2

ПРОИЗВОДСТВО МЕДИ

Андрей Владимирович Тарасов
Акционерное общество «Институт «Гинцветмет»,
доктор технических наук

Нина Петровна Акимова
Акционерное общество «Институт «Гинцветмет»,
кандидат технических наук

Ольга Сергеевна Ежова
Федеральное государственное автономное учреждение
«Научно-исследовательский институт
«Центр экологической промышленной политики»

Илья Сергеевич Курошев
Федеральное государственное автономное учреждение
«Научно-исследовательский институт
«Центр экологической промышленной политики»

Мария Викторовна Доброхотова
Федеральное государственное автономное учреждение
«Научно-исследовательский институт
«Центр экологической промышленной политики»

ВВЕДЕНИЕ

Медь — золотисто-розовый пластичный металл, на воздухе быстро покрывается оксидной пленкой, которая придает ему характерный интенсивный желтовато-красный оттенок. Тонкие пленки меди на просвет имеют зеленовато-голубой цвет. Медь (Cu, от *лат.* cuprum) — элемент одиннадцатой группы четвертого периода (побочной подгруппы первой группы) Периодической системы химических элементов Менделеева с атомным номером 29.

Наряду с осмием, цезием и золотом, медь — один из четырех металлов, имеющих явную цветовую окраску, отличную от серой или серебристой у прочих металлов. Этот цветовой оттенок объясняется наличием электронных переходов между заполненной третьей и полупустой четвертой атомными орбиталями: энергетическая разница между ними соответствует длине волны оранжевого цвета. Тот же механизм отвечает за характерный цвет золота. В чистом виде медь достаточно мягкая, тягучая и легко прокатывается и вытягивается.

Высокую электропроводность меди можно назвать главным свойством, определяющим ее преимущественное использование. Также медь обладает очень высокой теплопроводностью. Такие примеси, как железо, фосфор, олово, сурьма и мышьяк, влияют на базовые свойства меди и уменьшают электропроводность и теплопроводность. По данным показателям медь уступает лишь серебру.

Медь имеет большие значения плотности, температуры плавления и температуры кипения. Важным свойством является хорошая стойкость к коррозии. Например, при высокой влажности железо окисляется значительно быстрее.

Металл хорошо поддается обработке: прокатывается в медный лист и медный пруток, протягивается в медную проволоку с толщиной, доведенной до тысячных долей миллиметра. Этот металл является диамагнетиком, то есть намагничивается против направления внешнего магнитного поля. Медь является сравнительно малоактивным металлом. В нормальных условиях на сухом воздухе ее окисление не происходит. Она легко реагирует с галогенами, селеном и серой. Кислоты без окислительных свойств не оказывают воздействия на медь. С водородом, углеродом и азотом химических реакций нет. На влажном воздухе происходит окисление с образованием карбоната меди (II) — верхнего слоя патины.

Получают медь из медных руд и минералов. Медь — один из первых металлов, освоенных человеком, что говорит об относительной простоте ее производства. В настоящее время медная промышленность по своим масштабам занимает второе место среди подотраслей цветной металлургии после алюминия. Основные методы получения меди — пирометаллургия, гидрометаллургия и электролиз.

Запасы меди подсчитаны в 99 странах мира и оцениваются в 806 млн т, ресурсы — в 2087 млн т (табл. 1).

Таблица 1. Запасы меди и объемы ее рудничного производства в мире (в 2020 г.)

Страна	Запасы, категория	Запасы, млн т	Доля в мировых запасах, %	Производство, тыс. т	Доля в мировом производстве, %
Чили	Reserves	200	25	5700	28
Перу	Reserves	92	11	2150	11
Китай	Reserves	26	3	1700	8
ДР Конго	Reserves	19	2	1300	6
США	Reserves	48	6	1200	6
Австралия	Proved + Probable Reserves	22	3	870	4
Россия	Запасы $A+B+C_1$	62	8	924	5
Прочие	Reserves	337	42	6370	32
Мир	Запасы	806	100	20 214	100

Производство меди на рудниках включает в себя получение металла в концентратах, а также в виде катодной меди, извлекаемой методом выщелачивания с последующей жидкостной экстракцией-электролизом (SX–EW). На долю такой меди приходится около 20 % мирового производства металла. В 2019 г. мировое рудничное производство меди практически не изменилось по сравнению с 2018 г. и составило 20,7 млн т против 20,8 млн т годом ранее. производство рафинированной меди составило 24,1 млн т (включая производство из вторичного сырья)[1].

Россия располагает крупной сырьевой базой меди и входит в десятку ее крупнейших продуцентов. Основу сырьевой базы меди страны составляют объекты сульфидного медно-никелевого, медно-колчеданного и стратиформного геолого-промышленных типов. В последние годы планомерно увеличивается доля медно-порфировых руд в отечественных запасах. Основная добыча сконцентрирована на сульфидных и медно-колчеданных объектах.

В 2020 г. из российских недр было добыто 1134 тыс. т меди, еще 10,4 тыс. т получено из техногенных образований. Рудничное производство составило 924,1 тыс. т меди: 923 тыс. т — в концентратах, 1,1 тыс. т — по технологии подземного выщелачивания. Выпуск рафинированной меди (с учетом полученной из вторичного сырья) составил 1055 тыс. т[2].

[1] Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году» // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации : [официальный сайт]. — URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/gosudarstvennyy_doklad_o_sostyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/ (дата обращения: 13.01.2022).

[2] Там же.

В 2020 г. на медь разрабатывались 48 коренных месторождений, в том числе 40 существенно медных и пять комплексных медьсодержащих, а также три техногенных объекта. Кроме того, медь попутно добывалась на 14 месторождениях комплексных руд, полностью теряясь при их переработке; доля таких объектов в структуре российской добычи металла не превышала 0,9 %.

Главные центры добычи меди в России находятся в Красноярском крае (Норильский рудный район), на Среднем и Южном Урале (Свердловская, Челябинская, Оренбургская области и Республика Башкортостан) и в Мурманской области (Печенгский район). Добыча медных и медьсодержащих руд ведется также на Северном Кавказе, юге Сибири (в Алтайском крае, Республиках Тыва и Хакасия) и в Забайкальском крае (рис. 1).

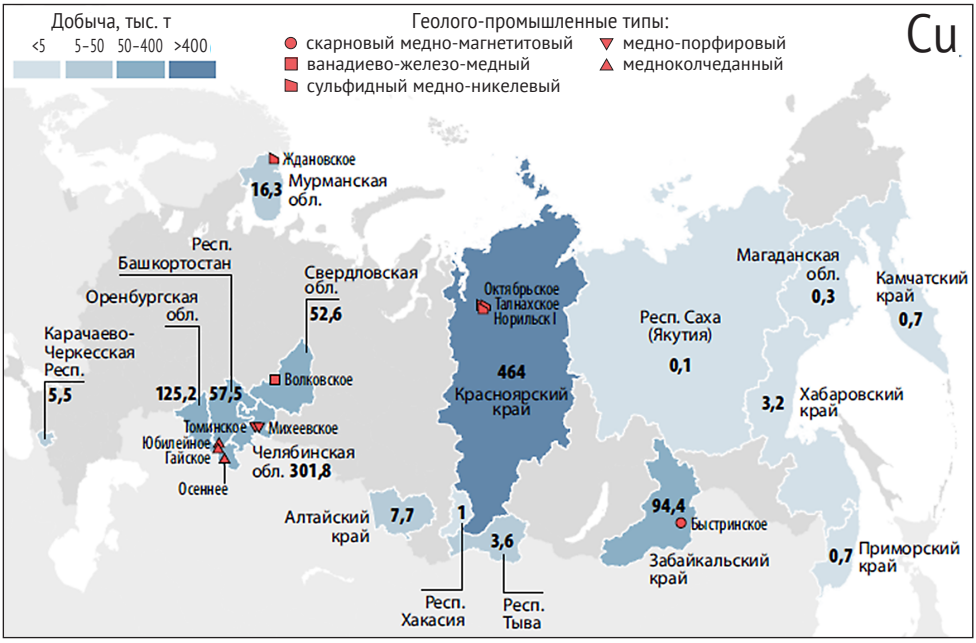
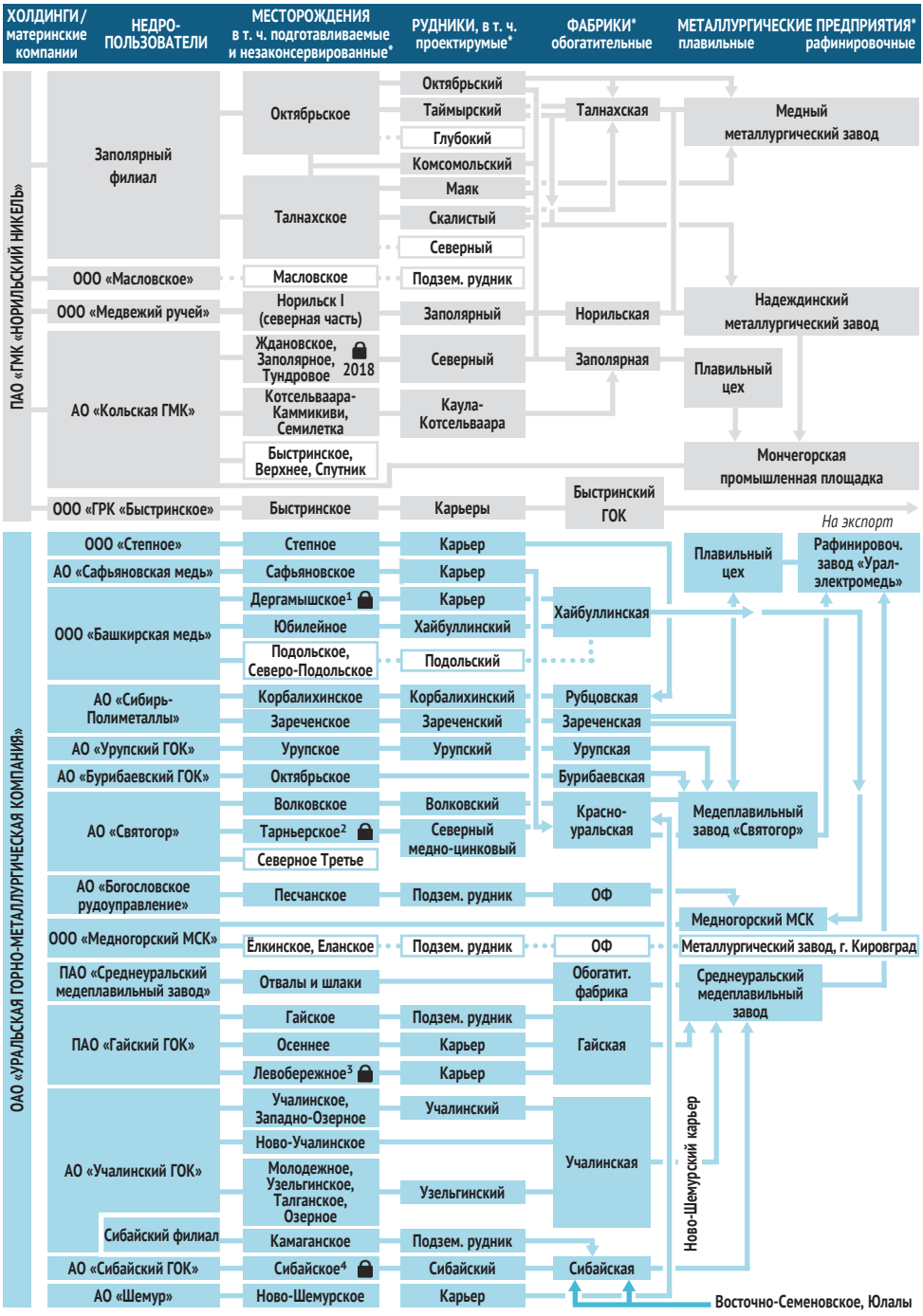


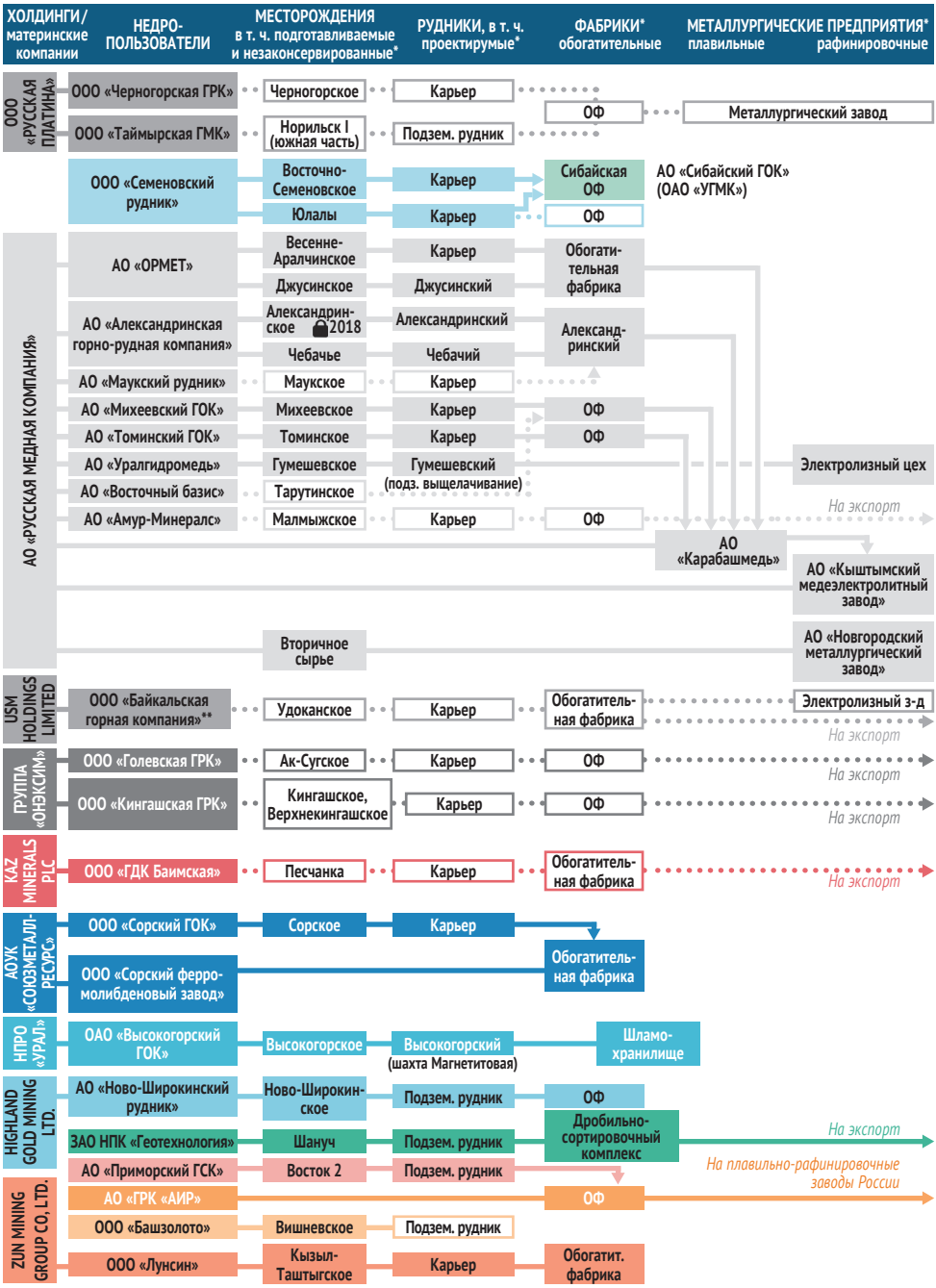
Рис. 1. Карта-схема расположения ведущих основных месторождений меди в Российской Федерации

Источник: Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году» // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации.

Основной объем добычи меди в России обеспечивают предприятия трех вертикально-интегрированных холдингов: ПАО «ГМК «Норильский никель» («Норникель»), ОАО «Уральская горно-металлургическая компания» (УГМК) и АО «Русская медная компания» (РМК). Добываемые руды компании перерабатывают на собственных обогатительных фабриках (ОФ), а получаемые концентраты направляются в основном на принадлежащие им же металлургические предприятия (рис. 2).



Источники: Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году» // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации; открытые данные компаний.



* Подготавливаемые к эксплуатации месторождения, проектируемые и строящиеся предприятия показаны контуром, символ «замок», год — добыча прекращена, год прекращения ([1] — в 2019 г.; [2] — в 2015 г.; [3] — в 2018 г.; [4] — в 2020 г.).

** В августе 2021 г. лицензия на право пользования недрами переоформлена на ООО «Удоканская медь».

Рис. 2. Структура медной промышленности России

ИСТОРИЯ ЗАРОЖДЕНИЯ ОТРАСЛИ

Зарождение медной промышленности в мире

Латинское название этого металла — cuprum — имеет красивую историю, берущую свое начало в древнегреческой мифологии. Согласно верованиям древних греков, люди получили этот металл от Афродиты, богини любви и плодородия. Легенда гласит, что Афродита, родившаяся в пене прибрежных волн, вышла на берег острова Кипр, который она немедленно взяла под свое покровительство, показав его жителям залежи столь необходимого для них металла. Разумеется, в этой красивой легенде есть определенная доля истины: именно Кипр, где в древности был расположен один из самых известных алтарей поклонения Афродите, издревле был богат залежами меди. Так что древние жители Кипра и впрямь обогащались на добыче этого металла, а название острова дало научное название этому элементу — купрум.

Конечно же, на самом деле медь начали применять задолго до того, как в ареале Эгейского моря сложилась древнегреческая цивилизация. Эпоха открытия и применения меди — это примерно VI–IV тысячелетия до нашей эры, большой период, который археологи и историки считают промежуточным звеном между каменным веком и бронзовым. Согласно исследованиям ученых, наши далекие предки сначала применяли слитки меди, которые были ими ошибочно приняты за камни. Изначально медные самородки обрабатывались так же, как простые камни: по ним ударяли другими камнями, чтобы изменить их форму и размер. Медные слитки «отказывались» раскалываться на части, но отлично деформировались. Этот метод обработки, получивший название «холодная ковка», был достаточно энергозатратным, но весьма распространенным. В отличие от «горячей ковки», то есть нагревания меди, делавшей металл пластичным, но впоследствии хрупким, медные изделия, созданные путем холодной ковки, выдерживали большие нагрузки. Этим же объясняется преимущество медного оружия перед каменным: металлическое оружие можно было починить, в то время как каменное не подлежало ремонту и реставрации.

Чуть позже медь начали использовать не только в оружейной и сельскохозяйственной промышленности: из меди начали изготавливать и посуду, и украшения, и прочие столь необходимые в хозяйстве предметы. Любопытный факт: ученым-археологам удалось реконструировать один из способов изготовления медной посуды, бытовавший примерно в V тысячелетии до нашей эры[3]. Для того чтобы изготовить из слитка меди таз, древним мастерам нужно было стучать огромным молотом по медному диску, размещенному на специально приготовленных для этого деревянных блоках определенной формы. Раскопки ученых-историков на территории Анатолии (ныне — Анталия, средиземноморское побережье Турции), Египта, Ирана, Месопотамии принесли новые сведения как о применении меди, так и о способах ее обработки, бытовавших в те далекие времена. Как оказалось, нашим далеким предкам пришлось довольно долго

[3] *Максимов М. М.* Очерк о первой меди. — М., 1976.

экспериментировать для того, чтобы обработанная путем горячей ковки медь не теряла своих качеств и не становилась хрупкой. Способы обработки меди, состоящие из разных сочетаний литья и ковки, варьировались и совершенствовались на протяжении веков. Разумеется, за этот период возросло мастерство специалистов, которые начали не только изготавливать из меди оружие, посуду и украшения, но и освоили метод чеканки.

Известно, что медь высоко ценилась в Древнем Египте[4]. После расшифровки множества клинописных папирусов стал известен способ обработки меди в эпоху правления Рамзеса II (1300–1200 гг. до н. э.). Древние египтяне загоняли воздух в плавильные печи с помощью мехов, а древесный уголь добывали из акации и финиковой пальмы. Это создавало внутри печей идеальную температуру для обработки медных слитков и их очищения от посторонних примесей.

Чем выше был спрос на медь, тем больше росла популярность горячей ковки. Для борьбы с коварной хрупкостью полученных таким способом медных изделий мастера начали добавлять в раскаленную медь иные металлы, образуя различные сплавы. В какой-то момент в плавильной печи произошло случайное соединение меди и олова. Получившийся сплав обладал куда более полезными качествами и требовал совсем иной, менее затратной, обработки. Это вещество, получившее название «бронза», дало толчок началу следующей эпохи — так называемого «бронзового века», начавшегося примерно в III тысячелетии до нашей эры. В этот период изделия из бронзы частично вытеснили медь в определенных сферах тяжелой промышленности, но объем добычи меди (столь необходимой для изготовления бронзы) резко увеличился.

Особой популярностью медь пользовалась у древних греков. Например, жители знаменитой Трои, воспетой в «Илиаде» Гомера, превратили свой город в крупнейший центр развития металлургии, причем на благородных свойствах этого металла росло состояние как ремесленников, так и купцов.

Разумеется, в эпоху древнегреческой цивилизации (и красивого мифа о дарах Афродиты) медь использовали как оружейники и ювелиры, так и врачи. В медицинских трактатах эпохи античности много говорится о целебном влиянии медных изделий на человеческий организм. В частности о том, что воины, облаченные в медные доспехи, меньше устают, а их боевые раны заживают быстрее, нежели у облаченных в сталь.

Другие античные источники были посвящены влиянию медных изделий на различные достоинства мужского организма. Специальные медные украшения, предназначенные специально для укрепления «мужского духа» пользовались большой популярностью у самых разных слоев древнегреческого населения. Известно, что знаменитейшая царица Клеопатра, хорошо разбиравшаяся в новейших медицинских открытиях, предпочитала медные браслеты любым украшениям из золота и серебра, а философ и драматург Аристотель,

[4] *Авилова Л. И.* Металлопроизводство древней Анатолии: специфика региона // Краткие сообщения института археологии РАН. — 2009. — Вып. 223. — С. 48–87; *Рузанова С. А.* Металлургия древнего Египта в раннем бронзовом веке // Краткие сообщения института археологии РАН. — 2009. — Вып. 223. — С. 88–100.

заявлявший об общеукрепляющем действии меди на организм, часто засыпал с медным шариком в руке.

Металл, принесший столько пользы древним грекам, в том числе и жителям Кипра, окрестившим его «купрумом», не остался без внимания и на других этапах развития цивилизации. И в средние века, и в эпоху Возрождения объемы добычи меди неуклонно росли, а лучшие умы тех времен открывали все новые способы ее применения. Самое удивительное, что техника добычи и обработки меди потом стала использоваться и при работе с другими материалами, в частности с железом и сталью.

Сейчас спрос на медь особенно высок среди компаний, специализирующихся на изготовлении различных приборов бытового и электротехнического назначения.

