном электромеханический реечный или цепной механизм перемещения электрода и кристаллизатора. Диапазон регулирования рабочих скоростей привода кристаллизатора 0,02 - 2 м/ч.

Основные потребители и пути совершенствования технологии.

Стали, получаемые методом ЭШП получили широкое применение в различных областях техники (самолетостроения, электроники и т.д.). Данным методом получают стали для дисков и лопаток газотурбинных авиационных двигателей, газовых турбин, электроники.

В настоящее время методом ЭШП выплавляют слитки массой до 60 т различного сечения: круглые, квадратные, прямоугольные для дальнейшего передела.

К совершенствованию технологии ВИП относится использование гелия, который обладает высокой теплопроводностью, для охлаждения кристаллизатора улучшает структуру слитка. В рабочий период отвод тепла в основном осуществляется через дно кристаллизатора, так как образовавшаяся корочка - гарнисаж и воздушный зазор не позволяют осуществить интенсивное охлаждение через стенки кристаллизатора. В связи с этим могут возникать такие дефекты, как термические напряжения и даже трещины по высоте слитка в результате значительной разницы температуры по высоте слитка. Второй положительный момент: гелий проходит через шлаковый расплав и может его рафинировать, например от водорода, тем самым способствуя снижению водорода в слитке.

В настоящее время стружку легированного металла переплавляют в заготовку, но это связано с потерями легирующих.

Чтобы предотвратить эти потери:

а) при ЭШП с расходуемым электродом стружку подают через специальное устройство (воронку) на шлак. Для уменьшения потерь легирующих над шлаком создается специальная атмосфера;

б) при ЭШП с нерасходуемым электродом (например, графитовым) возможно науглероживание металла.

При этом возможно прилипание стружки к электроду, поэтому с определенной цикличностью регулируют мощность.

При применении металлизированных окатышей используются:

- обычный способ подготовки электрода;
- подготовка электродов прессованием;
- запрессовка окатышей в специальную трубу из материала, близкого по составу к выплавляемому металлу;
- непрерывная подача окатышей на слой шлака.

Однако постоянное изменение состава шлака осложняет ведение процесса.

Кроме того, возможно более широкое внедрение «жидкого старта» и дуплекс-процесса ВИП - ЭШП.

5.4 Плазменно-дуговой переплав

Плазменная плавка специальных сталей и сплавов является одним из важнейших способов получения металла высокого качества. В плазменных печах источником энергии является низкотемпературная плазма (Т=10в5 К). Плазмой называется ионизированный газ, в котором концентрации положительных и отрицательных зарядов равны. Степень ионизации низкотемпературной плазмы близка к 1%. Низкотемпературная плазма получается при введении в дуговой электрический разряд газообразного вещества. В этом случае газ ионизируется и образуется плазма. В металлургии в качестве плазмообразующего газа чаще всего применяют аргон.

Плазменная металлургия создает условия для удовлетворения требований к прочностным показателям материалов в условиях сверхнизких, нормальных и

повышенных температур, которые выдвигаются в настоящее время и сохранятся в будущем. Это относится и к требованиям ядерной энергетики, электротехнической промышленности, машиностроения и других развивающихся отраслей промышленности. Наряду со способами ЭШП и ЭЛП плазменно-дуговой переплав является еще одним методом электрометаллургии, который характеризуется широкими технологическими возможностями и значительным экономическим эффектом, проявляющимися в конечном качестве промышленной продукции и эффективности технологического оборудования, где могут быть использованы материалы только с исключительно высокими физическими свойствами.

Исследования, направленные на разработку методов плазменной плавки металлов, были начаты в первой половине 60-х годов такими странами, как СССР, США и Япония, а также ГДР, Бельгия, Франция и др. По мере изучения свойств плазменного разряда и совершенствования конструкций плазматронов стало ясно, что применение его может повысить технологические преимущества существующих сталеплавильных процессов и позволит создавать новые оригинальные процессы, обладающие специфическими преимуществами.

В целом достоинства плазменного нагрева применительно к сталеплавильному производству обусловливаются следующими особенностями:

- возможностью обработки расплавов газами в «активизированном» состоянии;
- высокой стабильностью и регулируемостью разряда в широком диапазоне давлений: от нескольких сотен тысяч до десятых долей паскаля;
- возможностью создания в плавильном объеме плазменных печей контролируемой атмосферы (нейтральной, восстановительной, окислительной), а в герметичных агрегатах - повышенного давления или вакуума;
- высокой удельной мощностью плазматронов;
- плазменный разряд является «чистым» источником нагрева, т.е. не вносит каких-либо загрязнений в металл (при соответствующем контроле атмосферы);
- плазменные разряды любого типа, используемые в металлургии, являются практически бесшумными.

Использование процессов ВПП и ПДП позволяет существенно повысить качество и стабильность свойств металлов, выплавляемых методами ВДП и ЭШП, расширить сортамент сталей и сплавов, производимых переплавными процессами, освоить производство принципиально новых марок сталей и сплавов, производство которых существующими методами невозможно (например, сталей с особо высоким содержанием азота, значительно превышающим предел его стандартной растворимости).

