



ВЫБОР И ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

ТОМ
2 **ВЫБОР И ПРИМЕНЕНИЕ
КОНСТРУКЦИОННЫХ
СТАЛЕЙ**



УДК 620.22(075.8)

ББК 30.3я73

В92

Издание выходит с 2017 года

А в т о р ы:

Н. А. Свидунович, П. А. Витязь, И. В. Войтов, Д. В. Куис, М. Н. Мюрек

Р е ц е н з е н т ы:

кафедра «Технология металлов» Государственного учреждения высшего профессионального образования «Белорусско-Российский университет»
(доктор технических наук, профессор Ф. Г. Ловшенко);
заслуженный деятель науки Республики Беларусь, академик НАН Беларуси,
доктор технических наук, профессор В. В. Клубович

Выбор и применение материалов : учебное пособие.
В92 В 5 т. Т. 2. Выбор и применение конструкционных сталей /
Н. А. Свидунович [и др.] ; под ред. Н. А. Свидуновича. –
Минск : Беларуская навука, 2019. – 625 с. : ил.
ISBN 978-985-08-2389-2.

В учебном пособии описаны процессы получения конструкционных сталей. Приведены технологические способы управления качеством изготовления деталей машин и оборудования: обработка металлов давлением, сварка, а также процессы термической, химико-термической и механической обработки деталей. Рассмотрена взаимосвязь состав – структура – свойства основных марок сталей и их конкретное применение, что является базой рационального выбора материалов и режимов их упрочнения для типовых деталей машин.

Адресуется студентам и аспирантам технических университетов, а также инженерам и техникам машиностроительных, металлургических и других отраслей промышленности.

УДК 620.22(075.8)

ББК 30.3я73

ISBN 978-985-08-2389-2 (т. 2)
ISBN 978-985-08-2204-8

© Оформление. РУП «Издательский дом «Беларуская навука», 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	6
Введение	9
Управление качеством промышленной продукции и материалов технического назначения	9
Общая характеристика материалов	24
Наноматериалы	39
Глава 1. Основы металлургии стали	44
1.1. Значение железа в истории человечества	44
1.2. Классификация современных конструкционных материалов	51
1.3. Металлургия прошлых лет	59
1.4. Современная черная металлургия	67
1.5. Краткая характеристика физико-химических процессов при выплавке стали	105
Глава 2. Основные процессы изготовления деталей машин и заготовок из конструкционной стали	130
2.1. Машиностроение – главная отрасль промышленности Республики Беларусь	130
2.2. Обработка металлов давлением	133
2.2.1. Общая характеристика процессов	133
2.2.2. Прокатка	148
2.2.3. Ковка	158
2.2.4. Объемная штамповка	166
2.2.5. Листовая штамповка	174
2.2.6. Перспективы развития кузнечно-штамповочного производства	177
2.3. Сварочное производство	188
2.3.1. Общая характеристика процессов	188
2.3.2. Электродуговая сварка	198
2.3.3. Сварка плавлением	203

2.3.4. Сварка давлением	207
2.3.5. Производство сварных и комбинированных заготовок	213
2.4. Механическая обработка	217
2.4.1. Общая характеристика процессов	217
2.4.2. Обработка на токарных станках	224
2.4.3. Обработка на фрезерных станках	235
2.4.4. Обработка на сверлильных и расточных станках	241
2.4.5. Обработка на строгальных, долбежных и протяжных станках	247
2.4.6. Обработка на шлифовальных станках	253
2.4.7. Отделочные методы обработки	257
2.4.8. Технологические процессы механической обработки ...	261
2.4.9. Обработка заготовок поверхностным пластическим деформированием	266
2.4.10. Электро-физико-химические методы обработки	273
Глава 3. Термическая и химико-термическая обработка стали	285
3.1. Диаграмма железо – цементит	285
3.2. Классификация видов термической обработки стали	307
3.3. Отжиг сталей первого рода	309
3.4. Отжиг сталей второго рода	321
3.5. Закалка сталей	342
3.6. Отпуск сталей	356
3.7. Термомеханическая обработка сталей	371
3.8. Химико-термическая обработка сталей	383
Глава 4. Выбор и применение конструкционных сталей и материалов	392
4.1. Краткая характеристика показателей прочности сталей	392
4.2. Общая классификация конструкционных сталей	408
4.3. Влияние углерода и постоянных примесей на свойства сталей	411
4.4. Углеродистые стали	416
4.4.1. Стали обыкновенного качества	416
4.4.2. Углеродистые качественные стали	420
4.5. Легированные строительные стали	424
4.5.1. Низколегированные строительные стали	424
4.5.2. Строительные стали повышенной прочности	426
4.5.3. Высокопрочные строительные стали	428
4.6. Легированные машиностроительные стали	431
4.6.1. Легированные конструкционные стали нормальной и повышенной прочности	436
4.6.2. Легированные конструкционные высокопрочные стали	442
4.6.3. Легированные конструкционные стали с повышенной циклической прочностью	451