Зарождение медной промышленности в России

Российскими археологами установлено, что в древние времена медь выплавляли на Урале, в Сибири и Казахстане. При изучении древних рудников Минусинского края были обнаружены изделия из меди. Получило развитие производство меди в Причерноморье, Урарту; кустарное производство меди было широко распространено в Киевской Руси и Великом Новгороде. Первый медеплавильный завод на территории княжеской Руси был построен в 1640 г. в районе Соликамска. Особенно бурно производство меди в России развивалось при Петре I. По его инициативе было построено на Урале 27 казенных и частных медеплавильных заводов. Несмотря на эти успехи, в первой половине XIX в. российская медеплавильная промышленность постепенно вступила в полосу жестокого кризиса. Новые районы (Кавказ, Алтай, Сибирь) осваивались крайне медленно. Получавшие огромные доходы благодаря своему монопольному положению и отсутствию конкуренции «эффективные собственники» (в конце 1830-х гг. медеплавильные заводы давали 715 977 руб. чистой прибыли, или 25,4 % валового дохода) не были заинтересованы в модернизации производства, предпочитая «проедать» не только прибыль, но зачастую и заводские оборотные капиталы. Недостаток денег на покрытие текущих заводских расходов вел к уменьшению производства и недвижимого капитала. Разработка руд велась хищническим способом путем эксплуатации только поверхностных выходов медных руд, по мере истощения верхних пластов месторождения забрасывались.

Тем не менее до середины 1850-х гг. отечественная выплавка меди продолжала расти и ее экспорт был по-прежнему значительным. Так, в 1853 г. было вывезено за границу около 400 тыс. пудов меди стоимостью до 4 млн руб., тогда как ввоз этого металла в Россию не превышал 3 тыс. пудов.

Ситуация усугубилась после реформы 1861 г. «Отмена крепостного права и освобождение крестьян сопровождались масштабными, острыми и длительными волнениями заводских крестьян, их активным сопротивлением реализации Уставных грамот, массовым уходом крестьян с заводов. В совокупности с истощением рудников, усилением конкуренции на внутреннем и внешнем

рынках эти факторы способствовали резкому упадку производства меди, неизменно вели к закрытию завода»[5].

Падение производства нарастало (в 1880 г. в Российской империи было выплавлено меньше меди, чем в 1825-м), притом что модернизация российской промышленности требовала все возрастающего количества металла, — все это привело к тому, что из экспортера меди Россия превратилась в импортера. До 1866 г. вывоз из России меди, хотя и сниженный до 50 тыс. пудов в год (в среднем), все же превышал ввоз ее, но с 1867 г. начинается обратное явление, и в 1880 г. ввозят 566 тыс. пудов при вывозе, не превышавшем суммы в 82 тыс. руб. В последующие годы (1890–1893 гг.) вывоз составлял около 3 тыс. пудов, а ввоз — около 300 тыс. пудов в год, причем первое место принадлежало Великобритании, а затем Германии. Таким образом, в 1893 г. производительность русских медноплавильных заводов удовлетворяла лишь 50–60 % общей потребности России в меди, остальное количество пополнялось иностранным продуктом[6].

Положение начало постепенно выправляться в 1880-е гг. Этому способствовали и вводимые в этот период протекционистские меры. Так, в 1885 г. была повышена ввозная пошлина на медь — на штыковую медь до 1 руб. 50 коп., на листовую — до 2 руб. с пуда. В следующем году ввиду понижения цен на медь за границей эти пошлины были увеличены еще больше — до 2 руб. 50 коп. и 3 руб. 10 коп. на пуд соответственно, причем одинаковой пошлиной со штыковой медью были обложены и медные руды. Также были сильно повышены пошлины на ввоз медных изделий.

Начиная с 1906 г. наблюдается значительный рост отечественной выплавки меди. Если в 1891 г. доля России в мировом производстве меди составляла 1,5 %, а в 1901 г. — 1,6 %, то к 1913 г. она возросла до 3,3 %, и страна вышла на восьмое место в мире.

Несмотря на это, собственное производство все равно не покрывало в полном объеме потребности народного хозяйства страны, особенно возросшие с созданием и развитием электротехнической промышленности.

В конце XVIII — начале XIX в. медное производство создается на Кавказе, в Минусинском крае и Казахстане. С этого времени Россия заняла первое место в мире по производству меди и начала вывозить за границу высококачественный металл.

В конце XIX — начале XX в. Россия постепенно утратила свое ведущее положение по производству меди, а в годы Первой мировой и Гражданской войн медная промышленность вновь пришла в упадок, большинство рудников были затоплены, заводы остановлены, многие из них разрушены. После Гражданской войны медную промышленность пришлось создавать заново. Уже в 1922 г. был восстановлен Калатинский (ныне Кировоградский) завод, пуск которого стал рождением не только медной, но и всей цветной металлургии СССР.

---

[5] *Кулбахтин Н. М.* Этапы модернизации медеплавильной промышленности Южного Урала // Вестник Башкирского университета. — 2015. — Т. 20, № 4. — С. 1417–1425.

[6] Фабрично-заводская промышленность и торговля России. — СПб., 1896.

В 1922–1925 гг. были введены Баймакский (в Башкирии), Пышмино-Ключевской, Карабашский медеплавильные заводы и Кыштымский медеэлектролитный завод (все на Урале). В годы первых пятилеток было восстановлено и коренным образом переоборудовано большинство старых медных предприятий. В последующие годы медная промышленность СССР развивалась быстрее, чем промышленность страны в целом. В строй в эти годы вошли Красно- и Среднеуральский заводы, медный завод Норильского ГМК. Были созданы принципиально новые автогенные, энергоресурсосберегающие технологии: кислородно-факельная плавка, внедренная на Алмалыкском ГМК (Узбекистан) в 1968 г., взвешенная плавка и плавка Ванюкова на Норильском ГМК в 70-х гг. XX столетия. Плавка Ванюкова нашла применение также на Среднеуральском заводе и Балхашском ГМК (Казахстан). Этот перечень новых процессов можно продолжить. Решающую роль в создании и развитии новых технологий внес Институт «Гинцветмет», созданный в 1918 г., из которого вышли около 15 научно-исследовательских и проектно-конструкторских институтов и технологических центров по всей цепочке производства цветных металлов. Дальнейшее развитие медной промышленности идет по пути качественного совершенствования технологии переработки медного сырья и освоения новых месторождений с созданием металлургических переделов на Урале, в Восточной и Западной Сибири. При этом появились новые крупные компании, такие как «Русская медь», «Байкальская горная компания» и другие, что позволит полностью освоить крупнейшие месторождения в Удокане (Забайкалье), Ак-Суг (Тыва), Томинское (Урал).

Развитие отрасли (проекты, открытия, изобретения, патенты, оказавшие значимое влияние на развитие отрасли)[7]

Медный браслет, инструменты и оружие

8700 г. до н. э. — «рабочая медь». Самое древнее медное украшение было найдено на археологических раскопках в Северном Ираке. В каменном веке между 9000 и 2000 г. до н. э. начали обрабатывать (выковывать) медь, формируя листы и формы без плавки. Это позволило изготовливать медные украшения и новые виды инструментов и оружия, а также предметы, которые либо заменили существующие каменные инструменты, либо улучшили их. Обработка меди позволила обществам выйти из каменного века и перейти в бронзовый.

[7] Copper Development Association Inc. — URL: https://copper.org/ (дата обращения 15.01.2022).

5000 г. до н. э. — первая обработка меди. Спустя почти 4000 лет после того как самородная медь была подвергнута тяжелой обработке — выковке в формы, первые мастера-металлисты обнаружили, что самородные медные руды можно плавить. Первые низкотемпературные печи могли производить только богатый медью шлак, который нужно было дополнительно обрабатывать в глиняных тиглях. С развитием печей для сжигания древесного угля и появлением мехов благодаря более высоким температурам люди смогли производить более совершенные продукты.

Считается, что культура Винча (на территории современной Сербии) первой развила знания и навыки обработки меди (примерно 5400–4600 гг. до н. э.). Археологические памятники Плочник и Беловодье / Рудна Глава на горе Рудник содержат самые старые в мире свидетельства плавки меди — 5000 г. до н. э. Другие археологические памятники VI–V тыс. до н. э. — Майданпек, Ярмовац и шахта Ай-Бунар (Болгария).

Статуэтки медного века

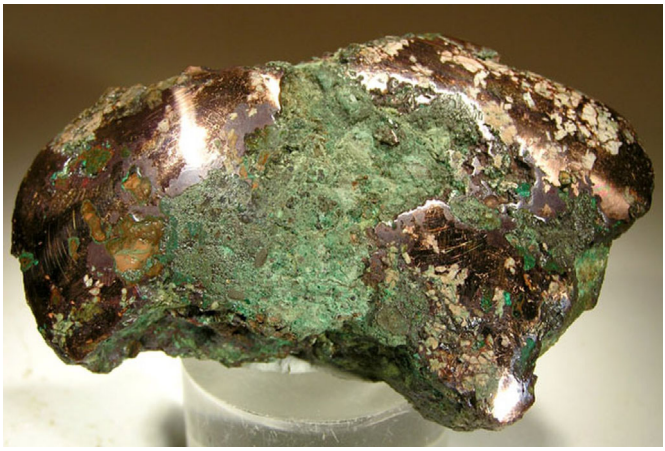
4500 г. до н. э. — начало медного века (его археологическое название — энеолит, от *лат.* aeneus — медный и *греч.* λίθος — камень).

Медный век начинался в различных регионах в разное врем. Обычно считается, что его расцвет пришелся примерно на 4500–3500 гг. до н. э.

Медь позволила разработать более острые и прочные инструменты, более легкое оружие и более привлекательные украшения. Топоры, наконечники и доспехи производились путем ковки и формовки самородной металлической медной руды.

Там, где были минералогически сложные медные руды, такие как оксиды, сульфиды, силикаты и карбонаты, общества не продвинулись в своем развитии вперед, потому что еще не был открыт процесс извлечения меди из этих руд.

На Ближнем Востоке и Кавказе медный век начался в конце V тыс. до н. э. и продолжался около тысячелетия. В Европе медный век длился примерно с 3500 по 1700 г. до н. э., однако недавние исследования доказывают, что в нескольких местах в Восточной Европе, таких как Беловодье, Майданпек, Ярмовац, Плочник, Рудна Глава и Ай-Бунар, использовали медь намного раньше. В Северной Америке медный век начался примерно между 5500 и 4000 гг. до н. э. и продолжался до 1000 г. до н. э.



Пример сырья, обработанного на Старом медном комплексе

4000 г. до н. э. — медь в доколумбовой Северной Америке. Палеоиндейские народы Северной Америки занимались добычей меди и изготовлением медных изделий примерно в то же время, что и палеолитические народы Ближнего Востока и Кавказа.

Жители Доколумбовой Северной Америки разработали, возможно, самые чистые и самые обширные в мире месторождения высококачественной самородной меди между 5500 и 4000 гг. до н. э.

Старый медный комплекс в западной части Великих озер является самым известным древним местом добычи меди в Северной Америке. Основные операции проводились на острове Рояль, на полуострове Кевино и на реке Брюле.

Артефакты, включая украшения, оружие и инструменты, из некоторых этих мест датируются периодом с 4000 по 1000 г. до н. э.

Медная чаша из царских гробниц

4000 г. до н. э. — медные чаши. Медь была первым металлом, из которого начали чеканить чаши. Самый простой способ создания медной чаши состоял в том, чтобы забить медный диск, помещенный на деревянный брусок, выдолбленный в соответствии с профилем требуемого объекта. Это самый древний метод изготовления чаш, восходящий к додинастической Вавилонии и Египту. Другая используемая техника была известна как «рейзинг». Медный диск того же диаметра, что и горшок, выковывался для придания нужной формы с помощью наковальни и молотка.

3900 г. до н. э. — медь на Кипре, где ее было так много, что металл в конечном итоге был назван в честь острова. Добыча меди на Кипре началась еще до бронзового века. В 3900–2500 гг. до н. э. благодаря меди выросло экономическое могущество острова в Средиземноморском регионе. После того как запасы меди в Армении и вокруг Красного моря истощились, большая часть меди, поставляемой древним царствам, поступала именно с Кипра.

В римскую эпоху медь также добывалась в основном на Кипре. Римляне назвали металл aes cyprium (кипрский металл), потому что он был одной из основ кипрской экономики. Позже этот термин был изменен на cuprum, от которого произошли слова copper (*англ.*), cuivre (*франц.*), cobre (*исп.*), Koper (*голл.*) и Kupfer (*нем.*). Олово, которое смешивают с медью для получения бронзы, приходилось импортировать. Настоящие оловянные бронзы появились на Кипре в начале II тыс. до н. э.

3300 г. до н. э. — металлургия бронзы. Бронзовый век начался около 3300 г. до н. э., когда на Ближнем Востоке, в Южной Азии и Европе плавили смесь меди и олова для получения бронзы. Бронза намного прочнее и долговечнее, чем медь или олово, и лучше подходит для резки и рубки.

Оружие и щиты, сделанные из бронзы

Медные руды, используемые для изготовления бронзы, часто представляли собой сульфиды, поэтому их приходилось плавить. Олово, необходимое для производства бронзы, добывалось в Турции, Индокитае, Уэльсе, Испании и Перу.

Из расплавленной смеси меди и олова отливались новые и более прочные продукты бронзового века: инструменты, доспехи, поножи, шлемы, боевые топоры, мечи, медали, статуи, колокольчики, украшения, сосуды и др.

Самые ранние бронзовые артефакты найдены в доисторическом Таиланде и датируются 3600–4000 гг. до н. э. На археологических раскопках Нон Нок Тха был обнаружен медный инструмент, датируемый 3500 г. до н. э., браслеты и бронзовые шарики для охоты из луков культуры Банчианг того же времени. Большая часть этих предметов состоит из 10% олова и 90% меди — это идеальные пропорции сплава: с меньшим количеством олова сплав не смог бы достичь максимальной твердости, а с большим — стал бы слишком хрупким для ковки.

3250 г. до н. э. — балансовые весы. Взвешивание на медных и серебряных весах практиковалось в Египте до 3200 г. до н. э. Весы использовались в основном для взвешивания металла.

В Амарне (1450 г. до н. э.) была найдена красивая балансировочная шкала с изображением животных. Медные гири, изготовленные на Крите, имели форму маленьких топоров; ассирийский набор древних бронзовых гирь со львами был отмечен царскими именами.

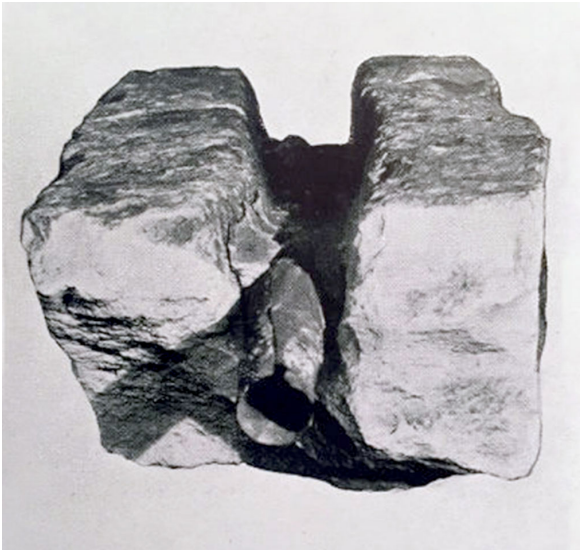
Балансовые весы

Древние египетские зеркала

3100 г. до н. э. — медные зеркала. Самые ранние известные металлические зеркала были сделаны из меди и датированы 3100 г. до н. э. Они были изобретены во времена Первой династии Египта; со временем их заменили бронзовыми. Бронзовые зеркала были найдены во всех культурах древности. Они были одними из самых ценных вещей, принадлежавших женщинам.

2750 г. до н. э. — медные трубы в египетских пирамидах. Пластичность меди привела к ее применению для водопровода в Древнем Египте. Сложная медная дренажная система была обнаружена в комплексе погребальных пирамид в Абисуре в Северном Египте. Медь для водопровода использовалась здесь еще

в 2750 г. до н. э. Медная труба была найдена внутри ближайшего к пирамиде храма. Жрецы ежедневно собирались в этом месте, чтобы предложить еду и другие предметы духу короля Сахуре.



Медная труба в пирамидах в Абисуре

Эксперты предполагают, что медные трубы простирались примерно на 330 ярдов вдоль дамбы, ведущей к другому храму, использовались для отвода колодезной воды, которую вручную приносили в храм для ежедневного ритуала очищения царских статуй. Хотя общее состояние пирамиды и храмов оставляет желать лучшего, медные трубы уцелели.

2400 г. до н. э. — медь для медицинской стерилизации. В древнеегипетском медицинском тексте, известном как Папирус Эдвина Смита, упоминается использование меди в качестве стерилизующего средства для питьевой воды и ран.

2200 г. до н. э. — медь в хирургических инструментах. Медные и бронзовые хирургические инструменты были настолько ценны, что их хоронили вместе с египетскими царями для загробной жизни. Самые древние из когда-либо обнаруженных медицинских инструментов были сделаны из меди и бронзы и найдены в захоронении Кар, королевского врача Шестой династии, в Древнем Египте.

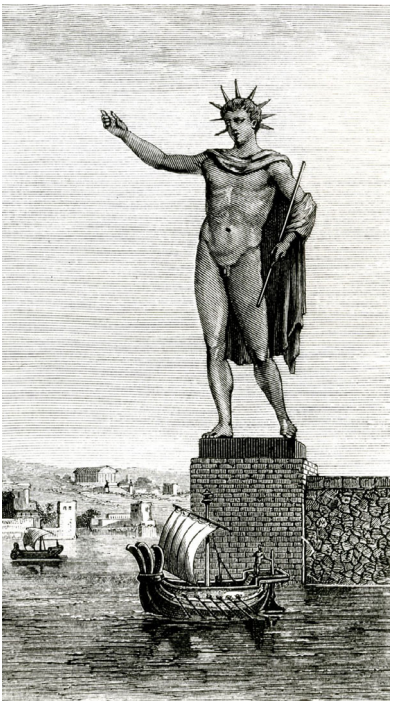
1500 г. до н. э. — медь и бронза используются как денежный платеж. Медные сплавы использовались для оплаты, потому что имели внутреннюю ценность, были устойчивы к коррозии и износу, а также были просты в производстве и переработке. Историческое использование металлов дает четкую иллюстрацию того, как бартерные системы породили денежные системы. Медные и бронзовые топоры появились как форма оплаты в Индии во II тыс. до н. э. Плоские медные слитки стали предметом обмена в Агия-Триаде и Закросе на Крите, а также

при кораблекрушении Улубуруна (датируемом 1330 г. до н. э.). Многие формы средств медных платежей бронзового века Эгейского моря имеют маленькие ручки на каждом углу. Форма для этих слитков была обнаружена в Рас-ибн-Хани в Сирии. В Сибири и Китае бронзовые ножи использовались с VIII в. Бронзовые стержни были распространены в Иране. Другими распространенными формами древних медных слитков являются круглые кольца, перфорированные топоры и кинжалы.

Начиная с IV в. до н. э. римляне использовали медные деньги. *Aes rude* (*лат.* «грубая бронза») представлял собой бронзовый самородок, использовавшийся в качестве протовалюты до круглой чеканки. *Aes signatum* (*лат.* «штампованная бронза») состоял из литых бронзовых глыб с тиснением государственной печати. Медные и бронзовые слитки и лом применяли для платежей до того, как были введены монеты. Первая чеканка бронзовых монет в Риме состоялась около 300 г. до н. э.

В Африке медные и латунные браслеты и ожерелья использовались для оплаты до середины XX в.

700 г. до н. э. — первые округлые медные монеты. Круглые монеты были эволюцией более примитивных денежных систем. До чеканки медные и бронзовые слитки стандартного размера и фигурные жетоны, такие как ножевые деньги, использовались для хранения и передачи стоимости. Например, стандартные литые бронзовые жетоны позднего китайского бронзового века были обнаружены в гробнице недалеко от Аньяна, датируемой 1200 г. до н. э. Использование округлых бронзовых монет в качестве платежной формы получило широкое распространение в Лидии, в Малой Азии, около 700 г. до н. э. Округлые монеты были выпущены в Китае около 350 г. до н. э., первые римские тяжелые литые бронзовые монеты — в 289 г. до н. э.



Колосс Родосский

280 г. до н. э. — Колосс Родосский, гигантская бронзовая статуя недалеко от порта города Родоса в Древней Греции. Колосс был сделан из бронзовых пластин, прикрепленных железными прутьями к камню. К сожалению, статуя была разрушена во время землетрясения в 226 г. до н. э. Сломанная в коленях, она развалилась и оставалась на этом месте 800 лет, затем была переработана.

100 г. до н. э. — латунь, сплав меди и цинка. Латунь была изобретена через тысячи лет после бронзы, массово ее производили около 100 г. до н. э. из металлических минералов меди и цинка с использованием процесса цементации.

Самые ранние латуни, возможно, были природными сплавами, полученными путем плавки медных руд, богатых цинком. Примеры медно-цинковых сплавов известны в Китае еще с V тыс. до н. э. В Западной Азии и Восточном Средиземноморье медно-цинковые сплавы найдены на стоянках III тыс. до н. э. в Эгейском море, на территориях современных Ирака, ОАЭ, Калмыкии, Туркменистана и Грузии, а также на стоянках II тыс. до н. э. в Западной Индии, Узбекистане, Иране, Сирии, Ираке и Ханаане.

Латунь — привлекательный металл с ярко-золотым оттенком. Он стал распространенным для декоративных и бытовых предметов около 100 г. до н. э., во времена Римской империи. Примерно в то же время он появился в Индии, позже распространился в Китай, а затем и в остальной Азии.

В средние века латунь применялась для изготовления канделябров, подносов, тарелок и декоративных фигурок. По мере того как свойства латуни, особенно легкость ее обработки и коррозионная стойкость, стали более известны в эпоху Возрождения в Европе, она стала стандартом для точных технических инструментов, таких как часы, хронометры и навигационные приборы. В середине XIX в. латунь использовалась в патронах для боеприпасов и в качестве обшивки корпусов деревянных кораблей.

20 г. н. э. — медь в медицине. В медицинском трактате римского врача Авла Корнелия Цельса «De Medicina» (I в.) в книгах с первой по шестую перечислены многие способы медицинского применения меди, описаны препараты и формы меди, наиболее эффективные при каждом заболевании. Медь прочно закрепилась в качестве важного лекарства в фармакопее практикующего врача благодаря Цельсу.

25 г. — медный свиток Мертвого моря. Все свитки Мертвого моря, найденные на территории современного Израиля, кроме одного, были написаны на пергаменте или папирусе. Только один свиток был написан на меди (содержащей 1 % олова, то есть по сути — бронзовом свитке).

Латунная астролябия

Полоска свитка Мертвого моря из меди вместо хрупких шкур животных

Медный свиток был найден в пещере Кумрана последним. Он был похоронен глубоко в пещере, подальше от посторонних глаз, потому что в нем перечислялись места, где были зарыты ценные предметы из золота и серебра.

126 г. — крыша римского Пантеона. Пантеон — одно из наиболее хорошо сохранившихся зданий Древнего Рима, бывший римский храм, ныне церковь. Древние римляне обшили крышу Пантеона медью; медные кровли долговечны и устойчивы к коррозии.

500 г. — объекты поклонения. Священные предметы культа, как большие, так и малые, часто изготавливались из бронзы. Обычай использовать бронзу и другие материалы в качестве предметов религиозного культа получил широкое распространение в Средние века.