Плазменный нагрев также может быть использован для обогрева ковша при внепечной обработке стали, создания комбинированных технологических схем производства стали, создания полунепрерывных сталеплавильных процессов и др.

Конструктивно-технологические особенности.

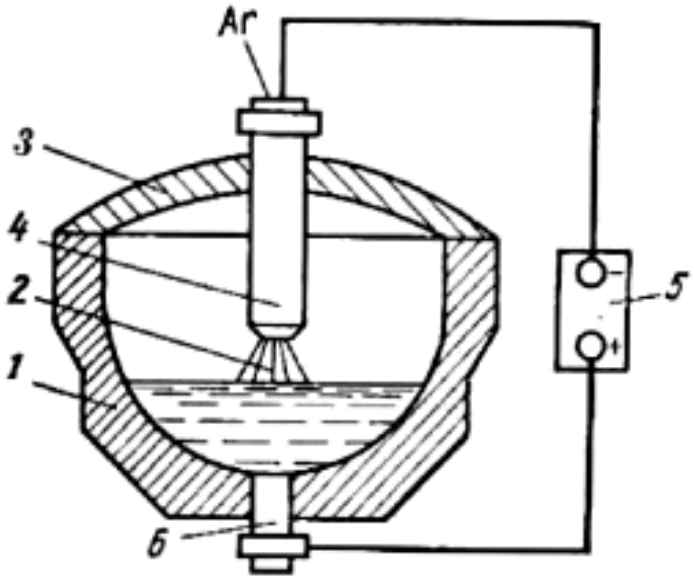
Для плавки стали применяют два типа агрегатов: печи с огнеупорной фу-

теровкой и медным водоохлаждаемым кристаллизатором.

Плазменные печи (ПП) с керамическим тиглем по форме печного пространства подобны ДСП (рисунок 5.9). В большинстве случаев они работают с плазматронами постоянного тока и подовым электродом в днище тигля. Подовый электрод служит для подвода тока к ванне.

С целью предупреждения загрязнения печной атмосферы печь уплотняется с помощью лабиринтного песочного затвора. Выпускное отверстие печи во время плавки герметично закрывают крышкой.

В зависимости от вместимости и мощности ПП могут иметь один или несколько плазматронов. При использовании одного плазматрона его укрепляют вертикально на своде. Несколько плазматронов располагают вертикально в своде или наклонно в боковых стенках. При питании печей трехфазным током подовый электрод в ванне подсоединяется к нулевой фазе электрической схемы, а количество плазматронов кратно трем.



1 – корпус печи; 2 – плазменная дуга; 3– свод; 4 – плазматрон; 5 – источник питания; в – подовый водоохлаждаемый электрод

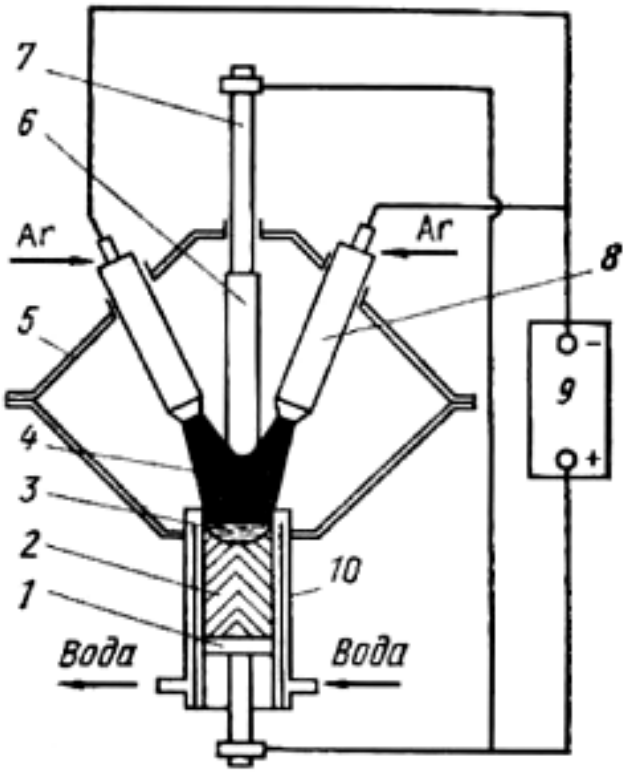
Рисунок 5.9 - Схема плазменной печи с керамической футеровкой

В отличие от дуговых сталеплавильных печей в плазменной печи вместо графитированных электродов устанавливают один или три плазматрона, что зависит от размеров печи. В печах постоянного тока анодом служит ванна жидкого металла, ток к которой подводится через подовой электрод. Печи трехфазные имеют три плазматрона, а подового электрода нет. Плазменная печь полностью герметизирована.

Металлургические возможности плазменных печей с нейтральной атмосферой очень широки и металл можно раскислять, десульфурировать, рафинировать от газов и неметаллических включений, легировать азотом. Кроме того, в плазменной печи возможно получение металла с особо низким содержанием

углерода, т. е. активно вести окислительный процесс.