4.7. Стали с улучшаемой обрабатываемостью резанием	462
4.8. Стали с высокой технологической пластичностью и свариваемостью	465
4.9. Пружинные стали	472
4.10. Подшипниковые стали	485
4.11. Износостойкие материалы	493
Глава 5. Проблемы и примеры применения конструкционных сталей и материалов	517
5.1. Проблемы выбора материалов	517
5.2. Технические условия и стандарты	524
5.3. Долговечность конструкций и виды отказов	526
5.4. Влияние технологических свойств	537
5.5. Критерии выбора марки стали	543
5.6. Выбор режима термической обработки	554
5.7. Пример выполнения контрольной работы по курсу «Материаловедение»	557
5.7.1. Выбор марки стали	559
5.7.2. Характеристики стали 40ХН	561
5.7.3. Выбор и обоснование режимов термической обработки	563
5.8. Курсовая работа по курсу «Материаловедение и ТКМ»	565
5.8.1. Задачи и исходные данные курсового проекта	565
5.8.2. Разработка технологического маршрута изготовления детали	574
5.8.3. Разработка технологического процесса термической обработки стали	574
5.8.4. Выбор технологического оборудования	583
Список использованных источников	590
<i>Приложение 1. Система маркировки сталей в различных странах</i>	<i>593</i>
<i>Приложение 2. Сортовой, фасонный и листовой прокат – государственные стандарты и технические условия</i>	<i>612</i>
<i>Приложение 3. Упрочнение металлических изделий – государственные стандарты</i>	<i>613</i>
<i>Приложение 4. Конструкционные материалы, применяемые для изготовления средств крепления</i>	<i>613</i>
<i>Приложение 5. Типовые режимы термической обработки для различных сталей</i>	<i>621</i>

ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИИ СТАЛИ

1.1. Значение железа в истории человечества

В 1910 г. в шведском городе Стокгольме проходил Международный геологический конгресс. Одной из важнейших задач, стоявшей перед учеными, была проблема борьбы с железным голодом. Специальная комиссия, которой было поручено подсчитать мировые запасы железа, представила баланс железных ресурсов Земли. По заключению авторитетных специалистов, полное истощение залежей железа должно было наступить через 60 лет, т. е. к 1970 г.

К счастью, ученые мужи оказались плохими оракулами, и сегодня перед человечеством не стоит необходимость ограничивать себя в потреблении железа. Ну а что было бы, если бы их пророчество сбылось и железные руды иссякли? Что случилось бы, если бы железо вообще исчезло и на Земле не осталось ни единого грамма этого элемента?

«...На улицах стоял бы ужас разрушения: ни рельсов, ни вагонов, ни паровозов, ни автомобилей... не оказалось бы, даже камни мостовой превратились бы в глинистую труху, а растения начали бы чахнуть и гибнуть без живительного металла. Разрушение ураганом прошло бы по всей Земле, и гибель человечества сделалась бы неминуемой. Впрочем, человек не дожил бы до этого момента, ибо, лишившись трех граммов железа в своем теле и в крови, он бы прекратил свое существование раньше, чем развернулись бы нарисованные события. Потерять все же-

лезе – пять тысячных процента своего веса – было бы для него смертью!»

Что и говорить, «веселенькую» картину нарисовал известный российский и советский минералог академик А. Е. Ферсман, желая показать ту громадную роль, которую играет в нашей жизни железо. Не будь этого металла, на Земле не смогло бы существовать ничто живое, ведь этот химический элемент находится в крови всех представителей животного мира нашей планеты. Двухвалентное железо содержится в гемоглобине – веществе, обеспечивающем кислородом ткани живых организмов. Именно железу кровь обязана своим красным цветом.

В таблице элементов Менделеева трудно найти другой металл, с которым была бы так неразрывно связана история цивилизации, и через тысячелетия человек пронес уважение к железу и людям, добывающим и обрабатывающим его. В древности у некоторых народов железо ценилось дороже золота. Лишь представители знати могли украшать себя изделиями из этого металла, причем нередко в золотой оправе. В Древнем Риме из железа изготавливали даже обручальные кольца. Постепенно, по мере развития металлургии, этот металл становился доступнее и дешевле. И все же еще сравнительно недавно многие отсталые народы, испытывая огромную нужду в железе, готовы были платить за него баснословную цену. Известный английский мореплаватель XVIII в. Джеймс Кук так рассказывал об отношении к железу туземцев Полинезийских островов: «...Ничто так не манило к себе посетителей наших судов, как этот металл; железо всегда было для них самым желанным, самым драгоценным товаром». Однажды его матросам удалось за ржавый гвоздь получить целую свинью. В другой раз за несколько старых ненужных ножей островитяне дали матросам столько рыбы, что ее хватило на много дней для всей команды судна.

Первое железо, попавшее еще в глубокой древности в руки человека, было, по-видимому, не земного, а космического происхождения – оно входило в состав метеоритов, падавших на нашу планету. Не случайно на некоторых древних языках железо

именуется «небесным камнем». В то же время многие крупные ученые еще в конце XVIII в. не допускали и мысли о том, что Вселенная может «снабжать» Землю железом. В 1751 г. вблизи города Ваграма (Австрия) упал метеорит. Спустя сорок лет венский профессор Штютц писал об этом событии: «Можно себе представить, что в 1751 году даже самые просвещенные люди в Германии могли поверить в падение куска железа с неба – насколько слабы были тогда их познания в естественных науках... Но в наше время непрослительно считать возможным подобные сказки».

Такой же точки зрения придерживался и известный французский химик Антуан Лоран Лавуазье, который в 1772 г. согласился с мнением своих коллег, что «падение камней с неба физически невозможно». В 1790 г. Французская академия наук даже приняла специальное решение: впредь вообще не рассматривать сообщений о падении камней на Землю, поскольку ученым мужам была совершенно очевидна нелепость «россказней» о небесных пришельцах. Но ничего не подозревавшие об этом решении французских академиков метеориты продолжали частенько посещать нашу планету и тем самым смущать покой светил науки. Фактов, подтверждающих это, накапливалось все больше и больше, а они, как известно, вещь упрямая, и в 1803 г. Французская академия наук была вынуждена признать «небесные камни» – отныне им разрешалось падать на Землю.