Бронзовая менора

Колокол короля Сондока, Корея

771 г. — колокол короля Сондока (Корея). Этот массивный бронзовый колокол, также известный как Колокол Эмиля, весит 18,9 т. Он считается шедевром Королевства Силла. Колокол был отлит в 771 г. н. э.

1080 г. — Большая Медная гора Швеции. Это медное рудное тело обеспечивало две трети потребности Европы в меди. Большая Медная гора была национальным достоянием Швеции. Добыча полезных ископаемых началась в Фалуни в 1080 г. В настоящее время шахта является музеем; в 2001 г. он внесен в список Всемирного наследия ЮНЕСКО.

Свидетельство о доле шахты Фалунь

1200 г. — бронзовые пушки. Бронзовые пушки, пробивающие стены укрепленных городов, изменили способ ведения войн в средние века. Бронзовая пушка была изобретена вскоре после изобретения пороха в XI или XII в. в Китае. Самое раннее известное изображение пушки — в виде настенной резьбы во времена династии Сун (Китай) — датируется 1128 г. Бронзовая пушка Увэй XIII в. считается самой старой известной реликвией. После этого времени археологические и документальные свидетельства существования бронзовых пушек многочисленны.

Ружье из руин Ксанаду, Внутренняя Монголия

С 1400 г. — медные музыкальные инструменты. Изготавливались еще в Древней Греции и Риме.

Медные духовые инструменты эпохи Возрождения уже напоминали современные. В 1400–1413 гг. была разработана самая ранняя из известных S-образных труб, за ней — складная труба и скользящая труба, благодаря чему в середине XVI в. появился тромбон. С середины XVI в. известны факты того, что крупные европейские королевские дворы содержали корпус трубачей.

В XIX в. медные духовые инструменты стали обязательной группой в составе симфонического оркестра, а в XX в. благодаря широкому распространению джаза приобрели еще большую популярность. Некоторые современные духовые инструменты хотя и считаются деревянными (по принципу звукоизвлечения), изготовляются тем не менее из сплавов на основе меди (например, саксофон).

Воссозданный пресс Гутенберга

Середина 1440-х гг. — первый ручной типографский станок. В печатном станке Гутенберга использовались гравированные пластины из меди; бронза и латунь применялись для литья свинцовых штампов. Мировой спрос на медь увеличился, поскольку вскоре после изобретения были построены тысячи прессов Гутенберга.

В конце XVI в. иллюстрированные книги печатались с помощью медных пластин: гравюры и офорты были более тонкими и подробными, чем в предыдущей технологии ксилографии. Медные пластины также были признаны лучшим способом гравировки карт.

С 1450 г. — медные ликеро-водочные заводы. Дистилляторы издавна использовали медные перегонные кубы для производства спирта. Самые лучшие перегонные кубы для изготовления бренди, коньяка, виски, пива и эфирных масел изготавливаются из меди. Медь используется для кубов по разным причинам. Во-первых, и это наиболее важно, медь вступает в реакцию со спиртом, усиливая вкус дистиллированных спиртов. При этом осаждаются (и затем удаляются) неприятные на вкус соединения серы, образующиеся во время дистилляции. Во-вторых, требованием дистилляции является теплопроводность, а медь — отличный проводник тепла, используемый, например, в радиаторах и кондиционерах.

С 1500 г. — медь в научных приборах. Медь и ее сплавы широко использовались в научных приборах, изобретенных в эпоху Возрождения в Европе. Из медных сплавов изготавливались часы, карманные часы, телескопы и микроскопы. Сегодня почти все современные научные приборы имеют компоненты из медных сплавов.

Телескоп из медного сплава и старинный берлинский бронзовый микроскоп

1611 г. — валюта на основе меди в Швеции. Огромные запасы меди в Швеции обогатили страну и позволили ей на короткое время ввести медную валюту. Шведская империя имела самые большие и многочисленные медные рудники в Европе в XVII в. — одна только Большая Медная гора производила две трети меди, потребляемой в Европе. В это время шведская армия полностью оплачивалась медной валютой.

Шведские банкноты номиналом 8 далеров

Во времена королевы Кристина медь выпускалась слитками до 15 кг в качестве валюты. Денежная система, основанная на меди, работала до тех пор, пока мировая цена на медь не упала.

1800 г. — медь в Вольтовом столбе. Вольтов столб — первая электрическая батарея, которая непрерывно обеспечивала электрический ток в цепи. Это была электрохимическая ячейка, состоящая из чередующихся листов меди и цинка. Изобретение Вольтова столба позволило совершить ряд открытий в области электричества.

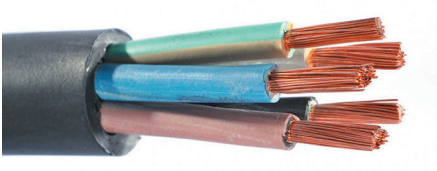
Вольтов столб

Военный корабль США «Конститьюшн», спущенный на воду в 1797 г.

С 1761 г. — медная обшивка для судов. Медная облицовка подводного корпуса увеличила мощь британского флота, повысив ходкость судов и предотвращая разрушения от червя-тередо. Первым кораблем, получившим медную обшивку, стал в 1761 г. фрегат «Аларм».

В 1797 г. была изготовлена медная обшивка корпуса, бронзовая пушка, шипы и насосы для корабля «Конститьюшн». Персонал корабля отметил, что медная обшивка резко снизила биообрастание и корабли вследствие этого могут двигаться намного быстрее.

Корабли с медной обшивкой могли оставаться в эксплуатации в течение более длительного времени, в то время как суда с деревянным корпусом должны были стоять в сухом доке на берегу для очистки корпуса.



Медный кабель

1820-е гг. — медные проволока и кабель стали основой века электричества. Использование меди в качестве электрического проводника за последние 200 лет выросло в геометрической прогрессии, поскольку были изобретены десятки тысяч продуктов с электроприводом.

Открытия и изобретения Андре-Мари Ампера, Майкла Фарадея и Георга Симона Ома, относящиеся к электричеству и магнетизму, в конце XVIII и начале XIX в. помогли начать промышленную революцию и продвинуть медь в эпоху электричества.

Медь использовалась в электропроводке с момента изобретения электромагнита и телеграфа в 1820-х гг. Изобретение телефона в 1876 г. создало дополнительный спрос на медные электрические проводники.

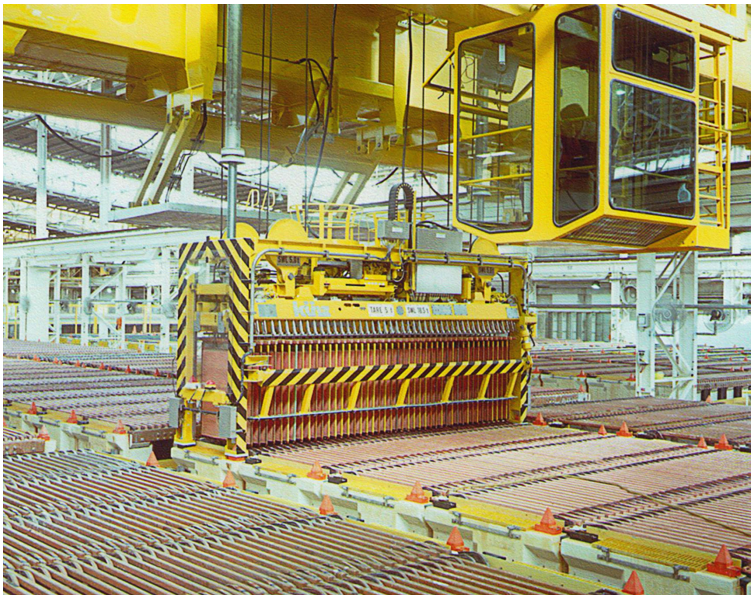
1831 г. — электромагнитная индукция. Британский ученый Майкл Фарадей открыл основные принципы производства электроэнергии. Его исследования показали, что диск из меди, вращающийся в сильном магнитном поле, может обеспечивать постоянный поток электричества. Это открытие электромагнитной индукции произвело революцию в энергетике и подготовило почву для изобретения электрической лампочки, электрических двигателей и электростанций

1840 г. — пуля. В 1840-х гг. из сплава, содержание меди в котором превышало 90%, во Франции были произведены первые боеприпасы с металлическими гильзами. К 1880-м гг. корпуса стали делать из латуни. Сегодня латунь остается стандартным материалом для гильз боеприпасов, используемых для пуль и артиллерийских снарядов.

Боеприпасы с металлическими гильзами

Еще одно интересное применение меди в боеприпасах: когда пули вылетали из стрелкового оружия с большой скоростью, свинец отслаивался из-за своей мягкости и не попадал в нарезы. Чтобы исправить это, швейцарцы в 1880-х гг. начали покрывать свинцовые винтовочные пули медью. Сегодня медь по-прежнему широко используется для изготовления пуль с оболочкой, где свинец покрыт тонким слоем меди.

1876 г. — электролитическая очистка. Медь высокой чистоты (99,9999%) необходима для электропроводности. Такой уровень чистоты достигается электролитическим рафинированием.

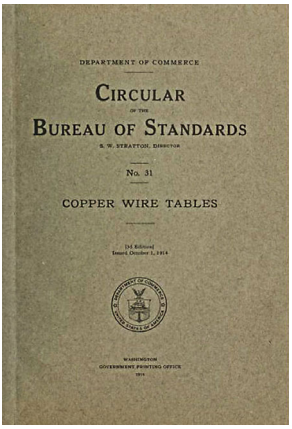


Современный электролизный цех

Сегодня вся медь для электротехники производится путем электролитического рафинирования. Первым непрерывно работающим резервуарным цехом для электролитического рафинирования меди был завод Norddeutsche Affinerie (известный сейчас как Aurubis) в Гамбурге (Германия). Сегодня Aurubis является крупнейшим производителем меди в Европе и вторым — в мире.

1885 г. — медные фунгициды. Первый медный фунгицид был случайно изобретен Пьером-Мари-Алексисом Милларде в районе Бордо во Франции. Милларде применял пасту из сульфата меди и извести, чтобы сделать виноград непривлекательным для воров. Он заметил, что паста также избавляет виноград от ложной мучнистой росы. Это наблюдение привело к изобретению бордоской смеси — фунгицида, благодаря которому началась практика защитного опрыскивания сельскохозяйственных культур.

Бордоская смесь на виноградных листьях в Перудже, Италия


DEPARTMENT OF COMMERCE

CIRCULAR

OF THE

BUREAU OF STANDARDS

No. 31

COPPER WIRE TABLES

В этом документе был установлен Международный стандарт на медь

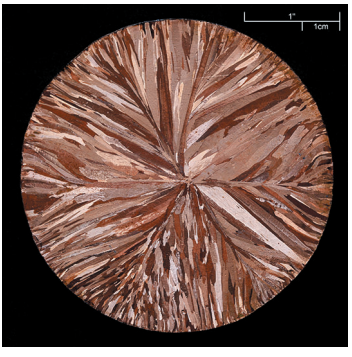
С тех пор медные фунгициды незаменимы во всем мире. Бордоская смесь также широко используется для борьбы с фитофторозом картофеля, курчавостью листьев персиковых деревьев и паршой яблонь.

1914 г. — Международный стандарт электропроводности. Медь была принята в качестве международного стандарта 100%-ной электропроводности — Международный стандарт отожженной меди (IACS) 1914 г. Стандарт сравнивает проводимость всех металлов. Например, если проводимость определенного сорта титана 1,2% по IACS, его электропроводность составляет 1,2% по меди. Медь была выбрана потому, что она имеет самую высокую электропроводность среди всех металлов, кроме серебра, дорогого драгоценного металла, который очень ограниченно используется в качестве электрического проводника.

1927 г. — современная медная сантехника. Когда в 1927 г. на рынке появилась легкая, но прочная тянутая медная трубка, которую можно было быстро припаять к медным фитингам, они произвели революцию во внутренних домашних системах питьевой воды. Медные водопроводные трубы оказались универсальными, долговечными, не требующими обслуживания, устойчивыми к коррозии, легко соединяемыми, простыми в установке и доступными в широком диапазоне размеров. Медная сантехника установила стандарт для внутренних систем водоснабжения в домах и офисах.

Медные водопроводные трубы в системе радиаторного отопления

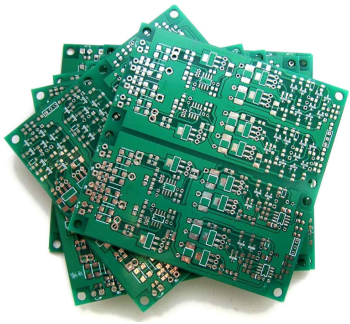
1940 г. — непрерывное литье. Изобретение технологии непрерывного литья катанки в 1940 г. позволило медной промышленности удовлетворить стремительно растущий спрос на электрические провода и кабели. Медная катанка, полученная методом непрерывного литья, является основным исходным материалом для электропроводной и кабельной промышленности. Непрерывное литье позволяет рулонам весить до 10 тыс. фунтов (4540 кг). До этого изобретения размер катушки ограничивался массой проволочного стержня весом 250 фунтов. По технологии непрерывного литья и прокатки производят практически всю медную катанку сегодня.



Макроструктура непрерывнолитой меди чистотой 99,95%

1949 г. — взвешенная плавка. Плавка во взвешенном состоянии — это энергоэффективная технология, на долю которой приходится 50 % мирового производства первичной меди на сегодняшний день. Взвешенная плавка была разработана компанией Outokumpu в 1949 г. Впервые она была применена на заводе Harjavalta в Финляндии для плавки медной руды. Эта технология изменила способ плавки сульфидных руд. Медная руда плавится непрерывно, а не партиями. Обогащенный кислородом воздух («реакционный газ») позволяет концентрату поставлять большую часть энергии, необходимой печам.

1985 г. — печатные платы. Печатные платы — это мозг всей современной электроники, включая мобильные телефоны, компьютеры и новые электроприборы. Печатные платы распределяют электронные сигналы, которые соединяют различные электрические компоненты, такие как микросхемы памяти, процессоры, устройства ввода/вывода, резисторы и конденсаторы.



Печатные платы

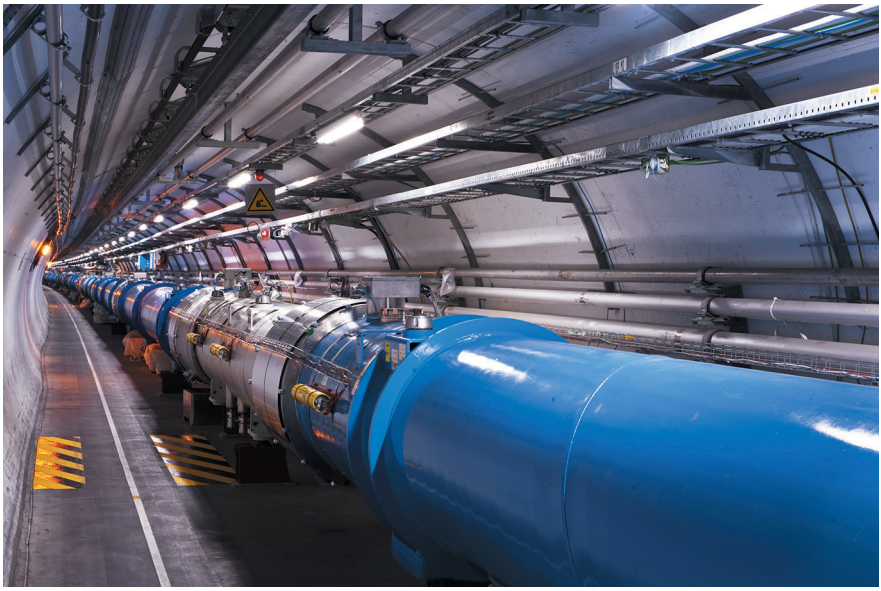
Технология изготовления печатных плат значительно продвинулась вперед с момента их изобретения в 1936 г. До середины 1960-х гг. производители использовали медную проволоку для крепления компонентов к печатным платам. Прорыв в технологии обработки позволил сделать печатные платы намного меньше и дешевле начиная с середины 1980-х гг. Эта технология стала обычной в современной электронике.

1987 г. — ускорители частиц. В ускорителях частиц используются электромагнитные поля для разгона заряженных почти до скорости света частиц. Ускорители крупных частиц применяются как коллайдеры или как синхротронные источники света для изучения конденсированных сред. В ускорителях крупных частиц используется много медных электрических проводников.

В Фермилабе в Иллинойсе в кольце ускорителя частиц Tevatron протяженностью 5,9 мили использовалось 50 т медной проволоки в 1000 электромагнитах. Коллайдер был построен в 1987 г. и проработал 24 года.

Почти 50 т бескислородной медной проволоки с высокой проводимостью было использовано в релятивистском коллайдере тяжелых ионов Брукхейвенской национальной лаборатории. Это был первый коллайдер тяжелых ионов (2000). Медь использовалась для изготовления 1700 сверхпроводящих электромагнитов в подземном коллайдере диаметром 2,4 мили.

Большой андронный коллайдер, завершенный в 2009 г., является крупнейшим и самым мощным в мире коллайдером частиц и самой большой одиночной машиной в мире. Он находится на границе Франции и Швейцарии. Ученые в лаборатории проверяют теории физики элементарных частиц, ищут новые субатомные частицы и работают над многими нерешенными вопросами физики. Медные электрические проводники обеспечивают матрицу в сверхпроводниках вдоль гигантского круглого туннеля в коллайдере, который имеет диаметр 27 км (17 миль).



Большой андронный коллайдер

1993 г. — телекоммуникационный кабель. Телекоммуникационный кабель с медными жилами подходит для сегодняшних потребностей Ethernet и для потребностей будущего. Медные кабели таких категорий, как 5 и 5e, 6, 6a и 6e, и коаксиальный кабель RG6, являются основой большинства структурированных кабельных систем. Они передают голос, данные и другие услуги из того места, где они входят в современное здание, в каждое помещение и из одного помещения в любое другое.

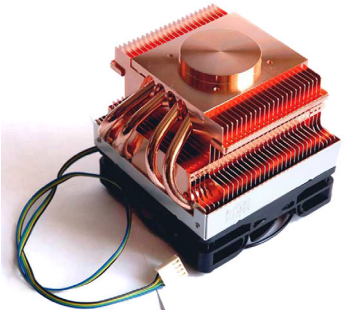
1995 г. — медь в дисководах для гибких дисков. Когда в середине 1990-х гг. персональные компьютеры стали использоваться повсеместно, сотни миллионов людей использовали дисководы гибких дисков для доступа и сохранения жизненно важной информации. Дисковод для гибких дисков был устройством для хранения и обмена данными, включенным во все персональные компьютеры или подключенным к ним с середины 1970-х гг. до 2000-х. Медь была электрическим проводником в дисководах для гибких дисков. Дисковые накопители в конечном итоге были заменены устройствами хранения данных с большей емкостью, такими как USB-накопители, карты флэш-памяти, портативные внешние жесткие диски, оптические диски, ПЗУ и облачные хранилища.

1996 г. — «диетическая медь». Медь является важным микроэлементом, который жизненно важен всех живых существ. Медь — необходимый микроэлемент в рационе. Ежедневные диетические нормы были установлены агентствами здравоохранения по всему миру. В 1996 г. Всемирная организация здравоохранения рекомендовала минимально допустимое потребление меди примерно 1,3 мг в день. В 2001 г. Национальная медицинская

академия США установила рекомендуемую норму потребления (RDA) для здоровых взрослых мужчин и женщин на уровне 0,9 мг/день. Также был установлен верхний уровень потребления — 10 мг/день. В 2006 г. Европейское управление по безопасности пищевых продуктов снизило верхний уровень потребления до 5 мг/день.

Медь необходима для нормального роста и развития человеческого плода, младенцев и детей. У взрослых она необходима для роста, развития и поддержания костей, соединительной ткани, мозга, сердца и многих других органов. Медь участвует в формировании эритроцитов, абсорбции и утилизации железа, а также в синтезе и высвобождении поддерживающих жизнь белков и ферментов. Эти ферменты производят клеточную энергию и регулируют нервную передачу, свертывание крови и транспорт кислорода. Также известно, что медь стимулирует иммунную систему, помогает восстановить поврежденные ткани и способствует их заживлению.

К продуктам, богатым медью, относятся злаки, орехи и семена, мясные субпродукты, такие как печень и почки, моллюски, сухофрукты, бобовые и картофель, курица, какао, шоколад.



Радиатор персонального компьютера

2000 г. — радиаторы для персональных компьютеров. Радиаторы отводят тепло от ПК и других электронных компонентов. Для эффективной работы и защиты важных компонентов необходимо отводить тепло от электрического сопротивления. Высокая теплопроводность меди позволяет теплу быстро проходить через нее. Вот почему медные тепловые трубки и медные радиаторы используются для охлаждения центральных процессоров и графических процессоров.

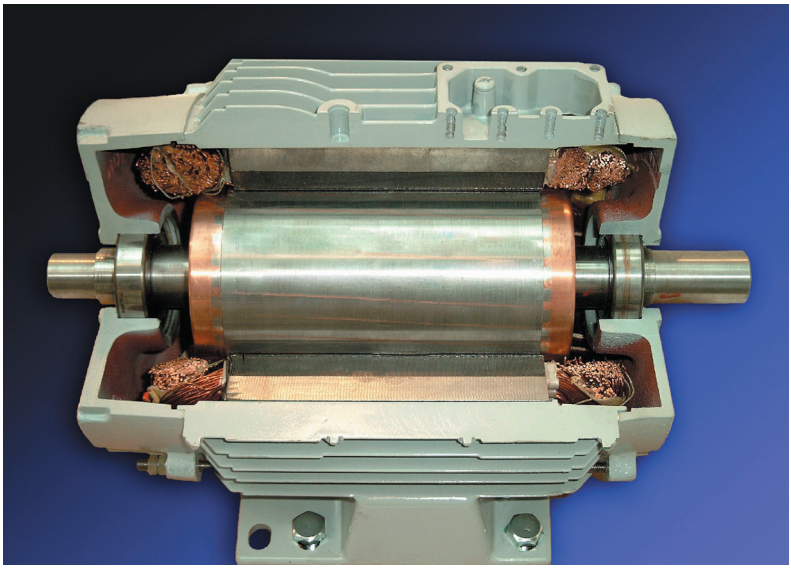
Медные радиаторы также используются для охлаждения мощных транзисторов и оптоэлектроники (лазеров и светоизлучающих диодов).

2003 г. — медный ротор двигателя. Технология двигателей с медным ротором возникла из-за необходимости удовлетворить требования рынка двигателей с низким напряжением для большей энергоэффективности.

На двигатели приходится две трети всей электроэнергии, используемой в промышленности. Двигатели относительно недороги при покупке, но могут быть дорогими в эксплуатации. Использование меди (и большего ее количества) в электродвигателях повышает эффективность использования электроэнергии.

Роторы в двигателях постоянного тока состоят из медной проволоки. Асинхронные двигатели можно сделать более энергоэффективными, используя медные обмотки в катушках статора и медь в роторах.

Замена алюминия медью в токопроводящих стержнях ротора является относительно новым изобретением, которое значительно повышает эффективность электродвигателей.