Схема плазменно-дуговой печи с водоохлаждаемым кристаллизатором приведена на рисунке 5.10



1 – поддон; 2 – слиток; 3–жидкий металл; 4 – плазменная дуга; 5 – корпус печи; 6–переплавляемый электрод; 7 – электрододержатель; 8 – плазматрон; 9 – источник питания; 10–кристаллизатор

Рисунок 5.10 - Схема плазменнодуговой печи с водоохлаждаемым тиглем

ПДП в кристаллизатор является классическим примером вторичного рафинирующего переплава, который обладает большими технологическими возможностями, что связано, во-первых, с широким диапазоном возможных скоростей наплавления слитка, во-вторых, с возможностью использования разных газовых и шлаковых смесей. ПДП легко обеспечивает рафинирование металла от неметаллических включений, газов, серы, легирование азотом из газовой фазы и раскисление.

В плазменнодуговой печи с водоохлаждаемым тиглем переплавляемая заготовка с помощью механизма подачи через уплотнение подается в герметичную камеру. Оплавление заготовки осуществляется двумя плазматронами. Формирование слитка происходит в кристаллизаторе. По мере наплавления слиток вытягивается из кристаллизатора. Источник тока подключается к плазматрону (минус) и к слитку (плюс).

При вертикальном расположении плазматронов - тепловая нагрузка на футеровку более равномерная, проще конструкция узла уплотнения, меньше габариты печи. В то же время затруднена смена поврежденного плазматрона

без остановки печи; кроме того, при использовании нескольких плазматронов постоянного тока происходит электродинамическое взаимодействие дуг, что при определенных условиях приводит к нарушению стабильности горения плазменной дуги.

При наклонном расположении плазматронов - электродинамическое взаимодействие дуг практически отсутствует, возможна быстрая замена поврежденного плазматрона в процессе плавки (без отключения печи). В то же время футеровка стен вблизи места ввода плазматронов подвергается высоким тепловым нагрузкам, а также несколько увеличиваются габариты печи. Плазматроны снабжены механизмами перемещения, позволяющими менять длину дуги между электродом и расплавленным металлом.

Слитки, выплавленные в плазменно-дуговой печи, имеют высококачественную поверхность и их не обтачивают перед последующим переделом.

Как правило, рафинирующий переплав в атмосфере аргона применяют для производства шарикоподшипниковых сталей особой чистоты, нержавеющих сталей, жаропрочных сплавов на основе никеля и железа, конструкционных сталей, а также драгоценных металлов и сплавов.

Технология выплавки.

Процесс плазменной плавки предусматривает расплавление предварительно загруженной в печь шихты, выдержку жидкого металла до достижения заданной степени рафинирования и выпуск. Технология плазменной плавки в печах с керамическим тиглем близка к технологии плавки в ДСП, но есть и свои особенности.

Шихта должна быть чистой по фосфору и сере и не окисленная, так как все преимущества плазменной плавки полнее реализуются при бесшлаковом процессе. На дно загружается мелкая шихта, обеспечивающая надежный контакт с подовым электродом.

При плазменной плавке используются плазматроны с зависимой дугой. Сначала при помощи осциллятора возбуждается «дежурная» дуга, с помощью которой замыкается цепь между катодом и поверхностью нагреваемого металла (анодом). После появления основной дуги, которая сжимается газовым потоком, ее растягивают до необходимой длины, достигающей в зависимости от вместимости печи 1 - 2м. Омываемая относительно холодным газовым потоком сжатая дуга обладает сравнительно малой излучательной способностью. Поэтому, несмотря на очень высокую температуру в столбе дуги и его большую длину, доля тепла, излучаемого через боковую поверхность дуги, относительно невелика.

Сжатая плазменная дуга позволяет плавить металл с большой скоростью, рафинировать металл от вредных газов и при необходимости легировать расплав газом, например азотом. При этом металл не загрязняется материалом электрода.

ПП предназначены главным образом для плавки сталей, но могут использоваться для плавки цветных металлов и сплавов.

Рафинирование. После расплавления металл выдерживают под плазмой для его рафинирования. Для окисления примесей можно использовать окисли-

тельную плазму. В качестве одного из плазмообразующих газов подают кислород. При этом используют двухканальную конструкцию плазматрона. По внутреннему каналу подается нейтральный газ (аргон), защищающий электрод, а по наружному - газ, необходимый для проведения металлургического процесса.

Для получения азотированного металла в качестве дополнительного газа используют азот, а для предохранения катода от образования нитридов применяют двухканальный плазматрон.

Рафинирование расплава от газов осуществляется при использовании в качестве плазмообразующего газа чистого аргона за счет очень низкого содержания удаляемых газов в исходном аргоне. При соответствующем расходе он обеспечивает «химический вакуум» над поверхностью расплава, что способствует удалению газов. Для предохранения открытой поверхности металла от окисления могут использоваться шлаки. При необходимости, в расплав присаживают легирующие.

Основные потребители и пути совершенствования технологии.

Метод ПДП весьма эффективен для производства сталей с особо высоким содержанием азота, прецизионных сплавов, ряда жаропрочных сплавов и т.д. Особенно перспективен он для производства высокопрочных марганцевых сталей.