На поверхность земного шара ежегодно выпадают сотни тысяч тонн метеоритного вещества, содержащего до 90 % железа. Самый крупный железный метеорит весом около 66 т был найден в 1920 г. в Намибии (Юго-Западная Африка). Он получил название «Гоба». В 1896 г. известный американский полярный исследователь Роберт Пири обнаружил во льдах Гренландии железный метеорит весом 33 т. С колоссальными трудностями находка была доставлена в Нью-Йорк, где и хранится до сих пор. Но истории известны случаи, когда вес космических странников, встретивших на своем пути Землю, был неизмеримо больше. В 1891 г. в штате Аризона (США) была обнаружена огромная

воронка диаметром 1200 и глубиной 175 м. Ее образовал гигантский железный метеорит, упавший здесь в доисторические времена, который, по мнению ученых, весил несколько десятков тысяч тонн.

Метеоритное железо сравнительно легко подвергалось обработке, и человек начал изготавливать из него простейшие орудия. Но метеориты не падали по заказу, а необходимость в железе была постоянной, поэтому люди стремились научиться извлекать его из руд. И наконец настало время, когда человек уже мог использовать не только небесное железо, но и свое, земное. На смену бронзовому веку пришел век железный.

Железо – один из наиболее распространенных на Земле элементов: земная кора содержит около 5 % железа. Основные рудные минералы железа – магнетит, гематит, бурый железняк, сидерит. Магнетит содержит до 72 % железа и, как показывает его название, обладает магнитными свойствами. Гематит, или красный железняк, содержит до 70 % железа, и название минерала в переводе с греческого языка означает «кроваво-красный». Само же слово «железо» произошло, как полагают некоторые ученые, от санскритского слова «джальжа» – металл, руда. Другие считают, что в основе русского названия элемента лежит санскритский корень «жель», означающий «блестеть», «пылать».

Конец XVIII и начало XIX в. ознаменовались настоящим вторжением железа в технику: 1778 г. – построен первый железный мост; 1788 г. – вошел в строй первый водопровод, сделанный из железа; 1818 г. – спущено на воду первое судно, построенное из железа. Вот что писал в 1868 г. лондонский «Морской сборник»: «В Гринкоке ремонтируется сейчас первый в мире железный корабль “Вулкан”, построенный в 1818 году. 50 лет тому назад во время его спуска со стапеля народ собрался со всех окрестностей, чтобы посмотреть на чудо – действительно ли корабль, построенный из железа, в состоянии держаться на воде». Спустя четыре года, в 1822 г., между Лондоном и Парижем уже курсировал созданный в Англии первый железный пароход. Крупным потребителем железа стали железные дороги – первая была введена в эксплуатацию в Англии в 1825 г.

В 1889 г. в Париже было завершено строительство величественной башни, созданной из железа французским инженером Гюставом Эйфелем. Многие его современники считали, что это ажурное 300-метровое сооружение окажется непрочным и ненадежным. Возражая скептикам, автор проекта утверждал, что его детище простоит не менее четверти века. Но вот прошло уже 130 лет, а Эйфелева башня, ставшая символом Парижа, до сих пор привлекает многочисленных туристов. Правда, в 1928 г. некоторые американские газеты сообщили, будто бы башня уже насквозь проржавела и может обрушиться. Но исследование состояния железных конструкций, проведенное французскими учеными и инженерами, показало, что это сообщение было обычной газетной уткой: металл, покрытый плотным слоем краски, и не думал ржаветь.

И все же опасность ржавления, как дамоклов меч, висит над железными сооружениями и изделиями. Ржавчина, или коррозия, – страшный враг железа. По данным ряда ученых, лишь за период с 1820 по 1923 г. при общем мировом производстве железа 1766 млн т. чуть ли не половину – 718 млн т – «съела» коррозия. Англии, например, коррозия ежегодно наносит убыток в 600 млн фунтов стерлингов.

Немудрено, что проблемой защиты железа от коррозии люди заинтересовались еще в древние века. В трудах древнегреческого историка Геродота (V в. до н. э.) мы находим упоминание об оловянных покрытиях, предохраняющих железо от ржавчины. В Индии уже около 1600 лет существует общество по борьбе с коррозией. Примерно полтора тысячелетия назад это общество принимало участие в постройке Дворцов Солнца на побережье Индийского океана у г. Канерака. И хотя вследствие подъема океана территория дворцов была затоплена морем, железные балки находились в прекрасном состоянии. Таким образом, уже в далекие времена индийские мастера знали, как противостоять процессу коррозии.

Об этом же свидетельствует и знаменитая железная колонна – одна из многочисленных достопримечательностей индийской сто-

лицы. Вот что писал в своей книге «Открытие Индии» Джавхарлал Неру: «Древняя Индия добилась, очевидно, больших успехов в обработке железа. Близ Дели высится огромная железная колонна, ставящая в тупик современных ученых, которые не могут определить способ ее изготовления, предохранивший железо от окисления и других атмосферных явлений». Колонна была воздвигнута в 415 г. в честь царя Чандрагупты II. Первоначально она находилась в г. Матхура, но в 1050 г. царь Ананг Пола перевез ее в Дели. Колонна весит около 6,5 т, ее высота 7,3 м, диаметр от 42 см у основания и до 30 см у вершины. Изготовлена она почти из чистого железа (99,72 %), чем и объясняется ее «долголетие»: любое другое, менее чистое железо несомненно превратилось бы за прошедшие 15 столетий в труху.