Вид в разрезе электродвигателя с литым под давлением медным ротором

2007 г. — медь в сотовых телефонах. Медь является проводником в сотовых телефонах, в телефоне содержится около половины унции меди (это примерно 12 % общего веса).

На одном электронном чипе можно разместить до 200 млн транзисторов. По мере добавления дополнительных чипов для повышения сложности сотовых телефонов количество меди в них также будет расти.

Высокая электропроводность меди снижает количество энергии, необходимой для работы сотового телефона. Это увеличивает срок службы батареи. Требования к питанию теперь снижены до уровня менее 1,8 В, а чипы работают при более низких температурах, чем когда-либо прежде, что увеличивает срок службы компонентов сотовых телефонов.

2013 г. — энергоэффективные двигатели. Медь играет важную роль в современных исследованиях и разработках энергоэффективных двигателей.

Передовые типы двигателей, такие как двигатели с постоянными магнитами, реактивное сопротивление и асинхронные двигатели с медным ротором, основаны на использовании меди для производства более эффективных и надежных двигателей. Все три типа двигателей обеспечивают возможность достижения целей по снижению энергопотребления и повышению производительности.

Благодаря инновационному использованию меди, коммутационных технологий и постоянных магнитов производители имеют больше возможностей для достижения своей эффективности и конкретных требований и целей.

2018 г. — медь в современных поездах. Современные передовые локомотивы более надежны, эффективны и более устойчивы к экстремальным условиям окружающей среды, чем локомотивы старшего поколения.

Скоростной поезд в Японии

Современные технологически продвинутые поезда используют много меди, новые железнодорожные технологии не обходятся без медных электрических проводников и медных теплопроводов.

В то время как в типичном дизель-электрическом локомотиве используется около 11 тыс. фунтов меди, в новейших и самых мощных локомотивах производства General Electric Company и General Motors Corporation требуется уже более 16 тыс. фунтов (8 т) меди. В этих дизель-электрических гигантах применяются изготовленные медные проводники для роторов своих шести трехфазных асинхронных двигателей переменного тока и медную проволоку для обмотки статоров.

ЭВОЛЮЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ

Медь — один из старейших металлов, открытых человеком. За многие века медь прошла невероятно интересный путь от поделочного металла до материала, используемого во многих сферах деятельности людей.

Развитие медной промышленности происходило благодаря постоянно растущему спросу на медь, обусловленному технологическим прогрессом и развитием промышленности.

Основные циклы и этапы развития медной промышленности представлены в таблице 2 и на рисунке 3.

Таблица 2. Основные циклы развития медной промышленности

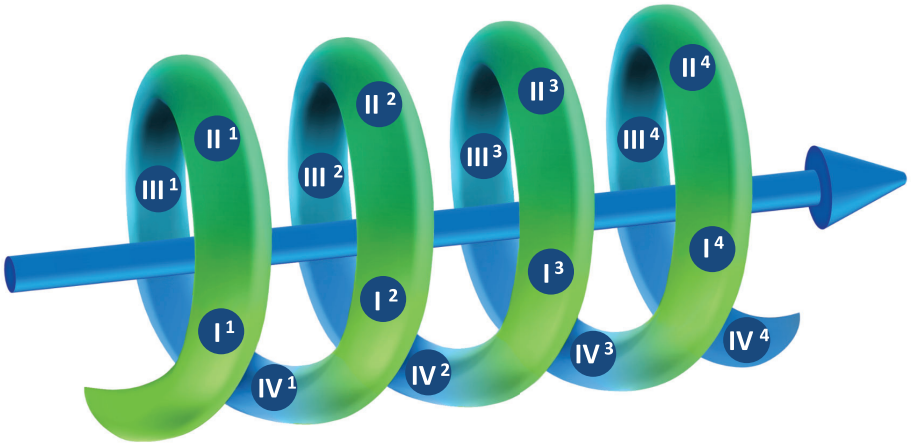
Цикл	Научно-технический этап	Технико-экономический этап	Экономико-социальный этап	Социально-регуляторный этап
Первый (медный и бронзовый века — открытие меди)	Использование самородной меди	Открытие выплавки меди из руд	Изготовление украшений и орудий	Появление сплавов на медной основе
Второй (создание медеплавильного производства)	Получение черновой меди	Получение меди промышленными способами	Рост потребления и экспорта меди	Высокая трудоемкость производства, высокая цена
Третий (получение черновой меди высокого качества и рафинированной электролитической меди)	Получение черновой меди высокого качества и рафинированной электролитической меди	Применение источников электроэнергии постоянного тока	Рост потребления меди в различных отраслях промышленности	Разработка новых плавильных печей и способов рафинирования меди
Четвертый (получение меди автоклавно-гидрометаллургическими способами)	Получение меди автоклавно-гидрометаллургическими способами	Расширение сырьевых нетрадиционных источников и номенклатуры медных изделий	Переход на безотходное производство, роботизация и цифровизация	Применение энергоресурсосберегающих и экологичных технологий

Первый цикл — открытие меди, медный и бронзовый века. В процессе поиска камней, подходящих для изготовления новых изделий, человек и обратил внимание на первые самородки металлов, по-видимому, медные, которые имеют гораздо большее распространение в природе, чем самородки благородных металлов — золота, серебра, платины. Самородную (теллурическую, от *лат.* «теллус» — земля) медь и сегодня находят во многих регионах мира: в Малой Азии, Индокитае, на Алтае, в Америке.

Самородная медь, которую первобытные люди сначала тоже считали разновидностью камня, при ударах каменного молота не давала характерных для камня сколов, а изменяла свои размеры и форму без нарушения сплошности материала. Это замечательное технологическое свойство «нового камня» стало мощнейшим стимулом поиска и добычи самородного металла и использования его человеком. Кроме того, было замечено, что ковка повышает твердость и прочность металла[8].

В качестве молота сначала применяли обычные куски твердого камня. Первобытный умелец, зажав камень в руке, наносил им удары по куску самородного, а впоследствии — выплавленного из руды — металла.

[8] *Карабасов Ю. С.* Металлургия и время : энциклопедия : [в 6 т.]. — Т. 1. — М., 2011.



I Научно-технический этап

II Технико-экономический этап

III Экономико-социальный этап

IV Социально-регуляторный этап

I^1 — использование самородной меди
II^1 — получение черновой меди
III^1 — получение черновой меди высокого качества и рафинированной электролитической меди
IV^1 — получение меди автоклавно-гидрометаллургическими способами

I^2 — открытие выплавки меди из руд
II^2 — получение меди промышленными способами
III^2 — применение источников электроэнергии постоянного тока
IV^2 — расширение сырьевых нетрадиционных источников и номенклатуры медных изделий

I^3 — изготовление украшений и орудий
II^3 — рост потребления и экспорта меди
III^3 — рост потребления меди в различных отраслях промышленности
IV^3 — переход на безотходное производство, роботизация и цифровизация

I^4 — появление сплавов на медной основе
II^4 — высокая трудоемкость производства, высокая цена
III^4 — разработка новых плавильных печей и способов рафинирования меди
IV^4 — применение энергоресурсосберегающих и экологичных технологий

Рис. 3. Эволюция технологий производства меди

Эволюция этого простейшего способа ковки привела к созданию прообраза кузнечного молота, снабженного рукояткой. Однако обработка металла холодной ковкой имела ограниченные возможности. Таким способом можно было придать форму лишь малым по величине предметам — булавке, крючку, наконечнику стрелы, шилу. Позднее была освоена технология ковки самородков меди с предварительным нагревом — отжигом.

Настоящая эра металлов началась в Евразии в V тыс. до н. э. Ее характеризуют раритеты, обнаруженные на севере Балканского полуострова и в Карпатском регионе.

Наиболее древним способом переработки медной руды является тигельная плавка: руду смешивали с топливом и помещали в тигли, изготовленные из глины, перемешанной с костной золой. Количество меди, производимое

в тиглях, было небольшим и составляло, как правило, несколько десятков граммов, поэтому постепенно перешли к производству меди в ямах непосредственно из руды.

Решающий шаг в переходе от камня к металлу был сделан после изобретения бронзы. Существует большое количество видов бронз: свинцовая, сурьмяная, мышьяковая, никелевая, висмутная, бериллиевая и пр. Наиболее известна оловянная бронза, и долгое время считалось, что именно она была первым медным сплавом, который научился производить человек.

Общепризнанно, что определяющую роль в техническом прогрессе в бронзовую эпоху сыграло появление литых топоров, мечей и мотыг — основных видов орудий труда и оружия. Основой цивилизации стала металлургия меди и бронзы.

Второй цикл — создание медеплавильного производства. Ключевыми техническими преобразованиями данного цикла принято считать освоение полного металлургического цикла производства металлов, включавшего в себя добычу руды, выжиг древесного угля, подготовку материалов, выплавку и рафинирование чернового металла, литье, ковку, волочение проволоки, другие виды металлообработки и рециклинг металлолома.

Для производства меди повсеместно использовались как окисленные, так и сернистые руды. Месторождения меди обычно делятся на две зоны. Верхняя часть, находящаяся над уровнем грунтовых вод, представляет собой зону окисления. В ней располагаются минералы, основу которых составляют легковосстановимые оксиды меди — малахит, азурит. Нижняя, основная часть месторождения, формируется сульфидными рудами — халькопиритом ($CuFeS_2$) и халькозином (Cu_2S). Содержание меди в сульфидных рудах намного ниже, чем в окисленных. После истощения верхних слоев человеку пришлось использовать более бедные сульфиды, а это потребовало разработки принципиально новых (инновационных) металлургических технологий.

Древние металлурги нашли решение проблемы. Было обнаружено, что добавление в шихту в достаточном количестве (около 30 %) красноватого или коричневого материала приводит к увеличению объема выплавки и повышению качества меди[9]. Этим материалом была железная руда в виде гематита или лимонита, часто присутствующая на открытых частях месторождений халькопирита. Добавление железной руды принципиально изменяло процесс выплавки меди. Одним из продуктов реакций восстановления становился монооксид железа. При температуре около 1200° С он реагировал с SiO_2 пустой породы с образованием фаялита (Fe_2SiO_4), который превращался в основную составляющую жидкого шлака. Таким образом, железная руда играла роль флюса. Такая технология имела определяющее влияние на дальнейшее развитие металлургии. Шлак, образующийся при выплавке меди, практически идентичен шлаку, который позднее получался при выплавке железа в сыродутных горнах.

[9] *Карабасов Ю. С.* Металлургия и время : энциклопедия. — Т. 1.

При использовании сернистых руд требовалось проведение ряда подготовительных операций. Широко практиковалось окисление раздробленной руды на воздухе в течение длительного времени. Благодаря воздействию влажного воздуха и атмосферных осадков руда обогащалась кислородом и теряла часть серы. Важную роль играл предварительный обжиг сернистой руды, при котором происходили выгорание серы и разрыхление руды. Его проводили в кучах, в специально устраиваемых ямах, а также в особых сооружениях — стойлах. Размеры стойл были значительны: их каменные стены достигали 12,5 м в длину и 1,5 м в ширину.

Повышение температурного уровня плавки зависело, прежде всего, от совершенствования техники и технологии дутья. Определяющую роль играло использование естественного дутья — силы ветра. Эффективными были печи, встраиваемые в естественный ландшафт. Они часто строились с подветренной стороны холма, имели соединяющиеся горизонтальный и вертикальный каналы, были обложены камнями и обмазаны глиной. В этом случае достигался «эффект трубы», усиливавший приток воздуха в агрегат. В поду некоторых печей были металлоприемники — углубления для установки горшков, в которые через специальные отверстия стекал металл.

Значительный прогресс последовал вслед за изобретением простейших ручных, а затем и ножных мехов. Они изготовлялись из шкур животных и представляли собой примитивный тип насоса с резервуарами, приспособленными для наполнения их воздухом. Металлургические печи с искусственным дутьем были, как правило, прямоугольными или цилиндрическими, с толстыми стенками высотой до 1 м, сложенными из камня и изнутри обмазанными глиной, целиком глинобитными или выложенными из кирпича.

Выплавленные из руды слитки меди содержали значительное количество шлаковых включений. Их отделяли ударами молотов. Рафинирование черновой меди осуществляли в тиглях и небольших горнах. При этом на расплавленную черновую медь дутьевыми трубками подавали воздух, основная масса оставшихся в ней примесей, кроме благородных металлов (золота и серебра), окислялась и формировала шлак.

Третий цикл — получение черновой меди высокого качества и рафинированной электролитической меди. Переход к машинному производству обычно рассматривают как скачкообразный и называют промышленной революцией. Однако исторические факты свидетельствуют, что задолго до XVIII столетия ручной труд начали заменять механизмами, приводимыми в действие силами природы, прежде всего — водяными колесами. В авангарде процесса механизации находилось и металлургическое производство. Результаты последних исследований показывают, что зарождение промышленности в мире представляет собой эволюционный процесс, начавшийся, когда европейцы стали активно использовать энергию воды при выплавке и обработке металлов.

Производство меди, ранее широко используемой в виде сплавов с оловом (бронзы) в декоративно-художественных работах и для отливки пушек

и колоколов, ко второй половине XVIII в. и особенно после промышленной революции конца XVIII — начала XIX в. стало заметно расти в связи с применением меди в новых отраслях техники. Мировая выплавка меди, составлявшая в 1800 г. 20 тыс. т, возросла к концу XIX в. до 500 тыс. т[10].

Процесс получения меди издавна был трудоемким, многоступенчатым, в нем медные сернистые руды после обжига частично переводились в окиси. Обожженную руду плавили в шахтных печах с добавлением кокса (немецкий способ) или в отражательных печах (английский способ). В результате получался штейн — продукт, содержащий до 25–45 % меди в виде сульфидов. Дальнейшей переработкой штейна в пламенных печах получали черновую медь.

Этот процесс металлургии меди в 60-х гг. XIX в. подвергся коренному усовершенствованию. В 1866 г. русский металлург — управляющий Богословскими заводами (Урал) В. А. Семенников впервые осуществил бессемерование медного штейна для передела его в черновую медь. Медный штейн поступал из шахтных печей непосредственно в конвертер с круглым сечением. Через фурмы пропускали воздух (проводили опыты и с водяным паром), что позволило более чем в пять раз ускорить процесс передела штейна в черновую медь. В. А. Семенников доказал возможность доведения меди в штейне до 76 %.

Последователи В. А. Семенникова — русские металлурги А. А. Иосса и Н. В. Лалетин — приняли участие в завершении разработки этой технологии. После введения бессемерования процесс выплавки меди стал более простым. Расплавленный в отражательной печи штейн продували в конвертере на белый штейн, содержащий 76–80 % меди. Затем в той же отражательной печи расплавляли белый штейн и продували его в конвертере на черновую медь с содержанием до 99 % основного металла.

Электроосаждение металла на катоде лежит в основе электрохимического получения металлов из растворов (гидроэлектрометаллургия) или из расплавов, а также рафинирования (очистки) металлов.

Металлы, имеющие электроположительные значения потенциала, например серебро Ag, золото Au, не растворяются и выпадают в виде частиц на дно электролизера (в шлам) из перешедших в раствор ионов. На катоде в первую очередь осаждаются металлы, имеющие электроположительные значения потенциала (основной металл — медь). В результате электролиза очищаемый анодный металл растворяется и основной металл осаждается на катоде. Примеси, потенциал которых отрицательнее потенциала основного металла, остаются в растворе, а электроположительные (по потенциалу) примеси оказываются в шламе.

Важным шагом к открытию электролитического рафинирования было предложение Б. С. Якоби в 1840 г. использовать в гальванопластике растворимые

[10] Техника в ее историческом развитии : От появления ручных орудий труда до становления техники машинно-фабричного производства. — М., 1979.

аноды. В 1847 г. герцог М. Лейхтенбергский (Россия) высказал предположение о возможности электролитической очистки и разделения металлов[11]. Практически применять электролитическое рафинирование меди стал Д. Р. Элькингтон в Америке с 1865 г. Промышленное производство возникло в Германии в 1878 г. В России производство рафинированной меди было организовано в начале 90-х гг. XIX в. на Кавказе (г. Келакент) и в Нижнем Новгороде.

В это же время началось электролитическое получение меди как заключительная стадия гидрометаллургического производства. При осаждении меди из растворов ее солей, полученных путем переработки руд, используются нерастворимые аноды.

Четвертый цикл — получение меди автоклавно-гидрометаллургическими способами. Гидрометаллургия меди, извлечение меди мокрым путем — обработка руд и побочных заводских продуктов, содержащих медь, водными растворами различных химических реактивов.

Любой гидрометаллургический способ, не считая подготовительных и вспомогательных операций, состоит из двух основных стадий: обработки рудного сырья растворителем (выщелачивание) и осаждения металла из раствора.

При выборе растворителя учитывается ряд требований. Основными из них являются дешевизна и доступность растворителя, эффективность его воздействия на компоненты руды, незначительное воздействие на минералы пустой породы и возможность его регенерации. Применительно к медному сырью этим требованиям в наибольшей степени удовлетворяют вода и растворы серной кислоты и сульфата трехвалентного железа.

Вода — наиболее дешевый и доступный растворитель — пригодна, как правило, для обработки сырья и полупродуктов, содержащих медь в форме сульфатов или хлоридов. В условиях естественного (природного) выщелачивания сульфидных минералов при совместном действии воды и кислорода воздуха происходит окисление сульфидов с образованием серной кислоты и сульфата трехвалентного железа, которые и растворяют в конечном итоге сульфиды.

Раствор серной кислоты — наиболее распространенный растворитель в гидрометаллургии меди. Он обладает достаточно высокой растворяющей способностью, дешев и легко регенерируется. Однако его невыгодно применять для сырья с повышенным содержанием основных породообразующих минералов (известняка, кальцита, доломита и т. д.) из-за резкого увеличения расхода растворителя на их растворение и из-за невозможности регенерации H_2S0_4 из сульфатов кальция и магния.

Сульфат трехвалентного железа является хорошим растворителем для многих природных сульфидов меди. Однако этот растворитель самостоятельного значения в гидрометаллургии меди не имеет. Причина — гидролиз

[11] *Павлова О. И.* История техники электроосаждения металлов. — М., 1963.

$Fe_2(SO_4)_3$ в водных растворах. Для придания устойчивости сульфату растворы нужно подкислять серной кислотой[12].

Для выщелачивания медных руд и концентратов применяют несколько методов: выщелачивание в кучах; подземное выщелачивание; выщелачивание путем просачивания раствора через слой рудного материала (перколяция); выщелачивание в чанах с механическим перемешиванием (агитацией); автоклавное выщелачивание (под давлением).

Кучное выщелачивание применяют для извлечения меди на месте из вскрышных пород (отвалов) старых и новых карьеров.

В качестве промышленного осадителя меди используют материалы на основе железа — железный лом, стружку, обрезь жести, обезлуженную консервную жесть, губчатое (пористое) железо и т. д. в связи с их достаточной активностью, доступностью и невысокой стоимостью.

В современной практике цементации меди наибольшее распространение получили цементационные желоба, вращающиеся барабаны и чаны с механическим перемешиванием.

ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ

Жизненный цикл меди

Любая произведенная продукция имеет свой период существования, который характеризуется ее производством, потреблением, утилизацией в окружающей среде либо переходом в качестве исходного сырья или вспомогательного вещества в производство другой продукции.

Таким образом, последовательные и взаимосвязанные стадии продукции от приобретения, производства из природных ресурсов или сырья до конечного размещения в окружающей среде (в виде отходов, сбросов и выбросов) называют жизненным циклом продукции (ISO 14044:2006. Экологический менеджмент. Оценка жизненного цикла. Требования и рекомендации).

При оценке продукции по жизненному циклу в учет принимаются все стадии цикла — от добычи сырья и его переработки для получения материалов до утилизации продукции (изделия) по окончании его эксплуатации (рис. 4). На всех стадиях оценка производится по расходу энергии и природных ресурсов, а также по вредному воздействию на окружающую среду.

От своего первоначального залегания в земной коре медь проходит несколько этапов, чтобы достичь долгого срока службы в основных конечных продуктах, таких, как электроника, бытовая техника, электрические сети, транспортные средства и технологии возобновляемых источников энергии. Как материал, на 100 % пригодный для вторичной переработки, медь может использоваться повторно снова и снова без потери своих физических свойств.

[12] *Уткин Н. И.* Металлургия цветных металлов. — М., 1985.

Медь сохраняет большую часть своей первичной металлической ценности: лом премиум-класса обычно содержит не менее 95 % стоимости первичного металла из недавно добытой руды. Для переработки меди требуется только около 20 % энергии, необходимой для извлечения и обработки первичного металла.

В настоящее время около 40 % меди, удовлетворяющей ежегодный спрос в Европе, и около 55 % меди, используемой в архитектуре, поступают из переработанных источников. Новая медная катушка и лист часто имеют переработанный контент на 75–100 %. В большинстве случаев та медь, которая используется для производства зарядки мобильного телефона или создания вторичных источников питания, берется не прямо из земли.

Рис. 4. Жизненный цикл меди

Медь, как и любой другой металл или минерал, имеет жизненный цикл и проходит множество технологических процессов, прежде чем принять пригодную для прменения форму. Рассмотрим каждый этап жизненного цикла меди[13].

В течение последнего десятилетия более 30 % годового использования меди приходилось на переработанные источники. Основываясь на глобальной модели запасов и потоков меди, по оценкам, две трети из 550 млн т меди, произведенной с 1900 г., все еще находятся в использовании.

[13] Copper Alliance. — URL: https://copperalliance.org/ (дата обращения 14.01.2022).

Добыча меди

В настоящее время добыча медного сырья осуществляется открытым (в карьерах) или подземным (шахтным) способом в зависимости от глубины залегания породы (в отдельных случаях возможна комбинированная разработка месторождений).

На всех стадиях разработки месторождений ведение горных работ сопровождается эксплуатационной разведкой. Во всем спектре задач, решаемых рудничными геологами, можно выделить несколько основных направлений:

- постоянная доразведка месторождения с целью уточнения морфологии и состава рудных тел;
- решение геологических задач по обеспечению качества добываемых товарных руд;
- геологическое обеспечение работ по проектированию и эксплуатации горных предприятий, текущее и перспективное планирование;
- решение вопросов, связанных с соблюдением законодательства об охране недр[14].

Добыча открытым способом

Открытая разработка месторождения включает в себя: подготовку поверхности, осушение месторождения, горно-капитальные работы по вскрытию и подготовке к добыче, а также очистной выемке, в том числе вскрытие путем удаления вмещающих руду пустых пород, и добычные работы (типовая схема приведена в статье по производству алюминия, с. 45 наст. изд.).

Основные процессы открытых горных работ: подготовительные работы (снятие почвы, вскрытие рудного тела), буровзрывные работы, добыча руды, транспортировка, обращение с породами (первичная подготовка, складирование пород и некондиционного сырья). Подробно процессы рассмотрены в статье по производству алюминия (с. 45–49 наст. изд.).

Добыча подземным способом

Подземная разработка месторождений медных руд различных форм, мощности, углов падения, на разных глубинах осуществляется с использованием подземных горных выработок (типовая схема приведена в статье по производству алюминия). Вскрытие, подготовка и очистная выемка выполняются последовательно или совмещенно во времени и пространстве с целью обеспечения производства достаточными запасами вскрытых, подготовленных и готовых к выемке запасов полезного ископаемого.