Процесс ВПП обеспечивает рафинирование хромоникелевых сплавов и нержавеющих сталей от азота на 60 - 70% при минимальных потерях легирующих, в частности хрома 1 - 1,5% отн. Для сравнения, метод электронно-лучевого переплава обеспечивает примерно такую же степень рафинирования, что и ВПП, но при гораздо больших (на порядок) потерях легирующих в результате испарения, а степень рафинирования сложнолегированных сталей и сплавов от азота при вакуумно-дуговом переплаве ниже (не превышает 10 - 15%), чем при ВПП.

Плазменная плавка является наиболее высокопроизводительным процессом среди всех существующих способов специальной электрометаллургии. Применительно к конкретным методам плавки имеются дополнительные преимущества, связанные со спецификой этих процессов.

Применение плазменного нагрева в сталеплавильном производстве развивается по трем основным направлениям:

1) плазменная плавка сталей и сплавов в печах с керамическим тиглем (типа Линде);
2) различные модификации метода плазменно-дугового переплава (ПДП) в печах с кристаллизатором;
3) использование плазменного нагрева в комбинации с другими способами нагрева для повышения технологичности и экономичности существующих методов выплавки стали, например индукционной плавки с плазменным подогревом.

В настоящее время созданы достаточно надежные конструкции плазменных печей и мощных плазматронов (до 4 МВт), разработаны технология легирования сталей различного типа азотом из газовой фазы и технология выплавки сложнолегированных (в частности, высокохромистых) сталей с содержанием

азота < 0,025%, процессов раскисления и десульфурации.

Переплавные печи с кристаллизатором можно условно разделить на два класса: печи, работающие при нормальном либо повышенном давлении, и установки, работающие при низком давлении. Первый способ называют методом плазменно-дугового переплава, второй - методом вакуум-плазменного переплава (ВПП). Оба метода по своим возможностям перспективны и технологически эффективны. Методы плазменного переплава позволяют использовать шлаки, варьировать в широких пределах давление и состав атмосферы, независимо регулировать вводимую мощность и скорость переплава, т.е. обеспечивают более гибкое регулирование условий кристаллизации и рафинирования, чем методы ВДП и ЭШП.

5.5 Электронно – лучевой переплав

Сущность электронно-лучевой плавки заключается в переплаве металлических заготовок в электронно-лучевой печи в результате их нагрева и плавления энергией электронного луча, капельном переносе электродного металла и последовательном затвердевании металла в водоохлаждаемом кристаллизаторе. В отличие от ВДП и ЭШП жесткая связь источника нагрева с переплавляемой заготовкой отсутствует. Переплавляемая заготовка не участвует в электрической цепи источника нагрева и, следовательно, не является расходуемым электродом. Отсутствие связи источника нагрева с переплавляемым электродом обеспечивает широчайшие возможности для управления скоростью переплава и в конечном итоге - кристаллизацией слитка. Это позволяет управлять временем пребывания металла в жидком состоянии и соответственно продолжительностью обработки его вакуумом, заметно перегревать металл выше температуры плавления. Кроме того, ЭЛП осуществляют в глубоком вакууме, что увеличивает возможности рафинирования металла по сравнению с ВДП.

Возможность плавить металл электронным лучом установлена в 1879 г. У. Круксом, а первые небольшие слитки чистого тантала и других металлов получены М. Пирани, который в 1907 г. получил патент на этот способ. Развитие и внедрение в промышленность способа ЭЛП тормозилось отсутствием мощных вакуумных насосов электронно-лучевых пушек. Промышленное внедрение ЭЛП можно отнести к 1958-1963 гг. Наибольшее распространение метод ЭЛП получил в США, ФРГ, Японии, ГДР и СССР. Максимальная масса слитка, полученного методом ЭЛП, составляет 18 т.

Электронно-лучевая плавка обладает рядом преимуществ, а именно:

1) регулирование в широких пределах скорости наплавления, определяющей благоприятную для последующей обработки макроструктуру слитка;

2) возможность высокого перегрева металлов, позволяющего в сочетании с глубоким вакуумом удалить вредные примеси (например, цветные металлы);

3) глубокая дегазация металла в вакууме;

4) отсутствие контакта жидкого металла с загрязняющей его футеровкой;

5) переплав практически любой шихты и возобновление процесса плавки после случайного перерыва без ухудшения качества слитка. При получении слитков большой массы (нескольких десятков т) важное достоинство процесса – возможность переплава сравнительно небольших заготовок, попеременно подаваемых в зону плавления. Жидкий металл поступает в кристаллизатор либо непосредственное переплавляемой заготовки, либо из промежуточной ёмкости, где он дополнительно рафинируется. В результате Электроннолучевая плавка в 2–4 раза снижается содержание газовых примесей и неметаллических включений, повышаются плотность металла, изотропность его свойств.

Недостатки ЭЛП:

1) низкая производительность и, как следствие, низкий к.п.д. Если сравнивать ВДП и ЭЛП при одинаковой мощности (150 - 200 кВт), то скорость плавления на ВДП-10 кг/мин, а на ЭЛП - 0,4 - 0,5 кг/мин. При этом полный к.п.д. электронной плавки составляет около 10%.
2) сложность и высокая стоимость оборудования;
3) высокие капитальные затраты;
4) невозможность переплава сталей и сплавов, легированных азотом, марганцем большие и часто неуправляемые потери легирующих элементов с высокой упругостью пара, таких как, например, хром. Поскольку хром входит в подавляющее большинство легированных сталей и сплавов, это обстоятельство существенно ограничивает область применения ЭЛП;
5) высокая себестоимость металла, полученного при электронно-лучевой плавке.