Как же смогли древние металлурги изготовить эту чудесную колонну, перед которой бессильно время? Некоторые писатели-фантасты не исключают, что она создана на другой планете, а завез ее к нам экипаж космического звездолета, который захватил ее с собой либо в качестве вымпела, либо как дар жителям Земли. По другим версиям, колонна выкована из крупного железного метеорита. И все же, пожалуй, правы те ученые, которые объясняют этот факт высоким искусством древнеиндийских металлургов. Индия настолько была известна на Востоке своими изделиями из стали, что у персов в разговоре о чем-нибудь излишнем и ненужном бытовала поговорка: «В Индию сталь возить», аналогичная русской: «Ехать в Тулу со своим самоваром».

Сегодня обычной нержавеющей сталью уже никого не удивишь. Так, в США выдан патент на прозрачную нержавеющую сталь. Этот металл изготавливают электрохимическим путем, при этом между отдельными кристаллами образуются мельчайшие поры, которые и делают сталь прозрачной.

В наши дни сталевары в совершенстве овладели выплавкой металла самого различного назначения. Каких только сталей не встретишь в перечне продукции современного металлургического завода! Нержавеющая и быстрорежущая, шарикоподшипниковая

и пружинная, магнитная и немагнитная, жаропрочная и хладостойкая и др.

Для обработки особо твердых материалов применяют, например, алмазную сталь, содержащую примерно 5 % вольфрама.

Спрос на железо велик. Достаточно сказать, что уже к концу XIX в. из каждых 100 кг металла, потребляемых в промышленности, сельском хозяйстве, быту, 96 кг приходилось на долю железа.

Строительство городов и прокладка новых стальных магистралей, спуск на воду океанских лайнеров и сооружение гигантских доменных печей, создание мощных синхрофазотронов и запуск космических кораблей – все это немисливо без железа. Но этот металл оказался не только созидателем – с ним связаны и многие кровавые страницы истории человечества. Миллиардами снарядов и бомб обрушился он на людей в годы Первой и Второй мировых войн. Железом разрушалось то, что веками человек создавал из железа при помощи железа.

Почти два тысячелетия назад древнеримский писатель и ученый Плиний Старший писал: «Железные рудокопи доставляют человеку превосходнейшее и зловреднейшее орудие. Ибо сим орудием прорезываем мы землю, сажаем кустарники, обрабатываем плодовые сады и, обрезывая дикие лозы с виноградом, понуждаем их каждый год юнеть. Сим орудием выстраиваем дома, разбиваем камни и употребляем железо на все подобные надобности. Но тем же самым железом производим брани, битвы и грабежи и употребляем оное не только вблизи, но мещем окрыленное вдаль, то из бойниц, то из мощных рук, то в виде оперенных стрел. Самое порочнейшее, по мнению моему, ухищрение ума человеческого. Ибо, чтобы смерть скорее постигла человека, создали ее крылатою и железу придали перья. Того ради да будет вина приписана человеку, а не природе». Не будем и мы винить железо в грехах человеческих...

В последние десятилетия у железа появилось много соперников: алюминий, титан, ванадий, бериллий, цирконий и другие металлы ведут массированное наступление на позиции железа.

Но и железо, несмотря на явно «пенсионный» возраст (более пяти тысяч лет), не собирается сходить со сцены. Академик А. Е. Ферсман писал: «Будущее за другими металлами, а железу будет отведено почетное место старого, заслуженного, но отслу жившего свое время материала. Но до этого будущего еще дале ко... Железо пока – основа металлургии, машиностроения, путей сообщения, судостроения, мостов, транспорта».

1.2. Классификация современных конструкционных материалов

Количество марок и типов конструкционных материалов, ис пользующихся в настоящее время, составляет десятки тысяч. Их классификация чаще всего производится по химическому соста ву. В соответствии с этой классификацией все конструкционные материалы делятся на две большие группы: металлы и неметал лы (рис. 1.1). При этом под понятием «металлы» подразумевают ся как чистые металлы (например, алюминий, медь, серебро, зо лото), применяемые в качестве проводников электрического тока,

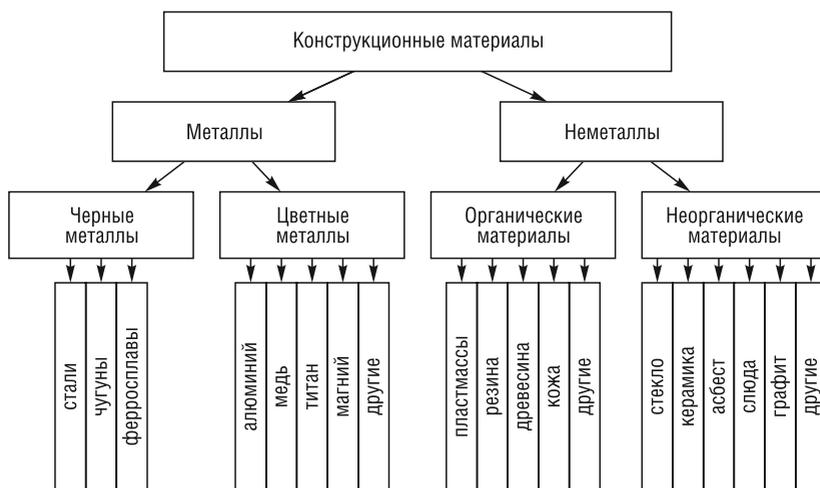


Рис. 1.1. Упрощенная классификация конструкционных материалов

так и их сплавы, которые представляют собой материалы, образовавшиеся в результате затвердевания расплавов, состоящих из двух и более химических элементов. Так, сплавы железа с углеродом образуют *стали* (до 2,14 % С) и *чугуны* (2,14–6,67 % С), сплавы алюминия с кремнием – *силумины*, меди с оловом – *бронзы*, меди с цинком – *латуни* и т. д.