[14] Добыча и обогащение руд цветных металлов : Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям 23-2017 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. — URL: https://docs.cntd.ru/document/556173697 (дата обращения: 13.01.2022).

Этапы подземной разработки месторождения: подготовка рудничного поля, отделение горной массы от массива, выдача на транспортные выработки и транспортирование на поверхность с размещением пород в выработанном пространстве или в отвалах.

Основные горные выработки:

– шахтные стволы, квершлаги и штольни, открывающие доступ ко всему месторождению или его части и обеспечивающие возможность проведения подготовительных выработок и очистной выемки в запланированных объемах;
– штреки, квершлаги, уклоны, бремсберги, восстающие, орты, которыми вскрытая часть месторождения разделяется на обособленные выемочные участки, предусмотренные принятым способом подготовки и системой разработки;
– подэтажные и слоевые выработки, выработки буровые, погрузочно-доставочные, подсечки, вентиляционные, отрезные восстающие, лавы и другие забойные выработки, обеспечивающие выемку полезных ископаемых.

Технологические схемы и режимы обогащения медных руд

По классификации баланса запасов к важнейшим промышленным типам медных руд относятся: медистые песчаники; медно-порфировые; медно-колчеданные; кварцево-сульфидные (жильные); ванадиево-железомедные (магматические); медно-вольфрамовые; медно-никелевые; медно-висмутовые; медно-оловорудные; медно-золоторудные.

В свою очередь руды свинца и цинка подразделяют на полиметаллические (медно-свинцово-цинковые); барито-полиметаллические; свинцово-цинковые; барито-свинцово-цинковые; свинцовые; барито-свинцовые, колчеданные медно-цинковые.

Промышленные типы руд классифицируются главным образом по содержанию в них основных и сопутствующих компонентов, а также по форме рудных тел и генезису. Дальнейшее дифференцирование руд как объектов обогащения производится путем выделения подтипов и разновидностей их по степени окисленности, крупности и характеру вкрапленности рудных минералов, крепости, текстурно-структурным особенностям и другим признакам.

Так, в зависимости от соотношения сульфидных и окисленных минеральных форм основных металлов руды подразделяют на сульфидные, смешанные и окисленные. Если основные металлы в медных и медно-молибденовых рудах более чем на 90 %, а в полиметаллических — более чем на 80 % представлены сульфидными минералами, то руды считаются сульфидными. Если содержание сульфидных фракций основных металлов меньше 50 %, то — окисленными. При промежуточных содержаниях сульфидных форм основных металлов руды считаются смешанными. Основная масса (80–85 %) цветных металлов сосредоточена в сульфидных орудинениях, и сульфидные руды являются основным источником их производства.

По содержанию сульфидов в руде различают вкрапленные (менее 25 % сульфидов) и массивные (более 50 % сульфидов). Сульфидные медные руды при этом разделяются на первичные и вторичные в зависимости от соотношения первичных и вторичных сульфидов меди.

По крупности вкрапленности различают руды: крупновкрапленные — размер включений извлекаемых минералов более 0,40 мм, средней вкрапленности — размер включений составляет 0,15–0,40 мм, тонковкрапленные — размер вкрапленности менее 0,15 мм.

По характеру вкрапленности различают равномерно вкрапленные, неравномерно вкрапленные и руды с агрегативной вкрапленностью минералов.

Неизменным спутником сульфидов меди в рудах является сульфид железа — пирит.

Медь извлекают из сульфидных, окисленных и смешанных медных и медно-пиритных руд.

К промышленным сульфидным рудам относятся руды, содержащие свыше 0,3–0,4 % меди, которая не менее чем на 85–90 % представлена сульфидными минералами (халькопиритом, барнитом и халькозином).

Окисленные и смешанные медные руды находятся в верхних горизонтах месторождений меди. К легкофлотируемым окисленным медным минералам относятся малахит, азурит, атакамит, куприт, тенорит; к труднофлотируемым — хризоколла, диоптаз, практически не извлекаемые алюмосиликаты и фосфаты меди, а также медь, тесно связанная с гидроксидами железа и марганца.

Основным методом обогащения окисленных и смешанных руд является флотация. Гравитационные и магнитные методы обогащения играют второстепенную роль. При этом решаются задачи эффективного отделения сульфидных и окисленных минералов меди от породы, разделения сульфидов меди и железа, получения окисленных концентратов, повышения комплексности использования сырья за счет доизвлечения благородных металлов, магнетита и других ценных компонентов в отдельные продукты или концентраты. Из труднофлотируемых и «упорных» руд медь извлекают гидрометаллургическими методами или по комбинированным схемам, предусматривающим использование методов металлургии и обогащения. Получаемые при обогащении медные концентраты содержат 15–40 % меди, пиритные концентраты — от 38 до 50 % серы и не более 1 % свинца и цинка.

Производство меди

Производство первичной меди

Первичную медь (из рудного первичного сырья) можно получать с помощью пирометаллургических и гидрометаллургических процессов и электролиза. Наибольшее количество производится при применении первого способа. С его помощью получают практически 90 % всего металла. Он достаточно трудоемкий и продолжительный.

Пирометаллургический способ

Пирометаллургический способ состоит из ряда этапов в зависимости от типа перерабатываемого концентрата. Большая часть концентратов сульфидная, и этапы их переработки включают в себя обжиг, плавку, конвертирование, рафинирование и электролитическое рафинирование[15].

Общая схема производства меди из первичного сырья представлена на рисунке 5.

Обжиг в металлургии меди используют при переработке высокосернистых бедных по меди концентратов и руд. Цель обжига состоит в удалении части серы и окислении некоторого количества железа для перевода его оксидов в шлак при последующей плавке. В шихту, как правило, вводят флюсующие добавки (кварц, известняк) для получения шлака выбранного состава. При обжиге решаются и другие задачи: получение газов, пригодных для получения серной кислоты, усреднение, разогрев шихты. Основным способом обжига медных концентратов является обжиг в кипящем слое (КС). Сущность обжига в КС состоит в продувке слоя шихты восходящим потоком воздуха или в обогащенном кислородом дутье со скоростью, обеспечивающей «кипение» материала[16].

Плавка концентрата на штейн. Перед плавкой концентратов в печах взвешенной плавки требуется снизить содержание в них влаги, поэтому их сушат до примерно 0,2 %.

Для плавки в шахтных печах концентрат высушивается до 3,5–4,0 % и брикетируется.

Для сушки медных концентратов используется два типа сушилок: роторные сушилки, обогреваемые горячими отходящими газами, образующимися при сгорании топлива; паровые сушилки со змеевиком. Роторная сушилка представляет собой вращающийся барабан. Горячий газ, получаемый при сжигании природного газа, контактирует с влажным концентратом, и содержащаяся в концентрате вода переходит в газ. Паровые сушилки нагреваются паровыми змеевиками. Производительность зависит от давления пара; за счет увеличения давления до 18–20 бар производительность может возрастать. Для поглощения влаги из концентрата через него продувается небольшое количество воздуха.

[15] Производство меди : Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям 3-2019: // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. — URL: https://docs.cntd.ru/document/564068888 (дата обращения: 16.01.2022).

[16] Там же.

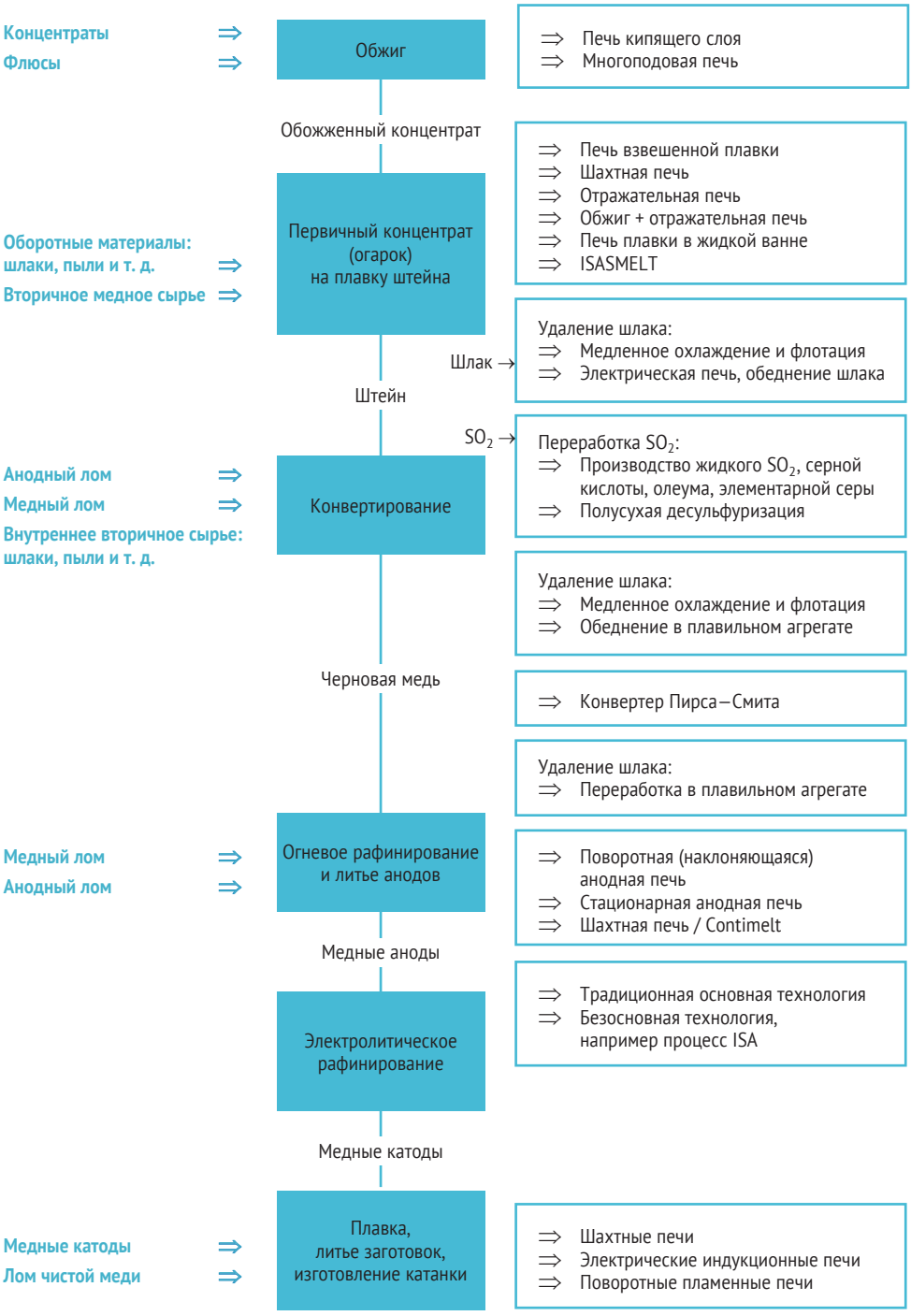


Рис. 5. Схема процесса производства меди

Обычно обжиг и плавку проводят одновременно в одной печи при высоких температурах для получения расплава, который можно разделить на штейн (сплав сульфидов металлов) и шлак, состоящий из оксидов. Флюсы, содержащие оксиды кремния и кальция, обычно добавляют к расплаву для образования шлака. Отходящие газы поступают на переработку, где служат сырьем для производства серной кислоты, реже — жидкого SO_2, или элементарной серы.

Этап плавки служит для отделения сульфида меди от других твердых примесей, присутствующих в руде, путем образования силикатов, в частности, силикатов железа. При переработке медного концентрата с низким содержанием серы и высоким содержанием органического углерода отходящие газы с высоким энергетическим потенциалом могут быть использованы в качестве дополнительного источника при производстве электроэнергии. Существуют два базовых процесса плавки: плавка в жидкой ванне и плавка в газовой среде (взвешенная плавка). В процессе плавки в газовой среде (взвешенной плавки) применяют обогащение дутья кислородом для получения автогенного или почти автогенного режима. Использование кислорода также повышает концентрацию диоксида серы, что позволяет эффективнее утилизировать отходящие газы в установках, использующих серу (обычно для производства серной кислоты или жидкого диоксида серы).

Конвертирование. Для переработки первичного сырья в Российской Федерации применяются процессы конвертирования двух типов: процесс конвертирования штейна и процесс конвертирования черной меди.

Процесс конвертирования штейна — это процесс периодического действия (циклический), реализуется в два этапа. Чаще всего процесс проводят в цилиндрической бочкообразной печи-конвертере (Пирса—Смита[17]) с добавлением кварцевого флюса. На первом этапе происходит окисление железа и части серы и образование шлака и газообразного диоксида серы; шлак периодически сливается и подвергается дальнейшей переработке с целью извлечения меди. На втором этапе, т. е. при продувке меди, сульфид меди окисляется до черновой меди (содержание меди — 96,0–99,2 %) и дополнительно образуется диоксид серы. В конце продувки черновую медь сливают. Управление процессом направлено на контроль уровня остаточной серы и кислорода в черновой меди. Диоксид серы поступает на переработку. Реакция первого периода протекает с большим выделением тепла, а также летучих металлических примесей, таких как свинец и цинк, которые затем улавливаются в очистных установках в виде возгонов и пыли и направляются для последующей переработки. Выделяемое тепло может также использоваться для плавки анодного скрапа и другого медного лома без дополнительного первичного тепла. Концентрация

[17] European Commission, DG XI, Technical BAT Note Heavy Metal Emissions from Non-Ferrous Industrial Plants, 1991; OSPARCOM, Description of BAT for the Primary Production of Non-Ferrous Metals (Zinc, Copper, Lead and Nickel).

диоксида серы зависит от типа печи, содержания кислорода в дутье и стадии конвертирования. Для периодического конвертирования первичного медного сырья на черновую медь на некоторых предприятиях применяются поворотные конвертеры с верхним дутьем (TBRC).

Конвертирование черной меди — периодический процесс, при котором расплав из плавильной печи непосредственно плавится на черновую медь. Один цикл конвертирования длится около 8 ч. На первом этапе добавляют примерно 5–6 т кварцевого флюса на цикл для вывода в шлак окисленного железа и свинца. Для удаления летучих примесей и поддержания теплового баланса конвертера добавляют небольшое количество коксика (0,1–1,0 т). Когда содержание свинца падает ниже 2 %, начинают продувку и в конвертер добавляют кремнезем для связывания PbO. Процесс завершается, когда содержание свинца становится ниже 0,3 %. Отходящие газы конвертера отводятся на мокрую газоочистку, а шлам со скруббера, содержащий 55–65 % свинца, поступает на завод по производству свинца.

Схема производства черновой меди приведена на рисунке 6.

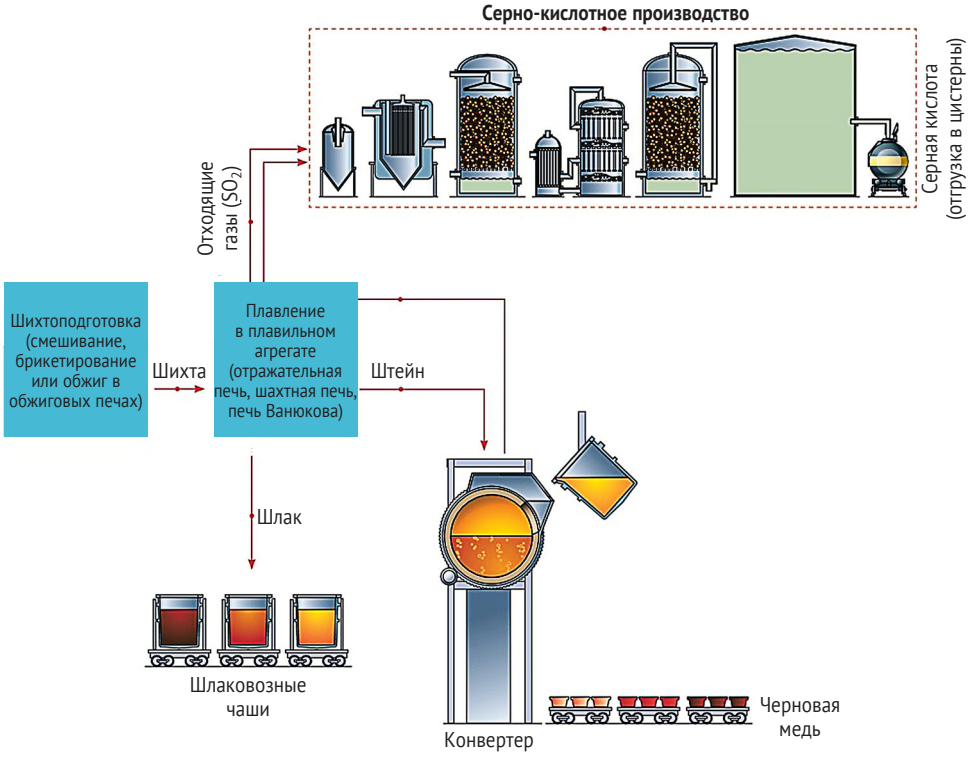


Рис. 6. Производство черновой меди

Источник: Уральская горно-металлургическая компания. — URL: https://ugmk.com/activity/primary_production/tsvetnaya-metallurgiya/ (дата обращения: 20.12.2021).

Огневое рафинирование — это следующий этап очистки меди от примесей, которому подвергается черновая медь, полученная на этапе конвертирования. Процесс рафинирования предусматривает два этапа:

– окислительный за счет подачи воздуха;
– восстановительный за счет восстановителя (например, углеводородов) для снижения содержания оксидов меди и более полного ее извлечения[18].

При пирометаллургическом (огневом) рафинировании металлов решаются две задачи: частичное или полное удаление примесей и получение однородных по структуре плоских отливок (с минимальной газонасыщенностью), имеющих постоянную массу, толщину и форму, удобные для погрузочно-разгрузочных операций и соответствующие требованиям эффективного электролитического рафинирования.

Существует несколько разновидностей рафинирования в зависимости от свойств основного металла и сопутствующих примесей. Данный метод представляет собой селективное окисление примесей кислородсодержащим реагентом и их ошлакование. Избыток кислорода удаляется путем проведения операции восстановления. Физико-химической основой процесса являются:

– меньшее сродство к кислороду у рафинируемого металла по сравнению с удаляемыми примесями;
– ограниченная растворимость оксидов элементов-примесей в объеме расплава металла и меньшая их удельная плотность, чем у рафинируемого металла;
– более быстрая и полная восстановимость оксидов основного металла до элементного состояния.

На следующей стадии (восстановление или дразнение) добавляют восстановитель, например, природный газ, сырую древесину, для частичного удаления кислорода, растворенного в жидкой меди, и восстановления ее оксидов.

Схема рафинирования меди приведена на рисунке 7.

Электролитическое рафинирование. Процесс электрорафинирования анодной меди осуществляется в водном растворе серной кислоты и сульфата меди с использованием тонких катодных основ из электролитной меди, нержавеющей стали или титана. Нержавеющие или титановые матрицы, на которых происходит наращивание медного осадка, являются катодными основами многоразового использования (процесс Mount ISA, безосновная технология Outotec и система Noranda/Kidd Creek). Аноды и катоды помещают в электролизные ванны, располагая электроды в ваннах вертикально, параллельно друг другу. В результате электролитического рафинирования анодной меди получаются товарные медные катоды, медеэлектролитный шлам, анодные остатки и отработанный загрязненный металлами электролит. Схема электролиза меди приведена на рисунке 8.

[18] European Commission, DG XI, Technical BAT Note Heavy Metal Emissions from Non-Ferrous Industrial Plants, 1991; OSPARCOM, Description of BAT for the Primary Production of Non-Ferrous Metals (Zinc, Copper, Lead and Nickel); *Traulsen H.* Plant Information — Copper Industry (Draft). — Copper Expert Group, 1998.

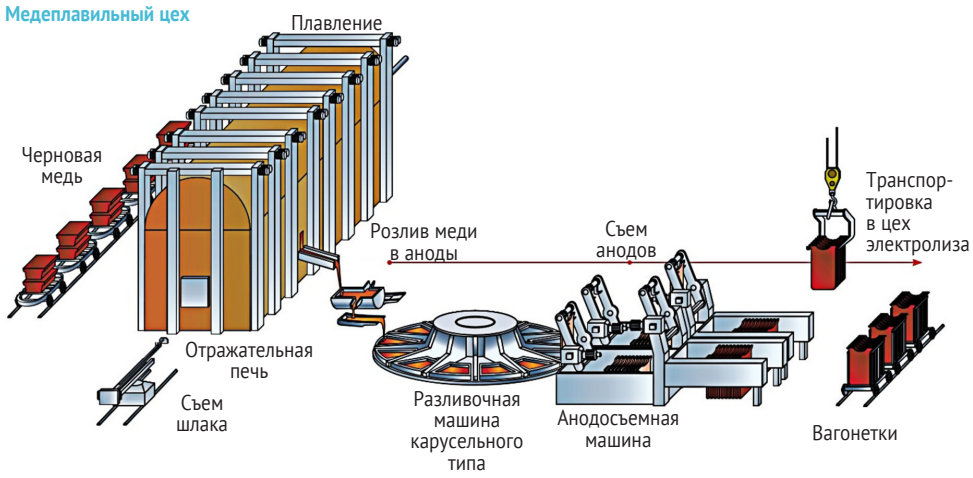


Рис. 7. Процесс рафинирования меди

Источник: Уральская горно-металлургическая компания.

Рис. 8. Процесс электролиза меди

Источник: Уральская горно-металлургическая компания.

Удаление примесей в процессе электрорафинирования анодной меди направлено на производство катодной меди чистотой, равной или лучше, чем «Марка А» по стандарту Лондонской биржи металлов. Следует отметить, что уровень содержания примесей в аноде влияет на качество катода; содержание примесей в аноде, в свою очередь, зависит от химического состава концентрата или вторичного сырья и технологии, по которой получена черновая и анодная медь.

Альтернативная технология производства медных анодов — непрерывное литье на двухленточной литейной машине Hazelett, на которой производят медную ленту заданной толщины анода. Из этой ленты ножницами нарезают аноды традиционной формы или в соответствии с системой Contilanod отливают «уши» анода на специальных боковых блоках-кристаллизаторах, расположенных на литейной машине через определенные интервалы. Преимущество этой технологии — в однородности получаемых анодов; однако система требует тщательного технического обслуживания и сравнительно высоких производственных затрат. Качество анода обусловлено составом сырья.

Анодные остатки, составляющие обычно 14–19 % от первоначальной массы анодов, являются оборотным материалом и отправляются в анодную печь на переплавку с исходным медным сырьем. Количество и состав анодных шламов зависит от чистоты анодной меди. Анодный шлам оседает на дне электролизных ванн, откуда периодически удаляется. В шламе концентрируются благородные металлы, такие как золото, серебро, металлы платиновой группы. Кроме благородных металлов в шлам переходят другие ценные элементы — селен и теллур. В дальнейшем шлам перерабатывается аффинажным способом для извлечения ценных компонентов. Металлы, у которых электрохимический потенциал более электроотрицательный, чем у меди (никель, железо, цинк), при электролитическом рафинировании меди переходят в раствор. Поэтому расчет объема и периодичности вывода отработанного электролита производится исходя из времени накопления в электролите примесей до предельного нормированного значения. На разных предприятиях применяются различные схемы утилизации отработанного электролита. На большинстве отечественных предприятий, использующих минеральное сырье, применяется двухстадийная схема извлечения меди из отработанного электролита:

– упаривание и кристаллизация электролита с получением сульфата меди;
– извлечение остаточной меди из упаренного раствора электроэкстракцией.