Принцип действия установок ЭЛП.

Сущность электронно-лучевого нагрева заключается в том, что кинетическая энергия мощного направленного потока электронов при бомбардировке ими поверхности нагреваемого материала превращается в тепловую энергию. Применение электронно-лучевого нагрева в промышленных целях стало возможным благодаря интенсивному развитию электроники, обеспечившей получение мощных потоков электронов и возможность управления ими, и больших достижений в области вакуумной техники, позволивших создать эффективные вакуумные системы технологического оборудования.

Устройство для получения мощного потока электронов, их ускорения и концентрирования в пучок, направляемый в рабочее пространство, где электрическое поле отсутствует, называют электронной пушкой. Она представляет собой трехэлектродную систему, состоящую из вольфрамового катода, управляющего электрода и кольцевого анода. Электроны, вылетающие с нагреваемого катода, формируются в электронный луч, который ускоряется за счет разности потенциалов между катодом и анодом (10 - 50 кВ).

Регулирование потока электронов (электронного луча) осуществляется управляющим электродом путем изменения отрицательного потенциала по отношению к катоду. В электронно-лучевых печах необходимо поддерживать вакуум не менее 0,01 Па, так как в этом случае длина свободного пробега электронов достаточно велика и они двигаются практически без соударений между собой и молекулами остаточного газа. Для обеспечения эффективной работы

электронной пушки в печи обычно создается вакуум 10^3 - 10^5 Па.

Для управления электронным лучом, выходящим из электронной пушки, используют фокусирующую и отклоняющую системы, с помощью которых соответственно изменяют сечение потока (пучка) электронов и направляют его под заданным углом на обрабатываемое изделие.

В ЭЛП нагрев металла осуществляется потоком ускоренных электронов, генерируемых в специальных устройствах (электронных пушках). Электроны разгоняются электрическим полем, сталкиваются с переплавляемым веществом, взаимодействуя как с кристаллической решеткой в целом, так и с отдельными встречающимися микрочастицами: положительными ионами, свободными и связанными электронами. При этом электрическое поле первичных электронов вызывает соответствующее возмущение кристаллической решетки, которое проявляется в виде перемещения ионов и увеличения амплитуды их колебания, т.е. повышения температуры металла.

При резком торможении электронов часть их энергии теряется в виде излучения. При ускоряющем напряжении в десятки киловольт, которое используется в плавильных установках, возникает рентгеновское излучение. Его мощность не превышает половины мощности электронного пучка, но само излучение представляет серьезную опасность для обслуживающего персонала. Поэтому величину ускоряющего напряжения ограничивают до 30 - 35 кВ (опасный уровень - более 40 кВ) и принимают специальные меры при конструировании, изготовлении и эксплуатации ЭЛП.

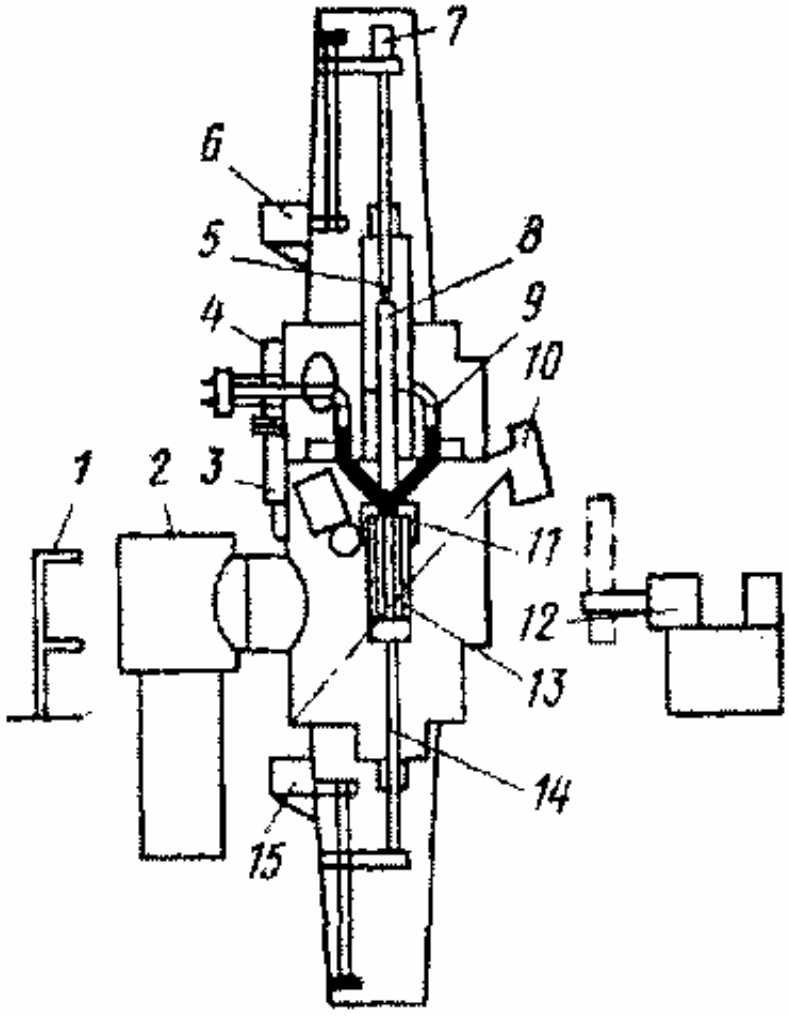
В ЭЛП источником свободных электронов служит накаленная спираль или пластина, т.е. катод, с которого излучается поток электронов (термоэлектронная эмиссия). Электронный поток сжимают электромагнитным полем в луч и направляют на металлический электрод или шихту и жидкую ванну. При столкновении луча с металлом выделяется большое количество энергии, под действием которой он нагревается и плавится. Для катодов ЭЛП используют вольфрам и молибден.