К сплавам черных металлов относятся сплавы на основе железа (стали и чугуны), марганца и хрома (ферросплавы, применяемые для легирования железоуглеродистых сплавов). Все остальные металлы и их сплавы относятся к цветным или, точнее, к нежелезным. По физическим и химическим свойствам цветные металлы делятся на легкие (алюминий, магний, титан, бериллий, литий, натрий и др.), тяжелые (медь, никель, кобальт, свинец, олово и др.), тугоплавкие, имеющие температуру плавления более 1600 °С (вольфрам, рений, технеций, ниобий, молибден и др.), благородные или драгоценные (золото, серебро, платина, родий, палладий и др.), радиоактивные (технеций, актиний, торий, уран и др.) и т. д. Самую высокую температуру плавления имеет вольфрам – 3410 °С, самую низкую – ртуть (–39 °С); самой высокой плотностью характеризуется иридий – 23,36 г/см³, самой низкой – литий (0,53 г/см³). Наиболее низким электрическим сопротивлением, 10⁻⁸ Ом·м, обладают серебро – 1,6; медь – 1,7; золото – 2,3; алюминий – 2,6. Самый пластичный химический элемент – золото. Из одного грамма золота можно вытянуть проволоку длиной 2,4 км, диаметр которой при этом составит 0,0045 мм, т. е. будет в 20 раз тоньше человеческого волоса. Самый дешевый металлический конструкционный материал – серый чугун – около 200 долл./т, самый дорогой химический элемент – калифорний, который продавался в 1970 г. по цене 10 долл. за микрограмм, или 10 млн долл. за грамм (для сравнения: стоимость 1 г золота – около 12 долл.).

Характерными особенностями металлических материалов являются кристаллическое строение (атомы расположены в строго определенном порядке друг относительно друга), высокие тепло- и электропроводность, хорошая пластичность и, соответственно,

способность к обработке давлением (прокатке, ковке и пр.), высокие прочность, твердость и другие показатели механических свойств.

Благодаря этим и другим свойствам, доля металлов и их сплавов в общем объеме конструкционных материалов в машиностроении составляет около 90 %, при этом основными материалами среди металлов и сплавов являются стали и чугуны, общемировой выпуск которых в 2000 г. составил соответственно 828 и 569 млн т (необходимо иметь в виду, что чугун является промежуточным продуктом, его основная масса перерабатывается в сталь и только незначительная часть, менее 10 %, используется как конструкционный материал).

По химическому составу стали делятся на углеродистые и легированные. Углеродистые стали, кроме железа и углерода, содержат марганец (до 0,8 %) и кремний (до 0,4 %), а также вредные примеси – серу и фосфор (до 0,05 % каждого). В состав легированных сталей с целью повышения их свойств или придания им новых свойств (стойкость в кислотах, окалиностойкость, износостойкость и т. д.) вводят легирующие элементы: марганец (более 1 %), кремний (более 0,5 %), хром, никель, молибден, вольфрам и др. Суммарное содержание легирующих элементов при этом может достигать 50 %.

По назначению стали делятся на следующие основные группы:

– *конструкционные*, применяемые для изготовления самой широкой номенклатуры изделий, таких как трубы, рельсы, шарико- и роликоподшипники, пружины, рессоры, шестерни, валы, строительные конструкции и пр.;

– *инструментальные*, используемые для получения измерительного, штампового, металлорежущего, хирургического, бурового и прочего инструмента;

– *специальные*, со специальными физическими свойствами: высоким электросопротивлением, заданным коэффициентом термического расширения, высокой магнитной проницаемостью и т. д.

Широкое применение стали и чугуна в качестве конструкционных материалов объясняется двумя факторами: большим

распространением железа в земной коре (4,2 %) и его способностью изменять свои свойства в результате легирования, термической, химико-термической и термомеханической обработок. Первые легированные стали появились около 150 лет назад, а теоретические основы термической обработки были заложены Д. К. Черновым в 1868 г. после открытия им полиморфизма железа. При этом необходимо отметить, что еще древние люди знали о способности металлов упрочняться в результате холоднойковки или нагрева до определенных температур и резкого охлаждения (закалка).

По основным технико-экономическим показателям: механическим (прочность, пластичность, ударная вязкость, твердость, выносливость и др.), технологическим (свариваемость, обрабатываемость резанием, штампуемость и др.), служебным (надежность, долговечность, износостойкость, жаропрочность и др.), а также по себестоимости производства – стали не имеют себе равных среди других сплавов.

Серьезным недостатком сплавов железа является их склонность к коррозии. Примерно 20 % получаемой в мире стали идет на покрытие потерь от коррозии. Транспортные средства, металлоконструкции и другие сооружения, работающие и находящиеся на открытом воздухе, из-за коррозии требуют периодического ремонта. А ремонтные работы плохо поддаются механизации и автоматизации и требуют специалистов высокой квалификации. Подсчитано, что примерно десятая часть рабочей силы в мире занята ремонтными работами.

Вторым недостатком железа является его высокая плотность, из-за чего локомотивы, суда, вагоны, автомобили оказываются слишком массивными. Доля полезного груза в автотранспорте составляет 10–20 %, в железнодорожном – 40–50 %, т. е. более половины энергии расходуется на перемещение самого транспортного средства. Велики убытки из-за лишнего веса машин и в других отраслях: в сельском хозяйстве, на морском и речном транспорте и т. д. В последние десятилетия наряду со сталью и чугуном все более широкое применение находят сплавы алюминия,

магния, титана и других металлов. Эти сплавы лишены некоторых недостатков, присущих сплавам железа.