Современная тенденция заключается в увеличении размера ванн, установке большего числа электродов и использовании катодной основы из нержавеющей стали. Рост эффективности заметен, когда эти факторы сочетаются с высоким уровнем контроля качества анодов. Контроль качества необходим для обеспечения заданной геометрии, хорошего электрического контакта и требуемой чистоты анода. Применение безосновной технологии

сокращает затраты электролиза меди (отсутствует матричный передел для получения стартерных катодных основ из электролитической меди), обеспечивает стабильно высокий коэффициент использования тока (97 % и выше). Для современных цехов электролиза характерна высокая степень автоматизации замены катодов и анодов, сдирки катодов с катодной основы из нержавеющей стали. Вместо последней может применяться механически изготовленная медная матрица.

Переработка богатых медью шлаков. Шлаки, образующиеся на этапе плавки первичного сырья на штейн с содержанием меди более 30 % и на этапах конвертирования, богаты медью и перерабатываются с применением нескольких технологий. Одним из таких процессов является использование электропечи для отстаивания и проведения реакции взаимодействия шлака, содержащего оксиды меди, с углеродом в форме коксовой мелочи или собственно электродами с получением медного штейна и обедненного по меди шлака. Процесс переработки шлака в электропечи может быть как непрерывным, так и периодическим. Конвертерный шлак также может быть переработан в электрической печи.

Альтернативной технологией являются процессы флотации: шлак охлаждают, измельчают и направляют на флотацию с получением флотационного концентрата с высоким содержанием меди, который поступает на плавку. При наличии соответствующего спроса шлаки после переработки могут применяться в строительстве, включая дорожное, для сооружения набережных и других аналогичных целей, а также для пескоструйной обработки, так как часто обладают лучшими свойствами по сравнению с альтернативными материалами. Мелкозернистый железистый материал также используется в качестве заполнителя при производстве цемента. Шлаки с высоким содержанием меди, такие как конвертерные и рафинировочные, также повторно перерабатываются на этапе плавки[19].

Гидрометаллургический способ

Гидрометаллургия — извлечение элементов из сырья с помощью жидкофазных растворителей и последующее выделение их из растворов в форме металлов или моноосадков. Этот процесс обычно применяется для переработки окисленных руд или смешанных окисленных/сульфидных руд непосредственно на территории рудника, где есть достаточно места для формирования участков выщелачивания и переработки.

Общая схема гидрометаллургического процесса представлена на рисунке 9.

[19] Производство меди : Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям 3-2019 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов.

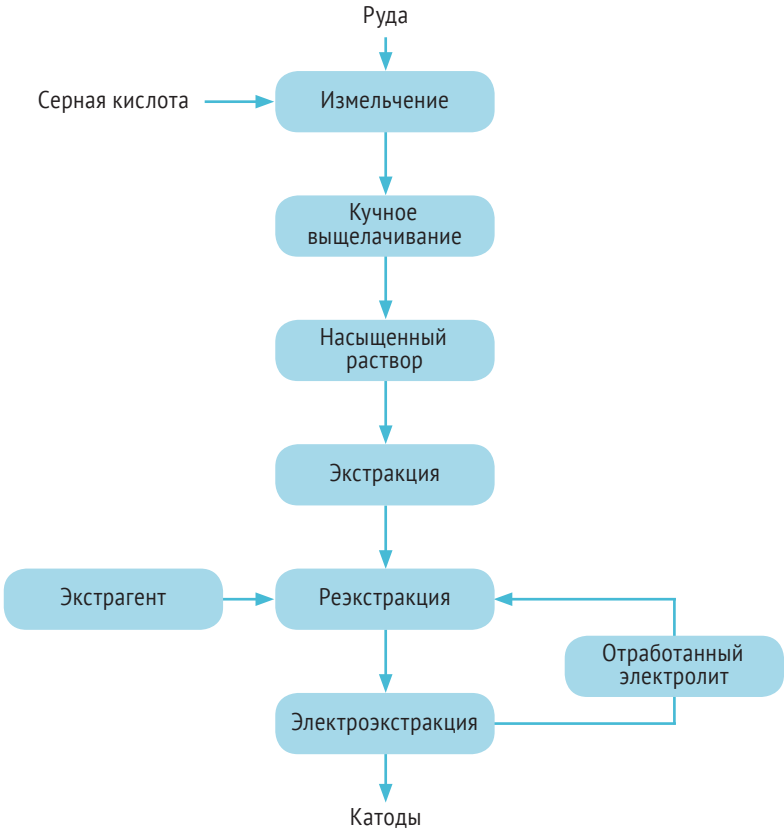


Рис. 9. Обобщенная технологическая схема гидрометаллургического процесса

Источник: *Riekkola-Vanhanen M.* Finnish Expert Report on BAT in Copper Production and By-Production of Precious Metals. — Finnish EPA, 1999.

Основные стадии гидрометаллургической технологии следующие.

1. Подготовка сырья. Эта операция способствует более быстрому, полному, селективному выщелачиванию ценного металла. Известны механические способы (дробление, измельчение) и физико-химические, связанные с изменением фазового состава сырья (прокалка, обжиг, спекание, гидротермальное активирование, обезжиривание вторичного сырья и др.).

2. Выщелачивание, т. е. перевод металла в раствор с последующим отделением нерастворимого остатка методами отстаивания, фильтрации, центрифугирования и промывкой остатка.

3. Подготовка раствора: очистка от посторонних примесей физико-химическими методами (осаждение в форме труднорастворимых соединений, цементация, сорбционно-экстракционное разделение), концентрирование раствора приемами упаривания, сорбции и экстракции с последующим получением при десорбции и реэкстракции обогащенной жидкой фазы.

4. Выделение из раствора ценного элемента в форме металла (электролиз, автоклавное осаждение газом) или соединения (кристаллизация, химическое осаждение, дистилляция)[20].

Производство вторичной меди

Для производства вторичной меди в подавляющем большинстве случаев применяют пирометаллургические процессы. Этапы процесса зависят от содержания меди во вторичном сырье, гранулометрического состава и содержания других элементов[21]. Как и для первичной меди, разработано несколько этапов для удаления этих примесей и возврата металлов из получаемых отходов[22].

Вторичные материалы, идущие на переработку, могут содержать органические материалы, такие как покрытие, или смазку, в связи с чем в технологический процесс вводят этапы обезжиривания и снятия покрытия или применяют печи и системы газоочистки соответствующей конструкции. Цель — увеличить мощность для переработки возросшего объема газа, нейтрализовать летучие органические соединения (ЛОС) и минимизировать образование ПХДД/Ф или разрушить их. Тип предварительной обработки или используемой печи определяется наличием органических веществ, типом загружаемых материалов, т. е. содержанием меди и других металлов и их состоянием (является ли материал окисленным или металлическим).

При плавке загрязненного латунного лома в конвертере для разделения содержащихся в нем металлов производится возгонка или ошлакование других элементов сплава с получением черновой меди и пыли из фильтров с высоким содержанием цинка.

Этапы производства меди из вторичного сырья в целом аналогичны этапам производства первичной меди, но в качестве сырья обычно используются окисленные или металлические материалы, что, соответственно, определяет иные производственные условия. Плавка вторичного сырья происходит в нейтральных или восстановительных условиях.

ХАРАКТЕРИСТИКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА МЕДИ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Рассмотрим описанные технологии (продукция, сырье, эмиссии) с точки зрения их «экологичности». Сведения о химических веществах процессов производства меди приведены в таблице 3.

---

[20] Производство меди : Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям 3–2019 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов.

[21] *Traulsen H.* Plant Information — Copper Industry (Draft); *Rentz O.* Report on BAT in German Copper Production (Final Draft). — University Karlsruhe (DFIU), 1999.

[22] VDI 2102. Part 1 : Emission Control. Secondary copper smelting and refining plants. — 2007; VDI 2102. Part 2 : Emission Control. Copper and copper alloy melting plants. — 2013.

Таблица 3. Сведения о химических веществах процесса производства меди

№ п/п	Наименование химического вещества	Основной/ вспомогательный процесс образования	Процесс/ Установка	Назначение	Сведения о веществе			
					Номер CAS	Агрегатное состояние	Молекулярная формула	
1	Медь	Основной процесс	Производство меди	Целевой продукт, эмиссия (сбросы)	7440-50-8	Твердое	Cu	
2	Пыль неорганическая, содержащая двуокись кремния, %:	Основной процесс	Производство меди	Эмиссия (выбросы)	–	Твердое	–	
	а) более 70							
	б) 20-70							
	в) менее 20, включая:							

	Сведения о веществе				
	Гигиенические нормативы [a]				Краткое описание опасности и основные характеристики [b]
	В воздухе рабочей зоны		В атмосферном воздухе городских и сельских поселений		
	ПДК, мг/м^3	Класс опасности	ПДК, мг/м^3	Класс опасности	
	1/0,5	2	–	–	*Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами* Горючее вещество, пыль может воспламеняться на воздухе: $T_{св.}$ = 270° С (аэрогель); 700° С (аэровзвесь); Температурные пределы распространения пламени от –7° С до 400° С. *Воздействие на организм человека* Вредно при проглатывании, может причинить вред при вдыхании: LD_{50} = 300–500 мг/кг (в/ж, крысы); LC_{50} = 5110 мг/м^3 (инг., крысы, 4 ч). Вызывает раздражение кожи, глаз и верхних дыхательных путей. При контакте с кожей может вызывать аллергическую реакцию. *Воздействие на окружающую среду* Чрезвычайно токсично для водных организмов, в т. ч. с долгосрочными последствиями: LC_{50} = 0,0068–0,0156 мг/л (рыбы, 96 ч); NOEC = 0,0165–0,245 мг/л (водоросли, 72 ч).
	0,02 (ОБУВ по кремнию диоксиду аморфному)	–		3	Сведения об опасных свойствах и идентификационные данные зависят от конкретного состава пыли. Данные по диоксиду кремния приведены ниже.
			0,15/0,05/–		
			0,3/0,1/–		
			0,5/0,15/–		

№ п/п	Наименование химического вещества	Основной/ вспомогательный процесс образования	Процесс/ Установка	Назначение	Сведения о веществе			
					Номер CAS	Агрегатное состояние	Молекулярная формула	
2	Кремний диоксид	Основной процесс	Производство меди	Эмиссия (выбросы)	7631-86-9 (аморфный) 14464-46-1 (кристобалит) 14808-60-7 (кварц)	Твердое	SiO_2	
	а) аморфный в виде аэрозоля конденсации при содержании более 60 %; кремний диоксид аморфный и стеклообразный в виде аэрозоля дезинтеграции; кристаллический при содержании в пыли более 70 %							
	б) кремний диоксид аморфный в виде аэрозоля конденсации при содержании от 10 до 60 %; кремний диоксид кристаллический при содержании в пыли от 10 до 70 %							
	в) кремний диоксид кристаллический при содержании в пыли от 2 до 10 %							
3	Никель	Основной процесс	Производство меди	Эмиссия (выбросы, сбросы)	7440-02-0	Твердое	Ni	

Таблица 3 (продолжение)

Сведения о веществе				
Гигиенические нормативы [a]				Краткое описание опасности и основные характеристики [b]
В воздухе рабочей зоны		В атмосферном воздухе городских и сельских поселений		
ПДК, мг/м^3	Класс опасности	ПДК, мг/м^3	Класс опасности	
				Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами Не опасен. *Воздействие на организм человека* Вызывает раздражение кожи, глаз и верхних дыхательных путей. Пыль кристаллического кремния (кварца, кристобалита) может поражать легкие в результате продолжительного воздействия при вдыхании (фиброгенное действие). *Воздействие на окружающую среду* Не оказывает негативного воздействия [c].
3/1	3	0,15/0,05/–	3	
6/2		0,3/0,1/–		
–/4		0,5/0,15/–		
0,05	1	–/0,001/ 0,00005	2	*Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами* Горючее вещество, пыль может воспламеняться на воздухе: $T_{св.}$ = 470° С. Нижний концентрационный предел распространения пламени 220 г/м^3. *Воздействие на организм человека* При контакте с кожей может вызывать аллергическую реакцию. Поражает органы дыхательной системы в результате продолжительного воздействия. Предполагается, что данное вещество вызывает раковые заболевания (канцерогенное действие). *Воздействие на окружающую среду* Чрезвычайно токсично для водных организмов, в т. ч. с долгосрочными последствиями: EC_{50} = 0,174–0,311 мг/л (водоросли, 72 ч); NOEC = 0,057 мг/л (рыбы, 32 дня).

№ п/п	Наименование химического вещества	Основной/ вспомогательный процесс образования	Процесс/ Установка	Назначение	Сведения о веществе			
					Номер CAS	Агрегатное состояние	Молекулярная формула	
4	Оксид никеля	Основной процесс	Производство меди	Эмиссия (выбросы)	1313-99-1	Твердое	NiO	
5	Свинец и его соединения, кроме тетраэтилсвинца, в пересчете на свинец, включая:	Основной процесс	Производство меди	Эмиссия (выбросы)	–	–	–	
	Свинец				7439-92-1	Твердое	Pb	

Таблица 3 (продолжение)

	Сведения о веществе				
	Гигиенические нормативы [a]				Краткое описание опасности и основные характеристики [b]
	В воздухе рабочей зоны		В атмосферном воздухе городских и сельских поселений		
	ПДК, мг/м³	Класс опасности	ПДК, мг/м³	Класс опасности	
	0,05	1	–/0,001/–	2	*Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами* Не опасен. *Воздействие на организм человека* Вызывает раздражение кожи, глаз и верхних дыхательных путей. При контакте с кожей может вызывать аллергическую реакцию. Поражает органы дыхательной системы в результате продолжительного воздействия. Может вызывать раковые заболевания (канцерогенное действие). *Воздействие на окружающую среду* Может вызывать долгосрочные отрицательные последствия для водных организмов.
	–	–	–	–	Сведения об опасных свойствах и идентификационные данные зависят от конкретного вещества данной группы. Сведения по свинцу приведены ниже:
	–/0,05	1	0,001/0,0003/0,00015	1	*Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами* Горючее вещество, пыль может воспламеняться на воздухе: $T_{св.}$ = 270° С (аэрогель); 580° С (аэрозоль). *Воздействие на организм человека* Предполагается, что данное вещество вызывает генетические дефекты и раковые заболевания (мутагенное и канцерогенное действие). Может отрицательно повлиять на способность к деторождению или на неродившегося ребенка (репродуктивная токсичность), поражать органы (эндокринную систему, систему крови, почки и др.) в результате продолжительного воздействия. *Воздействие на окружающую среду* Чрезвычайно токсично для водных организмов, в т. ч. с долгосрочными последствиями: EC_{50} = 0,6 мг/л (ракообразные, 48 ч); NOEC = 0,0034 мг/л (ракообразные, 48 ч).

№ п/п	Наименование химического вещества	Основной/ вспомогательный процесс образования	Процесс/ Установка	Назначение	Сведения о веществе			
					Номер CAS	Агрегатное состояние	Молекулярная формула	
6	Мышьяк и его соединения, кроме водорода мышьяковистого, включая:	Основной процесс	Производство меди	Эмиссия (выбросы, сбросы)	–	–	–	
	Мышьяк				7440-38-2	Твердое	As	
7	Серы диоксид	Основной процесс	Производство меди	Эмиссия (выбросы)	7446-09-5	Газ	SO_2	

Таблица 3 (продолжение)

	Сведения о веществе				
	Гигиенические нормативы [a]				Краткое описание опасности и основные характеристики [b]
	В воздухе рабочей зоны		В атмосферном воздухе городских и сельских поселений		
	ПДК, мг/м³	Класс опасности	ПДК, мг/м³	Класс опасности	
	–	–	–	–	Сведения об опасных свойствах и идентификационные данные зависят от конкретного вещества данной группы. Сведения по мышьяку приведены ниже.
	0,04/0,01	1	–/0,0003/0,000015	1	*Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами* Не опасен. *Воздействие на организм человека* Токсично при вдыхании и проглатывании: LD_{50} = 15–763 мг/кг (в/ж, крысы). Может вызывать раковые заболевания (канцерогенное действие), поражать органы (ЦНС, дыхательную систему, систему крови, печень, почки и др.) в результате однократного и продолжительного воздействия. Предполагается, что данное вещество может отрицательно повлиять на способность к деторождению (репродуктивная токсичность). *Воздействие на окружающую среду* Токсично для водных организмов, в т. ч. с долгосрочными последствиями: EC_{50} = 1,5 мг/л (ракообразные, 48 ч); EC_{50} = 2,31 мг/л (ракообразные, 10 дней).
	10	3	0,5/0,05/–	3	*Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами* Не опасен. *Воздействие на организм человека* Токсично при вдыхании: LC_{50} = 884,14 ppm (инг., крысы, 4 ч). Смертельная концентрация для человека 2660 мг/м³ (при вдыхании в течение 10 мин). Вызывает химические ожоги кожи и глаз. *Воздействие на окружающую среду* Не оказывает негативного воздействия [c].

№ п/п	Наименование химического вещества	Основной/ вспомогательный процесс образования	Процесс/ Установка	Назначение	Сведения о веществе			
					Номер CAS	Агрегатное состояние	Молекулярная формула	
8	Оксид меди	Основной процесс	Производство меди	Эмиссия (выбросы)	1317-38-0	Твердое	CuO	
9	Сульфат меди	Основной процесс	Производство меди	Эмиссия (выбросы)	7758-98-7	Твердое	$CuSO_4$	

Таблица 3 (продолжение)

	Сведения о веществе				
	Гигиенические нормативы [a]				Краткое описание опасности и основные характеристики [b]
	В воздухе рабочей зоны		В атмосферном воздухе городских и сельских поселений		
	ПДК, мг/м^3	Класс опасности	ПДК, мг/м^3	Класс опасности	
	–	–	–/0,002/ 0,00002	2	*Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами* Не опасен. *Воздействие на организм человека* Вредно при проглатывании: LD_{50} = 470 мг/кг (в/ж, крысы). Вызывает раздражение кожи, глаз и верхних дыхательных путей. При контакте с кожей может вызывать аллергическую реакцию. *Воздействие на окружающую среду* Чрезвычайно токсично для водных организмов, в т. ч. с долгосрочными последствиями: LC_{50} = 0,0384–0,2562 мг/л (рыбы, 96 ч); NOEC = 0,0157–0,164 мг/л (водоросли, 72 ч).
	1,5/0,5	2	0,003/0,001/–	2	*Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами* Не опасен. *Воздействие на организм человека* Токсично при проглатывании: LD_{50} = 300 мг/кг (в/ж, крысы). Минимальная смертельная доза для человека 50 мг/кг. Вызывает раздражение кожи, глаз и верхних дыхательных путей. При контакте с кожей может вызывать аллергическую реакцию. Может поражать органы дыхательной системы в результате продолжительного воздействия. Предполагается, что данное вещество вызывает генетические дефекты (мутагенное действие) и отрицательно повлиять на способность к деторождению или на неродившегося ребенка (репродуктивная токсичность). *Воздействие на окружающую среду* Чрезвычайно токсично для водных организмов, в т. ч. с долгосрочными последствиями: EC_{50} = 0,0058–0,0073 мг/л (ракообразные, 48 ч); NOEC = 0,0157–0,164 мг/л (водоросли, 72 ч). Вызывает изменение органолептических свойств воды.

№ п/п	Наименование химического вещества	Основной/ вспомогательный процесс образования	Процесс/ Установка	Назначение	Сведения о веществе			
					Номер CAS	Агрегатное состояние	Молекулярная формула	
10	Хлорид меди	Основной процесс	Производство меди	Эмиссия (выбросы)	7758-89-6	Твердое	CuCl	
11	Серная кислота	Основной процесс	Производство меди	Эмиссия (выбросы)	7664-93-9	Жидкое	H_2SO_4	

Таблица 3 (продолжение)

	Сведения о веществе				
	Гигиенические нормативы [a]				Краткое описание опасности и основные характеристики [b]
	В воздухе рабочей зоны		В атмосферном воздухе городских и сельских поселений		
	ПДК, мг/м^3	Класс опасности	ПДК, мг/м^3	Класс опасности	
	1,5/0,5	2	–/0,002/ 0,00005	2	*Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами* Не опасен. *Воздействие на организм человека* Токсично при проглатывании, вредно при попадании на кожу: LD_{50} = 140 мг/кг (в/ж, крысы). LD_{50} = 1224 мг/кг (н/к, крысы). Вызывает раздражение кожи, глаз и верхних дыхательных путей. При контакте с кожей может вызывать аллергическую реакцию. *Воздействие на окружающую среду* Чрезвычайно токсично для водных организмов, в т. ч. с долгосрочными последствиями: LC_{50} = 0,039 мг/л (рыбы, 96 ч); NOEC = 0,03 мг/л (водоросли, 7 дней). Вызывает изменение органолептических свойств воды.
	1	2	0,3/0,1/0,001	2	*Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами* Не опасна. *Воздействие на организм человека* Смертельно при вдыхании: LC_{50} = 375 мг/м^3 (инг., крысы, 4 ч). Вызывает химические ожоги кожи, глаз и внутренних органов при случайном проглатывании: смертельная доза для человека 135 мг/кг. Поражает органы дыхательной системы в результате однократного и продолжительного воздействия. *Воздействие на окружающую среду* Вредно для водных организмов: LC_{50} = 16–28 мг/л (рыбы, 96 ч). Вызывает изменение органолептических свойств воды.

№ п/п	Наименование химического вещества	Основной/вспомогательный процесс образования	Процесс/Установка	Назначение	Сведения о веществе			
					Номер CAS	Агрегатное состояние	Молекулярная формула	
12	Оксид азота	Основной процесс	Производство меди	Эмиссия (выбросы)	10102-43-9	Газ	NO	
13	Диоксид азота	Основной процесс	Производство меди	Эмиссия (выбросы)	10102-44-0	Газ	NO_2	
14	Цинк	Основной процесс	Производство меди	Эмиссия (сбросы)	7440-66-6	Твердое	Zn	

Таблица 3 (продолжение)

	Сведения о веществе				
	Гигиенические нормативы [a]				Краткое описание опасности и основные характеристики [b]
	В воздухе рабочей зоны		В атмосферном воздухе городских и сельских поселений		
	ПДК, мг/м^3	Класс опасности	ПДК, мг/м^3	Класс опасности	
	5 (по оксидам азота в пересчете на NO_2)	3	0,4/–/0,06	3	*Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами* Окисляющий газ: может вызвать или усилить возгорание. *Воздействие на организм человека* Смертельно при вдыхании: LC_{50} = 57,5 ppm (инг., крысы, 4 ч). Вызывает химические ожоги кожи и глаз. Может поражать органы (дыхательную систему, ЦНС, систему крови) в результате продолжительного воздействия. *Воздействие на окружающую среду* Не оказывает негативного воздействия [c].
	2	3	0,2/0,1/0,04	3	*Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами* Окисляющий газ: может вызвать или усилить возгорание. *Воздействие на организм человека* Смертельно при вдыхании: LC_{50} = 88 ppm (инг., крысы, 4 ч). Вызывает химические ожоги кожи и глаз. *Воздействие на окружающую среду* Не оказывает негативного воздействия [c].
	–	–	–	–	Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами Горючее вещество. При контакте с водой выделяет воспламеняющиеся газы. В форме порошка спонтанно воспламеняется на воздухе (пирофорное вещество): $T_{св.}$ = 310° С (аэрогель); 600° С (аэровзвесь). Концентрационный предел распространения пламени 480 мг/м^3. *Воздействие на организм человека* Вызывает слабое раздражение кожи и слизистых оболочек глаз. *Воздействие на окружающую среду* Чрезвычайно токсично для водных организмов, в т. ч. с долгосрочными последствиями: LC_{50} = 0,11–0,271 мг/л (рыбы, 96 ч); NOEC = 0,06 мг/л (водоросли, 72 ч).