Конструктивно-технологические особенности.

Схема типичной печи ЭЛП представлена на рисунке 5.11. Основным узлом является вакуумная плавильная камера 4, толщина стенки которой составляет 10 - 15 мм, что обеспечивает жесткость конструкции и одновременно надежную защиту от рентгеновского изучения.

Плавильная камера охлаждается водой. В ней размещен кристаллизатор 11, охлаждаемый умягченной водой при давлении 3 - 6 атм. Кристаллизаторы могут иметь различную форму, В плавильной камере или в отдельной автономной камере располагается один или несколько электронно-лучевых нагревателей (пушек) 9. Подача переплавляемого материала, в частности заготовки 8, осуществляется при помощи механизма подачи. При переплаве заготовок могут использоваться механизмы подачи, применяемые в вакуумных дуговых печах, с учетом того, что для установок ЭЛП не требуется мощных токоподводов. При ЭЛП могут с успехом также переплавляться брикеты, штабики, гранулы, стружка и т.д., и в этом случае предусматриваются специальные способы их подачи.

Наплавленный слиток формируется в водоохлаждаемом кристаллизаторе по методу полунепрерывной разливки. Для создания наиболее выгодных условий рафинирования металла и упрощения конструкции плавильных установок поверхность жидкой ванны на протяжении всей плавки поддерживается на уровне верхнего среза кристаллизатора. Это достигается перемещением слитка по ходу плавки специальным механизмом вытягивания 14.



1 - площадка обслуживания; 2,3- вакуумные насосы; 4 - камера; 5 - шток механизма подачи заготовки; 6 - привод механизма подачи; 7- механизм вращения заготовки; 8 - заготовка; 9 - электроннолучевая пушка; 10 - стробоскопическая смотровая система; 11 - поворотный кристаллизатор; 12 - манипулятор; 13 - слиток; 14 - шток механизма вытягивания слитка; 15 - привод механизма вытягивания

Рисунок 5.11 - Схема электронно-лучевой установки

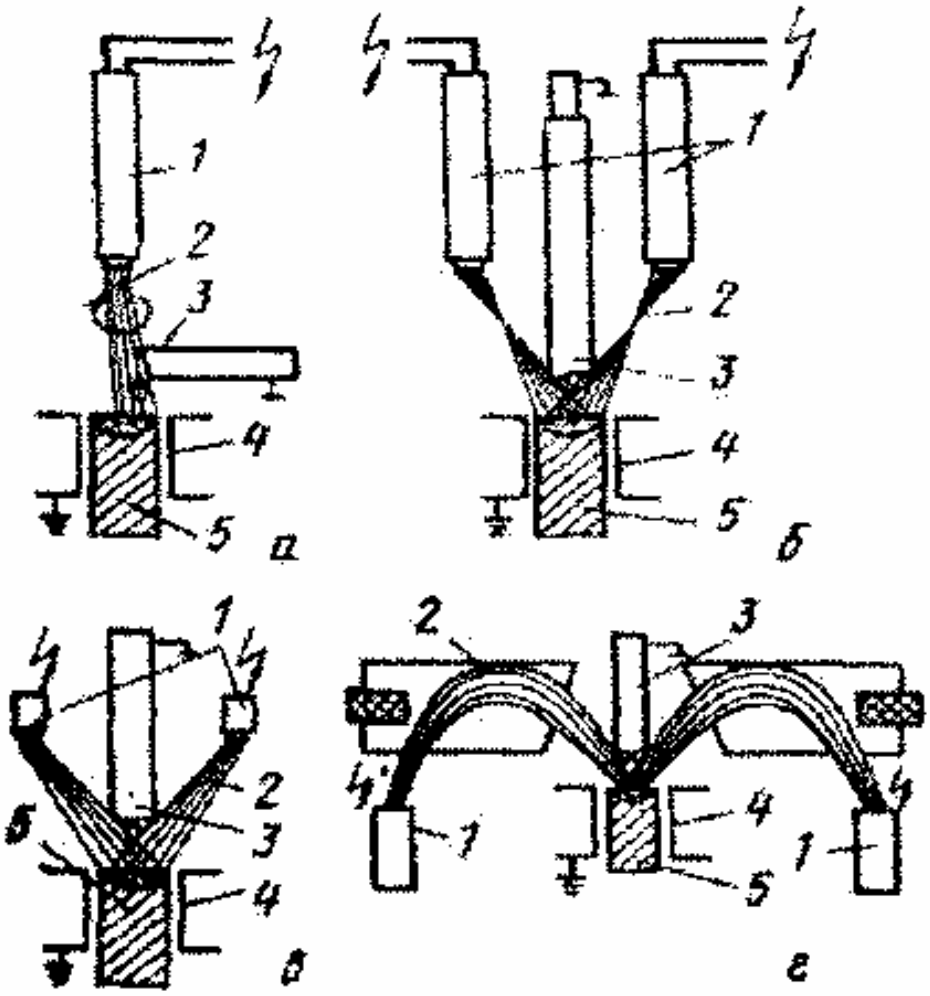
ЭЛП осуществляется при остаточном давлении $133\text{-}10^{-4}$ - $133\text{-}10^{-5}$ Н/м^2 (10^{-4} - 10^{-5}мм рт. ст.). Печь имеет вакуумную систему, включающую насосы трех типов: диффузионные, бустерные и механические (форвакуумные), которые включаются последовательно. Для рациональной загрузки и выгрузки электронно-лучевые печи обеспечиваются специальными шлюзовыми устройствами. Наблюдение за плавкой осуществляется через смотровые стекла, кото-