В свободном виде алюминий был получен в 1825 г. В течение более 60 лет он оставался редким драгоценным металлом, не нашедшим практического применения. В 1886 г. французский инженер-металлург П. Эрру и американский аспирант-физик Ч. Холл независимо друг от друга предложили промышленный способ получения алюминия путем электролиза глинозема Al_2O_3 , растворенного в расплавленном криолите Na_2AlF_6 (температура плавления глинозема 2050 °С, применение криолит-глиноземной расплава позволило снизить температуру электролиза до 930 °С).

По объему производства алюминий занимает второе место после стали. Это стало возможным, во-первых, благодаря тому, что запасы алюминиевых руд практически неисчерпаемые: по распространенности в земной коре (7,45 %) он занимает третье место среди всех элементов и первое среди металлов, превосходя по этому показателю в 1,8 раза железо и в 745 раз медь. Во-вторых, алюминий, в отличие от железа, имеет меньшую плотность (2,7 против 7 г/см³) и не подвержен коррозии. В третьих, по удельной прочности (отношение предела прочности к плотности) сплавы алюминия превосходят ряд сталей (табл. 1.1), что позволяет существенно уменьшить массу изделий. Именно поэтому алюминий оказался первым «крылатым» металлом – в авиации у него не было и нет серьезных конкурентов. Затем его стали использовать в ракетостроении, а в последние годы – в производстве автомобилей, тракторов, вагонов, линий электропередач, а также в пищевой и медицинской промышленности, аграрном строительстве и т. д.

Алюминий имеет невысокую температуру плавления (660 °С) и высокую пластичность. Благодаря этому он используется для производства профилей методами непрерывного литья заготовок и прокатки, легко обрабатывается резанием. Применение профилей из алюминиевых сплавов открыло перед строителями возможность создания оптимальных конструкций стеновых

Таблица 1.1. Свойства сплавов (средние данные)

Материал	σ_s , МПа	ρ , кг/м ³	σ_s/γ	Энергозатраты на производство, МДж/т	
				из руды	из вторичных ресурсов
Сталь углеродистая	550	7800	7,1	25,2	1,98
Сталь низколегированная	650	7800	9,3	25,7	2,00
Сталь низколегированная термоупрочненная	1000	7800	12,8	26,4	2,05
Сталь мартенситно-старееющая	2500	7800	32	+	+
Чугун доменный	150	7200	2,1	+	–
Чугун ваграночный серый	200	7200	2,8	36	26
Чугун высокопрочный	500	7200	6,9	36,2	26,2
Алюминиевые сплавы	350	2700	13,0	270	16,6
Алюминиевые композиционные материалы	1100	2600	42,3	+	+
Магниеые сплавы	300	1730	17,3	+	+
Магниеые композиционные материалы	1200	2200	54,5	+	+
Титановые сплавы	1500	4500	33,3	+	+
Стеклопластики типа СВAM	700	1800	38,8	–	–

панелей, подвесных потолков, дверных блоков, оконных рам и других строительных элементов. В настоящее время в мире на эти цели расходуется более 2,5 млн т алюминиевых сплавов. Значительные количества алюминия в виде листа потребляет сельское хозяйство для строительства зернохранилищ, изготовления различного рода тары, работающей в контакте с молоком, удобрениями, растительной массой и т. д. Алюминиевая фольга широко используется в пищевой промышленности как гигиеничный упаковочный материал. Применение алюминия взамен луженой стальной жести для изготовления консервных банок и крышек позволяет отказаться от остродефицитного олова.

Малая плотность магниевых сплавов в сочетании с достаточно высокими удельной прочностью, коррозионной стойкостью, обрабатываемостью давлением и резанием сделали технически и экономически целесообразным их применение в авиации, машино- и приборостроении, космической технике, радиотехнике, полиграфической и текстильной промышленности и т. д. При ме-

ханической обработке этих сплавов допускается скорость резания в 7 раз выше, чем для сталей, и в 2 раза выше, чем для алюминиевых сплавов. Магниевые сплавы немагнитны и не дают искры при трении и ударах. В горячем состоянии они хорошо прессуются, куются и прокатываются. Композиционные материалы на магниевой основе обладают наиболее высокой удельной прочностью среди технических сплавов (см. табл. 1.1).

Алюминий и магний имеют невысокую температуру плавления (соответственно 660 и 651 °С), поэтому максимальная температура эксплуатации сплавов на их основе составляет 250–400 °С (в зависимости от среды и времени работы при высоких температурах).

Титан имеет высокую температуру плавления – 1668 °С, невысокую плотность – 4,5 г/см³, хорошо сопротивляется коррозии на воздухе, в морской воде, кислотах и других агрессивных средах. Он хорошо обрабатывается давлением при 650–1000 °С и плохо – резанием вследствие налипания на режущий инструмент. Сваривается аргонодуговой и всеми видами контактной сварки.

Сплавы титана используются в авиа- и ракетостроении для каркасных деталей, обшивки, топливных баков, лопаток компрессоров, деталей реактивных двигателей и т. д.; в судостроении – для обшивки корпусов судов и подводных лодок, для гребных винтов т. д.; в химической промышленности – для реакторов, насосов, змеевиков, центрифуг и т. д.; в пищевой промышленности – для сепараторов, холодильников, емкостей и т. д.

В данном разделе не представляется возможным рассмотреть все многообразие сплавов, используемых в технике. Можно только отметить, что кроме сплавов железа, алюминия, магния, титана, меди, находят применение сплавы на основе хрома, никеля, бериллия, вольфрама, молибдена и других металлов.