№ п/п	Наименование химического вещества	Основной/ вспомогательный процесс образования	Процесс/ Установка	Назначение	Сведения о веществе			
					Номер CAS	Агрегатное состояние	Молекулярная формула	
15	Взвешенные вещества	Основной процесс	Производство меди	Эмиссия (сбросы)	–	–	–	
16	pH	Основной процесс	Производство меди	Эмиссия (сбросы)	–	–	–	

Примечания

[a] Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 года № 2 «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания”».

[b] Основные характеристики согласно справочным материалам и сведениям, представленным в базах данных по химическим веществам:
- База данных ChemADVISOR. — URL: https://www.chemadvisor.com/Online (дата обращения: 20.12.2021);
- База данных Европейского Химического Агентства (ECHA). — URL: https://echa.europa.eu/ (дата обращения: 20.12.2021);
- База данных АРИПС «Опасные вещества». — URL: http://www.rpohv.ru/online/ (дата обращения: 20.12.2021);
- *Гусева Т. В.* Гидрохимические показатели состояния окружающей среды: справочные материалы. — М. : РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2005.

[c] Согласно принятым на международном уровне подходам к классификации опасности химических веществ — Рекомендациям ООН «Согласованная на глобальном уровне система классификации опасности и маркировки химической продукции» (GHS). — URL: https://unece.org/ru/ghs-rev7-2017 (дата обращения: 20.12.2021).

Идентификационные данные вещества:

Номер CAS (Chemical Abstracts Service), или CAS Number, — уникальный численный идентификатор химического вещества, внесенного в Реестр Химической Реферативной службы (подразделение Американского химического общества).

Таблица 3 (окончание)

	Сведения о веществе				
	Гигиенические нормативы [a]				Краткое описание опасности и основные характеристики [b]
	В воздухе рабочей зоны		В атмосферном воздухе городских и сельских поселений		
	ПДК, мг/м^3	Класс опасности	ПДК, мг/м^3	Класс опасности	
	–	–	0,5/0,15/0,075	3	Сведения об опасных свойствах и идентификационные данные зависят от конкретного состава взвешенных веществ. *Воздействие на окружающую среду* Нарушают общесанитарный режим водоемов.
	–	–	–	–	Не является химическим веществом. Значение показателя pH не должно выходить за пределы 6,5–7,5 для водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового значения, а также водоемов рыбохозяйственного значения.

Показатели опасности, обусловленной физико-химическими свойствами вещества:
$T_{св.}$ — температура самовоспламенения — наименьшая температура окружающей среды, при которой в условиях специальных испытаний наблюдается самовоспламенение вещества.

Показатели опасности, обусловленной токсикологическими свойствами вещества:
LC_{50} (Letal Concentration) — средняя смертельная концентрация в воздухе — концентрация вещества, вызывающая гибель 50 % животных при 1- или 4-часовом ингаляционном (инг.) воздействии.

LD_{50} (Letal Dose) — средняя смертельная доза — доза вещества, вызывающая гибель 50 % животных при однократном введении в желудок (в/ж) или нанесении на кожу (н/к).

Показатели опасности, обусловленной экотоксикологическими свойствами вещества:
LC_{50} (Letal Concentration) — средняя смертельная концентрация — концентрация вещества в воде, вызывающая гибель 50 % водных организмов (гидробионтов) при установленном времени воздействия (96-часовом для рыб, 48-часовом для ракообразных, 72- или 96-часовом для водорослей) в течение заданного периода наблюдения.

EC_{50} (Effective Concentration) — средняя эффективная концентрация — концентрация вещества в воде, вызывающая негативный эффект (изменение тест-реакции, выраженной в гибели гидробионтов, снижении интенсивности размножения, снижении подвижности или других типичных поведенческих характеристик, а также в подавлении некоторых биохимических процессов, протекающих в клетках и ферментных системах) у водных организмов на 50 % при установленном времени воздействия в течение заданного срока наблюдений.

NOEC (No Observed Effect Concentration), NOEL (No Observed Effect Limit), NOAEL (No Observed Adverse Effect Level), NOELR (No Observed Effect Loading Rate) — максимально недействующая доза — максимальная концентрация вещества в воде, при которой не происходит гибели водных организмов и/или не наблюдается иного видимого токсического эффекта на гидробионтов в пределах установленного времени воздействия в течение заданного периода наблюдения.

СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ

Сравнение технологий по ключевым показателям

Расход сырья, электроэнергии, выбросы пыли и образование отходов являются основными показателями по ресурсо- и энергоэффективности при производстве первичной меди.

Расход сырья зависит от многих факторов: типа печи, состояния технологии, качества сырья, транспортных потерь и т. д.

В таблице 4 и на рисунке 10 приведено сравнение эффективности различных способов плавки меди по ключевым показателям производства (сквозное извлечение меди, удельные затраты топливных ресурсов, содержание серы в отходящих газах).

Сквозное извлечение меди — коэффициент, показывающий долю меди (в процентах), которая перешла из медного концентрата в черновую медь.

Удельные затраты топливных ресурсов — количество потраченного топлива для выплавки 1 т черновой меди.

Содержание SO_2 в отходящих газа — процентное содержание SO_2 в общем объеме образовавшихся отходящих газов.

Таблица 4. Сравнение эффективности различных способов плавки по ключевым показателям

Наименование способа плавки	Сквозное извлечение меди, %	Затраты топливных ресурсов, т у. т. / т ч. м	Содержание SO_2 в отходящих газах, %	
			При плавке на штейн	При конвертировании
Отражательная	95,51	0,86	12	16
Шахтная	94,48	0,13	6	10
В печи Ванюкова	96,00	–	25	6
В печи Ausmelt	96,00	0,17	18	13

Примечание: т ч. м. — тонна черновой меди.

Рис. 10. Сравнение эффективности способов плавки по ключевым показателям

Источником выделения вредных веществ при производстве меди являются используемые сырье и материалы. При этом зачастую очень важную роль играет не столько химический состав применяемых сырья и материалов, сколько их физические характеристики, такие, например, как гранулометрический состав.

Прямые и неорганизованные выбросы пыли на этапах плавки, конвертирования и рафинирования могут быть значительными. Эти выбросы также имеют большое значение, поскольку на соответствующих технологических этапах предусмотрено удаление из меди летучих металлов, таких как цинк и свинец, а также небольшого количества мышьяка и кадмия, а указанные металлы содержатся в отходящих газах и частично в пыли.

Комплексы плавки первичного сырья обычно достаточно герметичны, что позволяет минимизировать неорганизованные выбросы пыли. Для этого проводится качественное техническое обслуживание печей и отводящих каналов, а улавливаемые газы до передачи на сернокислотную установку обрабатываются системами пылеудаления.

В табице 5 представлены процентное соотношение металлов, содержащихся в пыли, образующейся на разных стадиях технологического процесса производства меди, и соответствующие диапазоны этих величин по данным измерений.

Таблица 5. Основные составляющие пыли, образующейся при реализации технологических процессов производства меди, %

Компонент	Пыль с электрофильтров печи при плавке концентрата на штейн	Пыль шахтной печи	Пыль конвертера	Пыль с электрофильтров конвертера штейна	Пыль электрической печи очистки шлака	Пыль анодной печи
Pb	0,1–5	5–50	5–30	2–25	2–15	2–20
Zn	0,1–10	20–60	25–70	5–70	25–60	5–40
Sn	0,1–1	0,2–5,0	1–20	0,1–4,0	–	–
Cu	5–30	2–12	2–15	10–25	0,5–2,5	15–25
As	0,1–4	–	–	–	–	0,5–10
Ni	0,1–1	0,1–1,0	–	0,1–1,0	–	–

Стадии производства меди обычно реализуются при высоких температурах, а также с применением кислорода. Это сокращает парциальное давление азота в пламени и снижает объемы образования оксидов азота при условии, что в очень горячих зонах азот присутствует в небольших количествах. Согласно полученным данным, стандартные уровни выбросов оксида азота при переработке вторичной меди составляют от 50 до 500 мг/нм^3 в зависимости от печи и типа технологической операции. Сравнительные данные по выбросам первичной и вторичной выплавки меди представлены в таблице 6 и на рисунке 11.

Таблица 6. Сравнительные данные по выбросам первичной и вторичной выплавки меди на тонну произведенного металла

Тип технологии	Пыль, г×10^{-2}	Диоксид серы, кг	Cu, г	Pb, г	As, г
Первичная Cu	800	18 000	130	45	27
Вторичная Cu	1000	3500	100	60	5

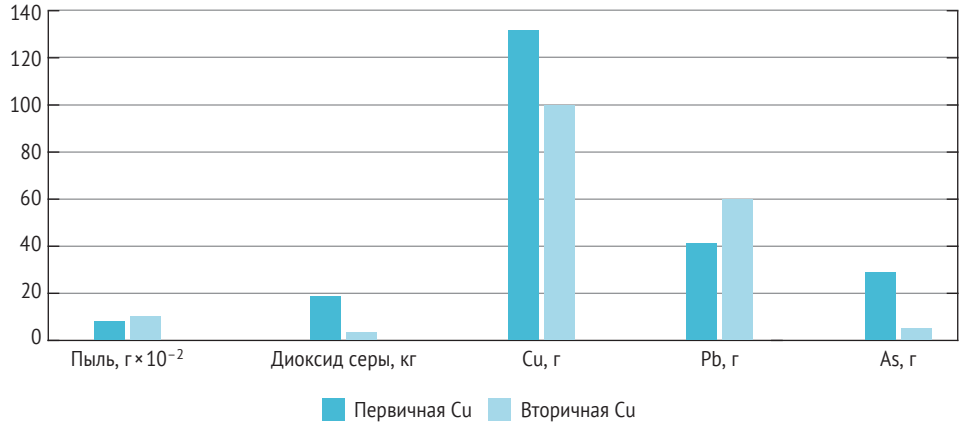


Рис. 11. Сравнительные данные по выбросам первичной и вторичной выплавки меди

Сравнение технологий с использованием эксергетического анализа

При изучении различных технологических процессов посредством составления и анализа их энергетических балансов появляется необходимость определения химической энергии и эксергии большого числа нетопливных материалов, являющихся сырьем, продуктами и отходами этих процессов (руды, концентраты, штейны, флюсы, кеки и другие материалы).

Большие значения химической энергии имеют органические соединения, а из неорганических — многие металлы и их сульфиды, которые часто являются компонентами перерабатываемого природного сырья. В технологической установке эта энергия высвобождается, и если организовать производство таким образом, чтобы использовать химическую энергию сырья с максимальной эффективностью, то можно в значительной степени сократить расход так называемых традиционных энергоресурсов и энергоносителей в виде топлива, электрической и тепловой энергии, а в некоторых случаях даже генерировать их попутно с целевыми продуктами.

В настоящее время в мире наибольшее распространение получили пирометаллургические способы производства меди — отражательная и шахтная плавки. В качестве примера рассмотрим материальный, энергетический и эксергетический балансы производства меди с отражательной плавкой.

При производстве конечной продукцией являются катодная и анодная медь, медный купорос и серная кислота, получаемая из отходящих газов конвертерного передела. Все перечисленные материалы могут быть выражены в единицах энергии, что позволяет составить энергобаланс производства (табл. 7).

Таблица 7. Материальный и полный энергетический балансы медного производства

Статья баланса	Масса, т	Энергия, ГДж		Эксергия, ГДж	
		I_x	I_q	E_x	E_q
Приход					
Руда сульфидная	41,5	16,704	0,0	14,976	0,0
Концентраты со стороны	1,79	7,452	0,0	6,264	0,0
Окатыши	0,41	1,602	0,0	1,35	0,0
Черновая медь со стороны	0,255	0,889	0,0	0,702	0,0
Известняк	0,49	0,000	0,0	0,000	0,0
Кварцевые и прочие руды	0,29	0,18	0,0	0,144	0,0
Уголь, т.у.т.	0,795	23,4	0,0	22,68	0,0
Мазут, т.у.т.	0,11	3,204	0,0	2,988	0,0
Электроэнергия	–	6,228	0,0	6,228	0,0
Тепловая энергия со стороны	–	0,504	0,0	0,072	0,0
Итого	45,64	60,163	0,0	55,404	0,0
ВСЕГО		60,163		55,404	
Расход					
Медь катодная	1,0	3,539	0,0	2,754	0,0
Аноды товарные	0,098	0,346	0,0	0,27	0,0
Медный купорос	0,028	0,014	0,0	0,007	0,0
Серная кислота (моногидрат)	0,76	0,446	0,0	0,302	0,0
Потери	43,754	15,008	40,81	11,808	40,262
Итого	45,64	19,353	–	15,142	40,262
ВСЕГО		60,163		55,404	

Источник: *Степанов В. С.* Термодинамические исследования металлургических процессов: энергетические балансы, эксергетический анализ. — Иркутск, 2013.

Полученные данные позволяют определить уровень энергоиспользования на рассматриваемом производстве, характеризуемый энергетическим и эксергетическим КПД, равными 7,2 и 6,0 % соответственно.

Для того чтобы оценить энергетическое совершенство технологического процесса, целесообразно произвести сравнение с идеализированным аналогом по энергетическому и эксергетическому КПД. Сопоставление реальных процессов с идеализированными аналогами означает, по существу, оценку степени совершенства (зрелости) исследуемого процесса на основе относительных КПД.

За идеализированный аналог медного производства принят процесс получения меди из чистого халькопирита. На рисунке 12 представлены диаграммы материального и энергетического балансов идеализированного производства меди[23].

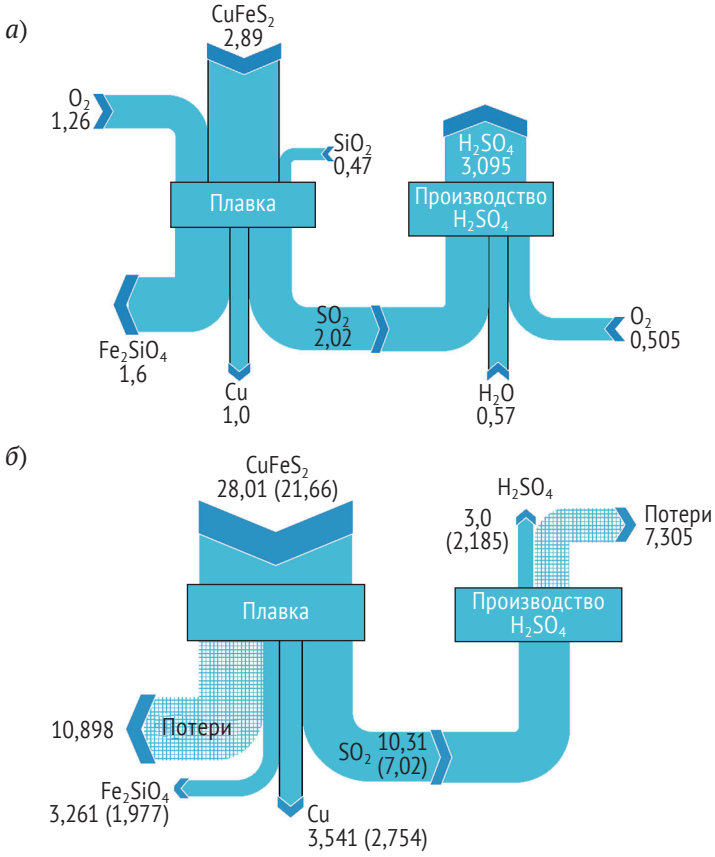


Рис. 12. Диаграмма балансов идеализированного производства меди:
а — материального, т; *б* — энергетического, ГДж
(в скобках показаны значения эксергии)

Энергетический и эксергетический КПД идеализированного производства при условии, что полезным продуктом является только медь, соответственно равны 12,6 и 12,7 %. Однако в реальных условиях имеется производство серной кислоты и его необходимо учесть в идеализированном аналоге. Энергетический и эксергетический КПД идеализированного аналога производства при условии

[23] *Степанов В. С.* Термодинамические исследования металлургических процессов: энергетические балансы, эксергетический анализ. — Иркутск, 2013.

получения меди и серной кислоты в качестве полезных продуктов соответственно равны 23,8 и 23,4 %.

Относительные КПД рассматриваемого технологического процесса тогда составят: $\eta_{эн}^{отн} = 30{,}2\,\%$ и $\eta_{экс}^{отн} = 25{,}6\,\%$.

До последнего времени при разработке новых технологий в металлургии вопросам рационального использования энергии не уделялось должного внимания. Вследствие этого многие технологии построены таким образом, что подавляющая часть химической энергии сырья практически бесполезно теряется на стадиях его предварительной переработки до поступления в основной процесс, где производится целевой продукт. Решить эту проблему можно в том случае, если уже на стадии разработки технологии учитывать вопросы рационального использования энергии, рассматривая их в качестве одного из главных критериев выбора. Примером такого подхода является развитие нового направления в цветной металлургии — разработка технологий производства цветных металлов на базе автогенных процессов, осуществляемых за счет химической энергии перерабатываемого сырья практически без расходования традиционных энергоресурсов. Среди этих технологий преобладают различные модификации взвешенной плавки. Это один из наиболее перспективных пирометаллургических процессов, который удовлетворяет целому ряду важных технико-экономических и экологических требований. Он обеспечивает:

– наиболее полную и эффективную утилизацию серы, что отвечает требованиям охраны окружающей среды и при этом позволяет получить такие полезные для экономики продукты, как серная кислота, жидкая двуокись серы, элементарная сера;
– интенсивность, приводящую к экономии капиталовложений и повышению производительности труда; возможность автоматизации управления его протеканием, а следовательно, снижение трудозатрат на производимую продукцию.

В настоящее время в мире разработано несколько разновидностей взвешенной плавки:

1) взвешенная плавка на подогретом воздушном дутье;
2) кислородно-взвешенная, или факельная, плавка;
3) плавка в расплаве («Аусмелт», плавка Ванюкова).

Плавка никелевого концентрата на штейн является основным пирометаллургическом процессом переработки сульфидного никелевого концентрата. Взвешенная плавка на подогретом дутье осуществляется в специальном агрегате, в реакционной шахте которого в факеле, образуемом при горении мелкоизмельченных и глубоко высушенных сульфидных материалов в струе предварительно нагретого до необходимой температуры воздуха, совмещаются процессы обжига и плавления перерабатываемого сырья. Важнейшим критерием технического уровня того или иного процесса и его экономической целесообразности становятся затраты энергии не только непосредственно на его реализацию, но и связанные с осуществлением всего комплекса процессов, объединенных с рассматриваемым в общую технологическую схему. Иначе говоря, делаются попытки сравнивать по энергозатратам не отдельные процессы,

а технологии производства заданной продукции с учетом расходов энергии на вспомогательные переделы, такие как переработка газов для извлечения полезных продуктов (серной кислоты, жидкого SO_2, элементарной серы) или их обезвреживание, производство технического кислорода, переработка шлаков и т. п. В печах взвешенной плавки (далее — ПВП) можно перерабатывать концентраты, обладающие достаточно высоким энергетическим потенциалом, который в полной мере характеризуется значениями их химической энергии и эксергии.

В таблице 8 приведены характеристики никелевых концентратов из руд нескольких месторождений. Анализ показывает, что в зависимости от химического состава и соотношения основных компонентов, определяющих энергетическую и технологическую ценность концентратов, удельные значения химической энергии и эксергии могут изменяться в широком диапазоне (для сравниваемых пяти концентратов — примерно в 2,5 раза).

Таблица 8. Зависимость удельной химической энергии и эксергии сырья от его состава

Концентрат	Содержание основных компонентов,%			Энергия	Эксергия
	Cu	Fe	S	МДЖ/т	
1	34,48	5,36	13,65	3913	3283
2	16,60	30,80	32,50	8280	7416
3	17,75	26,70	32,63	8618	6779
4	27,70	35,80	33,35	9778	7628
5	15,72	32,54	40,45	9799	8777

ОТХОДЫ И ВТОРИЧНЫЕ РЕСУРСЫ

Производство цветных металлов из первичного и вторичного сырья связано с возможностью образования широкого ассортимента побочных продуктов, промежуточных продуктов и отходов. Основная цель всегда должна состоять в минимизации образования отходов путем оптимизации процесса и максимальной переработки остаточных продуктов и отходов при условии отсутствия негативных межсредовых эффектов. Остаточные продукты образуются на разных этапах производственного процесса, как при выполнении металлургических операций и плавки металлов, так и при очистке отходящих газов и сточных вод. От состава и количественного содержания элементов в остаточном продукте зависит возможность его вторичной переработки; например, анодный шлам является ценным сырьем для извлечения драгоценных металлов. Такие возможности всегда необходимо учитывать, принимая решение о конечной утилизации остаточного продукта в составе отходов.

Согласно действующему законодательству, большинство таких остаточных продуктов относится к отходам. Однако в цветной металлургии в течение десятилетий разнообразные остаточные продукты используются в качестве сырья для других процессов, и существуют металлургические предприятия, деятельность которых направлена на повышение извлекаемости металлов и снижение количества отходов, направляемых на конечную утилизацию. Также хорошо известно, что металлургия демонстрирует один из самых высоких по сравнению с другими отраслями показателей вторичной переработки: большая часть перечисленных материалов повторно перерабатывается или повторно используется как в самой цветной металлургии, так и в других отраслях промышленности, например, при производстве цемента, абразивов и в строительстве. Это не связано с намерениями избавиться от них. Вторичное применение возникает в результате отделения металлов, что необходимо для их восстановления и производства чистых металлов из комплексных источников сырья. Такой подход позволяет минимизировать межсредовые эффекты. Тем не менее проблема остаточных продуктов, образующихся на производственных объектах, и поиск применения для таких продуктов будут играть важную роль и в будущем при выдаче соответствующих разрешений, поэтому поиск новых методов лежит прежде всего именно в этой области.

Таким образом, одно и то же вещество может считаться как отходом, так и вторичным сырьем в зависимости от особенностей его производства, транспортировки, а также использования или извлечения.

Описание образующихся отходов и вторичных ресурсов

Основными остаточными продуктами, образующимися при плавке цветных металлов, являются шлаки, окалина и съемы, удаляемые в ходе пирометаллургических процессов. Шлак образуется в результате реакции шлакообразующих сопутствующих элементов (например, железо) с добавляемыми флюсами. При температурах плавки шлак жидкий, его плотность отличается от плотности расплава металла, и его легко слить отдельно.