рые защищаются от конденсации паров стробоскопической смотровой системой *10* (один или два диска с узкими щелями, расположенными перед смотровым стеклом, вращаются с большой скоростью; в случае двух дисков они вращаются в противоположные стороны; в результате стробоскопического эффекта быстровращающиеся диски становятся как бы прозрачными; при этом резко снижается интенсивность напыления материала на смотровые стекла).

Существуют различные технологические схемы ЭЛП (рисунок 5.12):

а) с боковой подачей расходуемых электродов при вертикальном расположении электроннолучевой пушки (рисунок 5.12,а);

б) с вертикальным расположением расходуемого электрода и использованием нескольких аксиальных пушек с электромагнитным отклонением лучей (рисунок 5.12,б) или применением радиального электронно-лучевого нагревателя с электромагнитным управлением лучей (рисунок 5.12,в), или применением нескольких пушек с линейными лучами, отклоненными на 180 град (рисунок 5.12,г).

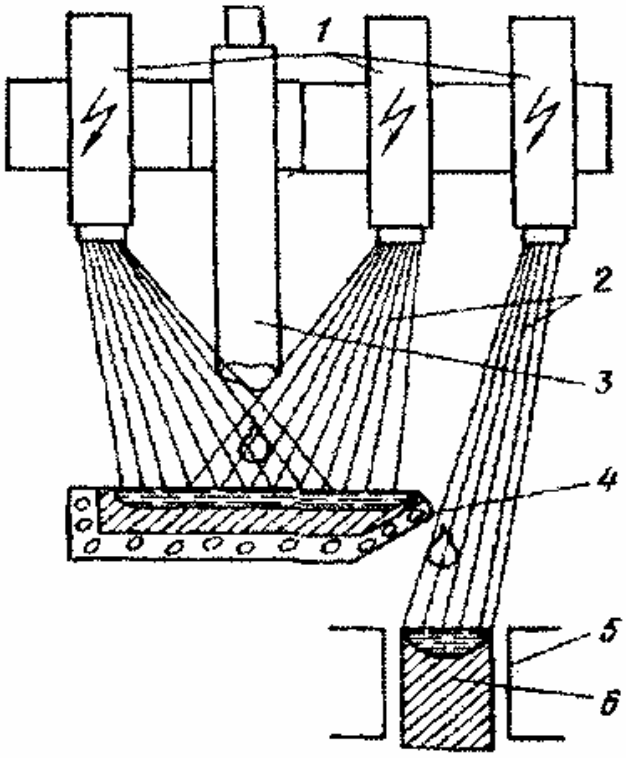


1 - пушка; 2 - электронный луч; 3 - переплавляемая заготовка; 4 - водоохлаждаемый кристаллизатор; 5 – слиток

Рисунок 5.12 - Схемы электронно-лучевого переплава

Указанные схемы отличаются условиями нагрева и величиной реакционной поверхности жидкой металлической фазы. Считают, что схема с вертикальным расположением заготовки отвечает лучшим условиям протекания процесса ЭЛП.

Для повышения эффективности рафинирования в электроннолучевых печах применяют схемы переплава с использованием промежуточной емкости (рисунок 5.13). Эта схема обеспечивает более развитую реакционную поверхность, увеличение производительности, исключает попадание в кристаллизатор твердых кусков, иногда отваливающихся от переплавляемых электродов, и позволяет производить дополнительную обработку жидкого металла, например микролегирование редкоземельными элементами и раскисление.



1 - пушка; 2 - электронный луч; 3 - переплавляемая заготовка; 4 - водоохлаждаемая промежуточная емкость; 5 - кристаллизатор; 6 - слиток

Рисунок 5.13 - Схема электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью

Основные потребители и пути совершенствования технологии.