Кроме металлических материалов все более широкое применение в технике получают неметаллические конструкционные материалы, лидирующее положение среди которых занимают *пластические массы* (пластмассы, пластики). Основой пластмассы

являются природные (органические) или синтетические полимеры (от греч. *poly* – много и *meros* – доля, часть), представляющие собой соединения с высокой молекулярной массой, молекулы которых состоят из большого числа регулярно или нерегулярно повторяющихся звеньев одного или нескольких типов (CH_2 , CHF , CF_2 и т. д.). К полимерам органического происхождения относятся натуральный каучук, целлюлоза, белки, природные смолы и др.; к синтетическим полимерам – карбомидные и фенолформальдегидные смолы, полистирол, поливинилхлорид и др.

В состав пластмасс, кроме полимеров, входят минеральные или органические наполнители, пластификаторы, стабилизаторы, красители и др. Изделия из пластмасс характеризуются малой плотностью (0,9–2,5 г/см³, что в среднем в 5–8 раз ниже плотности стали, меди, свинца), высокими диэлектрическими свойствами, хорошими теплоизоляционными характеристиками, устойчивостью к атмосферным воздействиям, достаточно высокой стойкостью к агрессивным средам.

Подсчитано, что 1 кг конструкционных пластмасс заменяет 45 кг проката черных металлов. При этом трудоемкость и энергозатраты на производство пластмасс в 2–3 раза ниже аналогичных показателей для черных металлов.

Пластмассы являются важнейшим конструкционным материалом современной техники. Их используют в машиностроении, электро- и радиотехнике, во всех видах транспорта, в строительстве, медицине и быту. Объем производства изделий из пластмасс в мире превышает 100 млн т, т. е. с учетом плотности физической объем производимых пластмасс сравним с физическим объемом выплавляемой стали.

Особую группу конструкционных материалов представляют *композиционные материалы*, в металлической или неметаллической основе которых имеются усиливающие элементы в виде нитей, волокон или дисперсных частиц другого более прочного (либо более твердого, более износостойкого, более электропроводного и т. д.) материала. В качестве примера можно привести пластик, армированный борными, углеродными или стеклянными

волокнами, жгутами или тканями на их основе; алюминий, армированный нитями стали или бериллия; инструментальные материалы (твердые сплавы), представляющие собой мелкодисперсные карбиды вольфрама и титана в кобальтовой основе. Комбинируя объемное содержание компонентов, получают композиционные материалы с требуемыми значениями твердости, жаропрочности, радиопоглощающих и других специальных свойств.

1.3. **Металлургия прошлых лет**

Металлургия (от греч. *metallurgeo* – обрабатываю металлы, добываю руду) – область науки, техники и отрасли промышленности, охватывающие процессы получения металлов из руд или других материалов, а также процессы, в результате которых металлы и сплавы путем изменения их химического состава и структуры получают необходимый уровень свойств. К металлургии относятся процессы обработки руд перед извлечением из них металлов (дробление, обогащение, окускование и др.), процессы получения металлов из руд, очистка (рафинирование) металлов от нежелательных примесей, термическая, химико-термическая и термомеханическая обработки, обработка металлов давлением и литьем, нанесение на металлы покрытий из металлов и неметаллов, внедрение в поверхностные слои металлических изделий металлов и неметаллов.

Металлургия делится на *черную* и *цветную*. К черным металлам относятся железо, марганец и хром, к цветным – практически все остальные металлы Периодической системы химических элементов. Вопросами получения и обработки драгоценных металлов (золото, серебро, платина, иридий и др.) занимается цветная металлургия.

Первыми металлами, с которыми познакомился человек каменного века, были металлы, встречающиеся в природе в самородном виде – медь, золото, серебро. Наиболее распространенным среди них является медь, которая, вероятно, и стала первым конструкционным металлом. По сравнению с камнем медь

имела ряд преимуществ – изделию из нее можно было придать любую форму, проделать в нем отверстие, заострить края и т. д.

Оценив достоинства меди, человек не мог ограничиться только поисками ее самородков, у него возникла объективная необходимость освоить ее производство. Человек к тому времени почти полтора миллиона лет пользовался костром, знал о способности огня изменять свойства пищи, обжигать сырую глину и пр. Поэтому вполне логичным шагом с его стороны было испытать влияние огня на камни (руду), среди которых встречались самородки меди. Английский ученый Г. Г. Коглен в 1938 г. попытался воспроизвести технологию древнего человека по получению меди из руды. Оказалось, что тепла костра вполне достаточно для того, чтобы восстановить медь из малахита $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$, но при одном условии: малахит должен находиться в закрытом сосуде в контакте с древесным углем, т. е. кроме высокой температуры необходима восстановительная атмосфера. При нагреве медной руды просто в костре благодаря избытку кислорода получался оксид меди Cu_2O . Как видим, даже самый простой процесс получения меди имел свои технологические особенности и секреты. Может быть, по этой причине и потребовалось древнему человеку 1,4 млн лет для того, чтобы из кострового превратиться в металлурга.

Изобретение способа получения меди из руды имело исключительно важное значение для человечества. Оно открывало эру металлов, которые стали теснить позиции камня. Придавая с помощью камней куску меди необходимую форму, человек заметил, что в процессе холоднойковки медь становится тверже и прочнее, но, если ее нагреть на огне, она вновь делается мягкой, податливой, удобной для обработки.

Заметное вытеснение камня из сферы материальной культуры началось после того, как человек освоил получение сплава меди с оловом – бронзы, которая обладала рядом преимуществ перед чистой медью: более высокими твердостью и прочностью, упругостью, остротой лезвия. Бронза имела также более высокие технологические свойства – лучше заполняла литейную форму, сильнее упрочнялась в процессе холодной обработки.