Электронно-лучевая плавка находит широкое применение для получения высокореакционных, тугоплавких (W, Mo, Ni), высокочистых металлов и для рафинирующего переплава стали различных марок и сплавов. Ее применяют для получения очень чистых по примесям цветных металлов, кислороду, азоту и неметаллическим включениям шарикоподшипниковой стали для скоростных подшипников, жаропрочных, коррозионностойких и прецизионных сплавов, а также для производства крупных слитков из конструкционной стали высокой степени чистоты, используемой в энергетическом машиностроении. Переплав обеспечивает получение слитков с плотной макроструктурой без усадочных и

ликвационных дефектов, низкое содержание газов и неметаллических включений при их высокой дисперсности и равномерном распределении, повышение служебных характеристик, магнитных и жаропрочных свойств.

К примеру роторы мощных паровых турбин и другие изделия ответственного назначения выплавляют с электроннолучевой печи.

Дальнейшим развитием этого направления является холодноподовое электронно-лучевое рафинирование, которое осуществляется в промежуточных емкостях, выполненных из меди. Жидкое состояние металла и необходимый перегрев поддерживаются с помощью электронно-лучевых пушек со сканирующим лучом. Кристаллизация металла осуществляется в водоохлаждаемом кристаллизаторе. Металл в первую промежуточную емкость можно подавать в виде твердых заготовок (слитков, стружки и других отходов), в жидком виде путем периодической заливки из миксера или непрерывно по специальным трубопроводам.

В настоящее время обсуждается вопрос о создании электронно-лучевой установки (агрегата) с холодноподовым рафинированием производительностью 50000 - 100000т в год для производства нержавеющих сталей с особо низким содержанием углерода и высокопрочных сталей.

Контрольные вопросы:

1) Перечислите основные методы получения сталей специального назначения?
2) Вакуумный индукционный переплав. Принцип работы установок. Основные преимущества и недостатки?
3) Вакуумный дуговой переплав. Принцип работы установок. Основные преимущества и недостатки?
4) Электрошлаковый переплав. Принцип работы установок. Основные преимущества и недостатки?
5) Плазменно-дуговой переплав. Принцип работы установок. Основные преимущества и недостатки?
6) Электронно – лучевой переплав. Принцип работы установок. Основные преимущества и недостатки?

Библиографический список

1 Симонян, Л.М. Металлургия спецсталей. Теория и технология спецэлектрометаллургии: Курс лекций / Л.М. Симонян, А.Е. Семин, А.И. Кочетов. - М.: МИСиС, 2007. – 180 с.
2 Кудрин, В.А. Теория и технология производства стали: Учебник для вузов. – М.: «Мир», ООО «Издательство АСТ», 2003.– 528 с.
3 Гольдштейн, М.И. Специальные стали: учебник для вузов / М.И. Гольдштейн, Грачев С.В., Векслер Ю.Г. – М.: Металлургия, 1985. – 408 с.
4 Габриэлян, Д. И. Прецизионные сплавы / Д.И. Габриэлян. – М.: Металлургия, 1972. – 104с.
5 Падерин, С.Н. Теория и расчеты металлургических систем и процессов / С.Н. Падерин, В.В. Филиппов. – М.: МИСиС, 2002. – 334 с.
6 Кудрин, В.А. Технология получения качественной стали // В.А. Кудрин, В.М. Парма. - М: Металлургия, 1984. 320 с.
7 Поволоцкий, Д. Я.Электрометаллургия стали и ферросплавов / Д.Я. Поволоцкий, В. Е.Рощин, М. А. Рысс и др. – М.: Металлургия, 1984. – 568с.
8 Братковский, Е.В., Электрометаллургия стали и спецэлектро-металлургия / Е.В. Братковский, А.В. Заводяный.- Новотроицк: НФ МИСиС, 2008.
9 Кудрин, В.А. Теория и технология производства стали: учебник для вузов / Ю.В. Кряковский, А.Г. Шалимов. - М.: «Мир», ООО «Издательство АСТ», 2003. - 528 с.
10 Воскобойников, В.Г. Общая металлургия: учебник для вузов / В.Г. Кудрин, А.М. Якушев. - М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. - 768 с.
11 Альперович, М.Е. Вакуумный дуговой переплав и его экономическая эффективность/ М.Е. Альперович. – М.: Металлургия, 1979. – 235 с.
12 Донской, А.В. Электроплазменные процессы и установки в машиностроении / А.В. Донской, В.С. Клубникин. - Л.: «Машиностроение», ЛО, 1979. - 221 с.

ЕВГЕНИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ БРАТКОВСКИЙ
АЛЕКСЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ ЗАВОДЯНЫЙ
АЛЕКСЕЙ НИКОЛАЕВИЧ ШАПОВАЛОВ
ЕВГЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ ШЕВЧЕНКО

СПЕЦИАЛЬНЫЕ СТАЛИ

Учебное пособие
для студентов направления подготовки 150400 «Металлургия»

Подписано в печать 20.11.2013		
Формат 60x90 1/16	Печать офсетная	Уч.-изд.л. 5,44
Рег.№ 25	Тираж 50 экз.	

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» Новотроицкий филиал
462359, Оренбургская обл., г. Новотроицк, ул. Фрунзе, 8.
E-mail: nfmisis@yandex.ru