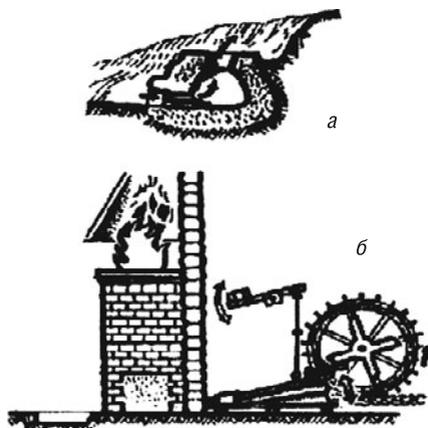
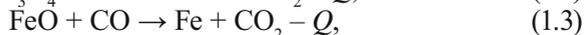


Рис. 1.2. Древний горн (а) и горн XVI в. с воздушным дутьем (б)

К производству железа человек приступил в Египте 5–5,5 тыс. лет назад, на Ближнем Востоке – 4–4,5 и в Европе – около 3 тыс. лет назад. Железо имеет более высокую температуру плавления по сравнению с медью (1539 против 1083 °С), поэтому его получение стало возможным после создания керамических (из песка, глины и камней) горнов.

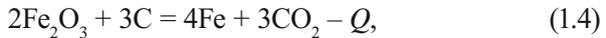
На рис. 1.2, а показана схема древнего горна, построенного с наветренной стороны горного склона; стрелки указывают направление дутья, которое сначала осуществлялось за счет ветра, потом с помощью камышовых трубок и, наконец, с помощью кузнечных мехов, приводимых в движение сначала вручную, затем водяным колесом (рис. 1.2, б). В горн послойно загружались измельченная железная руда и древесный уголь. В результате горения древесного угля развивалась температура около 1000 °С, недостаточная для расплавления руды и железа, но достаточная для восстановления железа из руды в твердом виде с помощью оксида углерода:



где Q – тепловой эффект реакции.

Продукт плавки – крица – представлял собой пористое, губчатое железо, которое извлекалось из горна и в горячем состоянии проковывалось для удаления из него остатков древесного угля и шлака и придания ему необходимой формы.

В XIV в. изобретателю, имя которого история не сохранила, пришла в голову счастливая мысль загрузить чугуна снова в печь и переплавить вместе с рудой. Эта попытка знаменовала собой настоящий переворот в металлургии железа, обеспечив сравнительно простой и высокопроизводительный способ получения стали. Сейчас мы знаем, что железная руда, окисляя углерод чугуна по итоговой реакции



обеспечила получение стали взамен чугуна. В то время этого не знали, металлургические процессы совершенствовались методом проб и ошибок.

Нововведение привело к созданию в металлургии железа двух самостоятельных процессов: в домницах, ставших к тому времени *доменными печами*, выплавляли из руды чугуна; в кричных горнах из него удаляли лишний углерод и получали сталь. Так возник двухстадийный способ получения стали из руды: руда → чугуна → сталь.

Первая домна в России была сооружена в 1730-е гг. под Тулой. Воздуходувные меха приводились в движение колесами, которые крутили воды реки Тулицы.

Доменное производство получило в XVIII в. значительное развитие в России на Урале (Демидовские заводы), в Англии и других странах. Но его развитие привело к вырубке лесов и дефициту древесного угля. Внимание металлургов, прежде всего английских, привлек каменный уголь, которым природа щедро одарила Британские острова. Однако все попытки выплавить на нем чугуна кончались неудачей: под действием высоких температур уголь измельчался, что сильно затрудняло дутье и приводило к нарушению хода доменной печи.

В 1735 г. англичанину А. Дерби удалось получить кокс путем нагрева до 950–1050 °С спекающегося (коксуемого) каменного

угля и осуществить доменный процесс на коксе, который в отличие от угля обладал высокой прочностью и не растрескивался при нагреве. Сегодня без кокса немислимы ни доменная плавка, ни ряд других металлургических процессов. К концу XVIII в. все доменные печи Англии перешли на кокс. Но это потребовало увеличения количества дутья, а водяные колеса с этим уже не справлялись. Данная проблема была решена благодаря изобретению в 1784 г. паровой машины шотландским инженером Дж. Уаттом и воздуходувных машин, заменивших кузнечные меха. С внедрением в 1857 г. английским инженером Э. Каупером воздухонагревателей (кауперов) доменная печь приобрела в основном современный вид.

Наряду с успешным развитием чугуноплавильного процесса имело место отставание в производстве стали, так как кричные горны не обеспечивали нужной производительности. Поэтому в XVIII в. кричный горн уступил место более совершенной печи – пудлинговой (от англ. *puddle* – перемешивать). Печь представляла собой ванну из огнеупорных материалов, обогреваемую продуктами горения и тепловым излучением рядом расположенной топки (рис. 1.3). В пудлинговой печи расплавленный чугун перемешивался с железистыми шлаками (в основном оксидами железа) и превращался в результате окисления углерода в тестообразную массу стали – крицу.

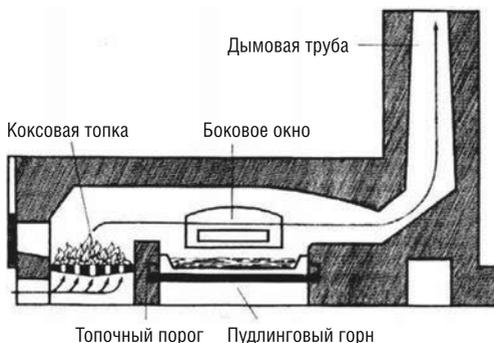


Рис 1.3. Схема пудлинговой печи