Большая часть шлака, образующегося на последующих этапах или при рафинировании цветных металлов, обычно может быть переработана вторично или использована для последующего извлечения металла. На рисунке 13 представлена схема процесса очистки медного шлака в электродуговой печи с целью внутренней вторичной переработки шлака. В данном примере расплавленный шлак с высоким содержанием меди из конвертера направляют на повторную плавку. После плавки шлак обезмеживают в электропечи для очистки. Печь работает в непрерывном режиме с практически непрерывным сливом шлака. В зависимости от оборудования полученный очищенный шлак подвергают грануляции для производства абразива или медленному охлаждению с последующим дроблением для производства заполнителя или строительных материалов.

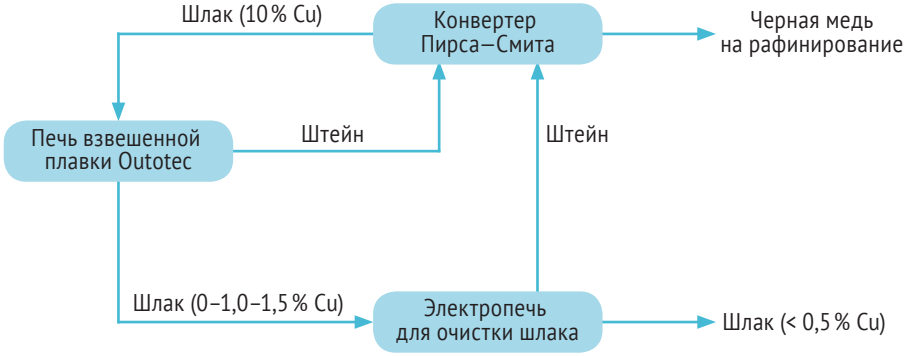


Рис. 13. Переработка медного шлака в электродуговой печи

Существует различие между шлаком с высоким содержанием металла, который возвращается на повторную переработку в данном процессе или направляется на другой процесс или на другое производство для извлечения металла, и отвальным шлаком с низким содержанием металла.

Некоторые предприятия цветной металлургии продают шлак для последующего выгодного использования. Применение шлака в качестве строительного материала вместо заполнителя возможно, только если извлекаемых соединений металлов мало. Шлак, который нельзя применять в качестве абразива или в гражданском строительстве, направляют на переработку или используют в качестве строительного материала для специальных случаев (например, строительство участков для утилизации), или направляют на утилизацию.

Дроссы и пенистый шлак образуются в результате окисления металлов на поверхности ванны или в результате реакции с огнеупорами футеровки печи. Содержание металла в пенистом шлаке/дроссе сравнительно высокое (20–80 %); эти материалы обычно возвращают на вторичную переработку в процесс или поставляют на другие металлургические заводы цветной металлургии для восстановления металла.

Еще один источник остатков — отработанная футеровка и огнеупоры. Они образуются при попадании огнеупорного материала из футеровки печи или при полной смене футеровки печи. Срок службы футеровки печи — от нескольких недель до нескольких лет в зависимости от процесса и материала (например, у футеровки печи взвешенной плавки Outotec, используемой для плавки первичной меди, срок службы составляет 6–10 лет). Величина отработанной футеровки печи может составлять до 5 кг/т произведенного металла в зависимости от расплава. В этом смысле переработка означает, что остатки возвращаются в процесс, в котором они образовались.

Одним из крупных источников образования твердых материалов также являются системы очистки. К этим материалам относятся колошниковая пыль и шламы, образующиеся в воздухоочистном оборудовании, а также другие твердые отходы, такие как использованный фильтрующий материал рукавных фильтров.

Пыль с участков хранения и подготовки или линий предварительной переработки сырья улавливается с помощью систем пылеочистки (обычно рукавных фильтров) и возвращается в основной процесс или передается на другой плавильный завод. В некоторых случаях перед отправкой на участки хранения и подготовки сырья пыль окатывают или брикетируют.

Отходящие газы металлургического и рафинировочного производства, содержащие пыль, можно очищать с помощью различных методов. Материал, собираемый в виде пыли при очистке отходящих газов, можно окатывать или брикетировать и направлять обратно на плавку или поставлять как сырье для извлечения металлов на другие заводы.

Шлам из скрубберов, содержащий металл, обычно обезвоживают, например в фильтр-прессе, и направляют на переплавку.

При сухой очистке отходящих газов материал фильтров периодически меняют. В фильтрующей ткани содержатся соединения металлов и частицы материалов из процесса. Известен целый ряд примеров использования фильтрующей ткани в пирометаллургическом процессе. Количество использованных фильтрующих рукавов может быть уменьшено путем применения более надежного современного фильтрующего материала. Рукавные фильтры относятся к технологиям очистки, которые не требует трудоемкого техобслуживания. При повреждении рукава соответствующий участок фильтра изолируют дефлекторами на время проведения ремонта. Полная замена фильтра происходит при 10–20 % неисправных секций фильтров.

Заменить материал в рукавных фильтрах современными надежными материалами не составляет труда, однако в каждом конкретном случае следует учитывать технические требования и соответствующие инвестиционные затраты. При замене или обновлении фильтрующей системы изменение нормативного срока эксплуатации и повышение работоспособности фильтрующих секций позволяет уменьшить их количество. Если это ведет к увеличению затрат на монтаж, то дополнительные расходы обычно компенсируются уменьшением количества рукавов фильтра.

Для производства вторичной меди в подавляющем большинстве случаев применяют пирометаллургические процессы. Этапы процесса зависят от содержания меди во вторичном сырье, гранулометрического состава и содержания других элементов. Как и для первичной меди, разработано несколько этапов для удаления этих примесей и возврата металлов из получаемых отходов. Вторичные материалы, идущие на переработку, как уже упоминалась, могут содержать органические материалы, такие как покрытие, или смазку, в связи с чем в технологический процесс вводят этапы обезжиривания и снятия покрытия либо применяют печи и системы газоочистки соответствующей конструкции. Цель — увеличить мощность для переработки возросшего объема газа, нейтрализовать летучие органические соединения и минимизировать образование ПХДД/Ф или разрушить их. Тип предварительной обработки или используемой печи определяется наличием органических веществ, типом загружаемых материалов, т. е. содержанием меди и других металлов и их состоянием (является ли материал окисленным или металлическим).

В таблице 9 приведена краткая характеристика некоторых широко применяемых видов вторичного сырья.

Таблица 9. Вторичное сырье для производства меди

Тип материала	Содержание меди, массовая доля, %	Источник
Смешанные медные шлаки	1–25	Гальванопокрытие
Электронный лом	15–20	Электронная промышленность
Медные однородные шлаки	2–40	Гальванопокрытие
Медно-железный материал (комковатый или раздробленный): арматура, статоры, роторы и т. д.	10–20	Электротехническая промышленность
Латунные дроссы, зола и шлаки, содержащие медь	10–40	Литейное производство, предприятия по выпуску полуфабрикатов
Измельченный медесодержащий материал	30–80	Предприятия по измельчению лома
Медно-латунные радиаторы	60–65	Автомобили
Смешанный красный латунный лом	70–85	Водомеры, зубчатые колеса, клапаны, краны, компоненты оборудования, подшипниковый узел, пропеллеры, фитинги
Легкий медный лом	88–92	Медные листы, карнизы, водосточные желоба, водяные котлы, нагреватели
Тяжелый медный лом	90–98	Листы, медная штамповка, рельсовые направляющие, провода, трубы
Смешанный медный лом	90–95	Легкий и тяжелый медный лом
Медные гранулы	90–98	Измельченный кабель
Чистый медный лом	99	Полуфабрикаты, проволока, обрезки, лента, кабельно-проводниковая продукция

Источник: Rentz O. Report on BAT in German Copper Production (Final Draft). — Karlsruhe, 1999.

Описание технологий переработки

Этапы производства меди из вторичного сырья в целом аналогичны этапам производства первичной меди, но в качестве сырья обычно используются окисленные или металлические материалы, что, соответственно, определяет иные производственные условия. Плавка вторичного сырья происходит

в нейтральных или восстановительных условиях. Плавку сырья низкого и среднего качества проводят в печах различного типа: шахтных, плавильных минипечах, поворотных конвертерах с верхней продувкой (TBRC), плавильных печах Ausmelt/ISASMELT, отражательных и наклонных печах. Для плавки лома высокого качества (> 99 % Cu) используются системы Contimelt. Тип печи и этапы производственного процесса зависят от содержания сырья, его размерных и других характеристик. Таким образом, плавка и рафинирование вторичной меди является комплексным процессом (рис. 14).

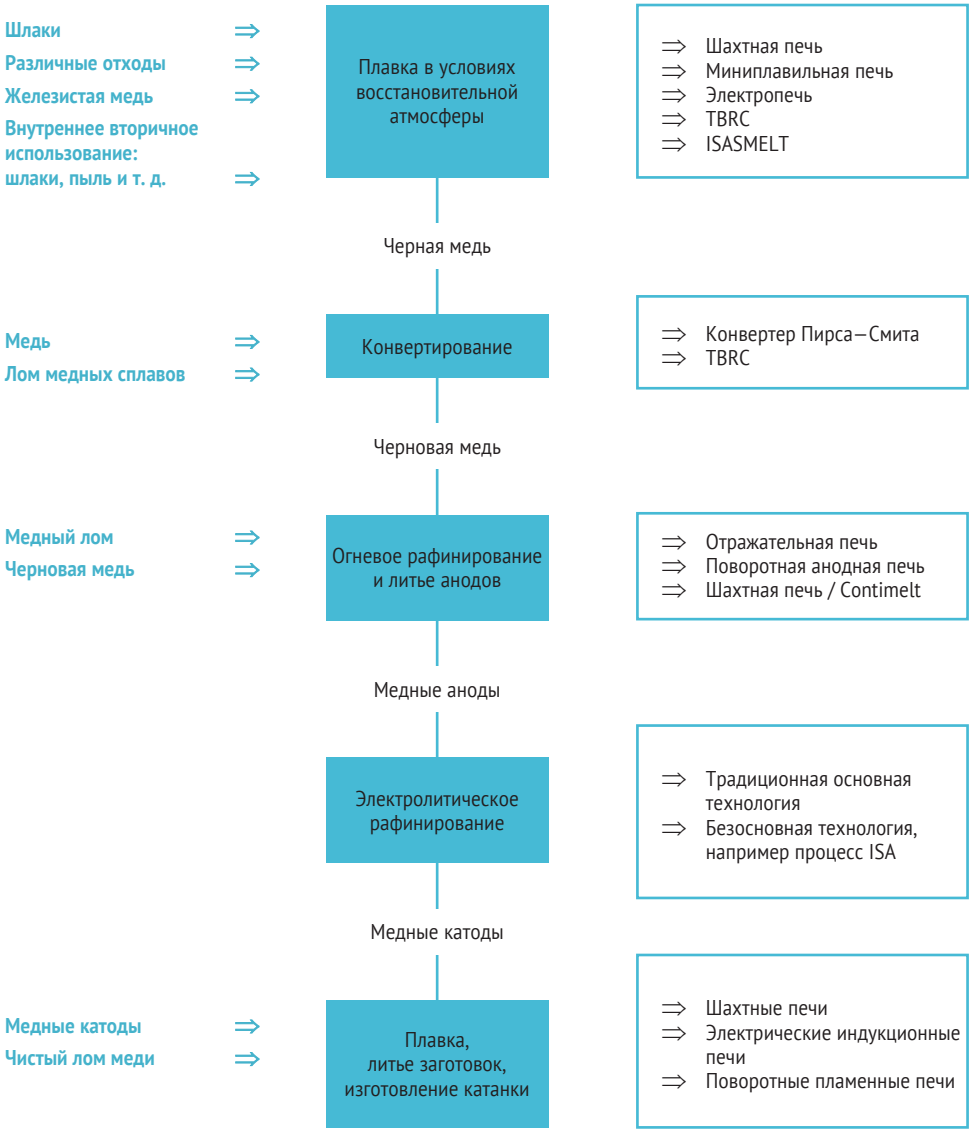


Рис. 14. Схема процесса производства вторичной меди

Основные направления использования вторичных ресурсов

Как уже было показано ранее, существуют различные варианты вторичной переработки и повторного использования остаточных продуктов, образующихся при производстве цветных металлов, которые применительно к производству меди кратко представлены в таблице 10.

Таблица 10. Различные варианты использования остаточных продуктов при производстве меди

Источник остаточных продуктов	Промежуточный или остаточный продукт	Варианты переработки или вторичного использования
Обращение сырья и т. п.	Пыли, сметы	Шихта для основных процессов
Плавильная печь	Шлак, пыли, сметы	Возврат на плавку, строительный материал, производство абразивов
Конвертер		Повторное использование в печи
Рафинировочные печи		
Переработка шлака	Очищенный шлак, пыли	Строительный материал, абразивы, заполнитель для дренажа, фильтр при производстве цемента
	Штейн	Извлечение металла
Анодная печь	Поверхностный шлак/дросс	Возврат в процесс после очистки
	Шлак	Извлечение металла
Электрорафинирование	Отработанный электролит	Извлечение металла или переработка/утилизация
	Отработанные аноды	Возврат в анодную печь
	Анодный шлам	Извлечение драгоценных металлов
Выщелачивание	Остаточные продукты	Утилизация
Сернокислотная установка	Катализатор	Восстановление, переработка или удаление
	Кислые шламы	Извлечение металла, утилизация
	Слабая кислота	Выщелачивание, разложение, нейтрализация, производство гипса
Футеровка печи	Огнеупоры	Использование в качестве шлакообразующего агента, утилизация, повторное использование в качестве огнеупора
Травление	Отработанная кислота	Восстановление
Системы сухой очистки (рукавные или электрические фильтры)	Отфильтрованная пыль	Возврат в процесс, извлечение прочих металлов
Системы мокрой очистки (скрубберы или электрические фильтры)	Фильтровальный шлам	Возврат в процесс или извлечение металлов, утилизация (например, ртути)
Шлам от очистки сточных вод	Гидроксидные или сульфидные шламы	Утилизация, вторичное использование

РОЛЬ ОТРАСЛИ В ГЛОБАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКЕ

Рынок делится на производителей первичной меди и сплавов на ее основе — сегмент upstream, производителей медной продукции — сегмент downstream, производителей меди из вторичного сырья (переработка меди).

Сегмент upstream — это не только производство первичной меди и десятка различных сплавов, но и вся сырьевая цепочка, которая предшествует этому процессу. Для производства меди требуется добыть руду, переработать ее в концентрат и доставить на медный завод. Крупнейшие мировые производители меди, как правило, представляют собой вертикально-интегрированные холдинги, включающие в себя рудники и плавильные заводы. Преимуществом вертикальной интеграции для крупных компаний является то, что они становятся независимыми от колебаний цен и многих других внешних факторов, обеспечивая себя сырьем в необходимом объеме для непрерывного процесса производства меди. Но есть и крупные производители меди, например, в Германии и Японии, которые закупают сырье у внешних поставщиков.

Наибольшие запасы медных руд в мире сосредоточены в разных поясах Земли, поэтому основные объемы добычи обеспечивают страны Азии, Латинской Америки и Африки, а также Австралия. Как правило, в этих регионах расположено и производство медных концентратов, что позволяет экспортировать более сложный продукт с добавленной стоимостью.

Производство меди в мире из года в год увеличивается вслед за непрерывно растущим спросом на этот металл. В среднем мировая потребность в меди увеличивается на 5–7 % ежегодно.

Мировая экономика в 2020 г. столкнулась с пандемией коронавируса, однако мировое потребление медных катодов снизилось всего на 1 %. Это было обеспечено прежде всего увеличением потребления в КНР на 4 %, которая быстро перезапустила свою экономику после двух месяцев строгих карантинных мер в начале года, что способствовало росту спроса на медь во втором полугодии. Потребление за пределами КНР в отчетный период уменьшилось на 7 %.

В 2020 г. рынок рафинированной меди находился в состоянии, близком к сбалансированному. Величина профицита составила менее 2 % объема рынка, или 544 тыс. т. Общие биржевые запасы в этом году снизились на 13 %, до 265 тыс. т (на конец 2019 г. — 304 тыс. т), что соответствует чуть более чем четырем дням мирового потребления. Снижение биржевых запасов происходило на фоне их релокации во внебиржевые запасы, преимущественно в Китай.

Потребление рафинированной меди по странам представлено на рисунке 15.

Высокая электропроводность, теплопроводность, пластичность и коррозионная устойчивость меди обуславливают значительный объем ее применения в различных областях промышленности. До трех четвертей

всей выпускаемой в мире рафинированной меди используется в производстве электропроводников, включая различные виды кабеля и провода. Основные отрасли потребления меди — строительство, производство электротехнической и электронной продукции, электроэнергетика, транспорт, машиностроение, производство различного оборудования и потребительских товаров.

Рис. 15. Потребление рафинированной меди по регионам в 2020 г., %

Главным мировым потребителем меди остается Китай, доля которого в 2020 г. составила 54 %. Несмотря на пандемию, Китай стал быстро восстанавливать свою экономику уже в первом квартале 2020 г. Импорт рафинированной меди в Китай в 2020 г. составил 4,5 млн т, что на 30 % больше, чем в 2019 г. Импорт лома меди сократился на 35 %, до 0,8 млн т, вследствие новых регуляторных требований КНР по ужесточению контроля качества ввозимого лома. Импорт медных концентратов снизился незначительно — на 1 %, до 5,4 млн т. Потребление рафинированной меди в Китае выросло на 4 %, до 12,5 млн т.

Спрос на медь в развитых странах в 2020 г. сокращался: в Европе потребление снизилось на 5,7 %, в Северной Америке — на 7,2 %, на Среднем Востоке — на 8,9 %, в Азии (за исключением Китая) было зафиксировано падение на 10 %. В Российской Федерации потребление меди увеличилось на 2 %.

Отраслевая структура потребления меди представлена на рисунке 16.

Производство рафинированной меди в мире в 2020 г. увеличилось на 2 %, или 0,4 млн т, по сравнению с 2019 г., составив 23,9 млн т. Наибольший рост выпуска продемонстрировал Китай, продолжающий расширять плавильные и рафинировочные мощности. Выпуск рафинированной меди в КНР в 2020 г. вырос на 1 %, до 9,16 млн т, а доля страны в мировом производстве достигла 38 %. Лишь около 20 % китайского производства обеспечивается собственной добычей, а остальное — за счет импорта медных концентратов и лома.

В других странах Азии производство рафинированной меди увеличилось на 1 % за счет роста в Японии и на Филиппинах, при снижении в других странах. В Северной Америке оно уменьшилось на 8 % (в основном за счет снижения в США), в Южной Америке выросло на 2 % (Чили и Перу), в Европе — увеличилось на 3 % (наибольший рост показали Германия, Финляндия, Болгария).

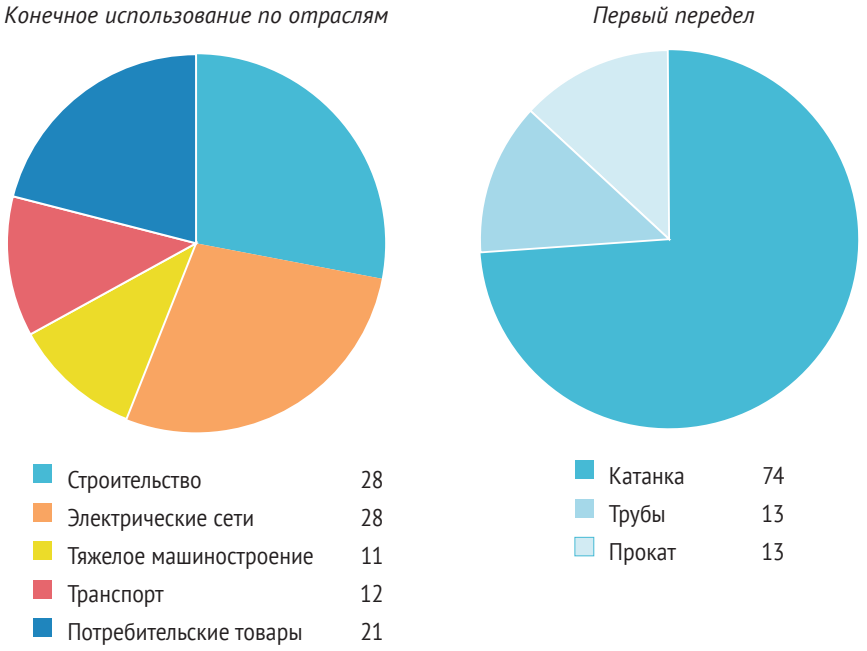


Рис. 16. Отраслевая структура потребления меди, %

Источник: данные компании Wood Mackenzie.

Мировая добыча меди в 2020 г. снизилась на 1,5 %, до 20,6 млн т. Снижение было связано преимущественно с пандемией коронавируса, а также с перебоями в работе рудников из-за забастовок в Чили и Перу.

Добыча в Чили, стране — ведущем мировом производителе меди, в 2020 г. снизилась на 1 %, до 5,8 млн т, по сравнению с предыдущим годом вследствие пандемии коронавируса и краткосрочных забастовок. В Перу производство снизилось на 13,5 %, до 2 млн т, также из-за пандемии.

В Африке добыча увеличилась на 6 %, до 2,59 млн т, преимущественно на рудниках в Демократической Республике Конго и в Замбии.

В 2020 г. Китай увеличил добычу на 4 %, до 1,8 млн т. В Индонезии добыча меди возросла на 26 %, до 0,5 млн т, из-за продолжающегося наращивания объемов подземных работ в районе Грасберг. Незначительно увеличили добычу Монголия и Мьянма.

В Северной Америке производство уменьшилось на 2 %, до 2,58 млн т: в США снижение составило 3 %, в Канаде снизилось на 4,5 %. В Мексике производство выросло на 1 %.

Динамика добычи меди в 2019 и 2020 гг. представлена на рисунке 17.

Рис. 17. Динамика добычи меди в 2019 и 2020 гг., тыс. т

ЗНАЧЕНИЕ МЕДИ В МИРОВОЙ ЭКОНОМИКЕ И ЭКОНОМИКЕ РОССИИ

Медь является одним из базовых металлов на Лондонской бирже металлов (ЛБМ). В связи с этим производство меди базируется на стандарте медных катодов класса А (содержание меди — 99,95 %), определенном терминологией ЛБМ. В европейском стандарте на медные катоды EN 1978[24] используется обозначение марки Cu-CATH1, или, в соответствии с новой европейской буквенно-цифровой системой обозначений, CR001A. В американском стандарте ASTM B115 используется обозначение Cathode Grade 1. С подробной информацией о химическом составе меди можно ознакомиться в документе Лондонской биржи металлов[25].

[24] EN 1978 Медь и медные сплавы. Медные катоды // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. — URL: https://docs.cntd.ru/document/461941150 (дата обращения: 12.01.2022).

[25] Special Contract Rules for Copper Grade A. — London, [w/o yr].

В Российской Федерации требования к медным катодам и марки катодной меди установлены в ГОСТ 546-2001 «Катоды медные. Технические условия» и ГОСТ 859-2014 «Медь. Марки» соответственно. Все отечественные марки катодной меди предусматривают чистоту металла не менее 99,95 %.

Переработку медного сырья можно производить как пирометаллургическим, так и гидрометаллургическим способом. В мире около 85 % меди производят пирометаллургическим способом. Процесс пирометаллургического производства меди состоит из нескольких переделов (рис. 18):

– добыча и обогащение руды — концентрат;
– производство черновой меди — черновая медь;
– производство рафинированной меди — анодная медь, катодная медь.

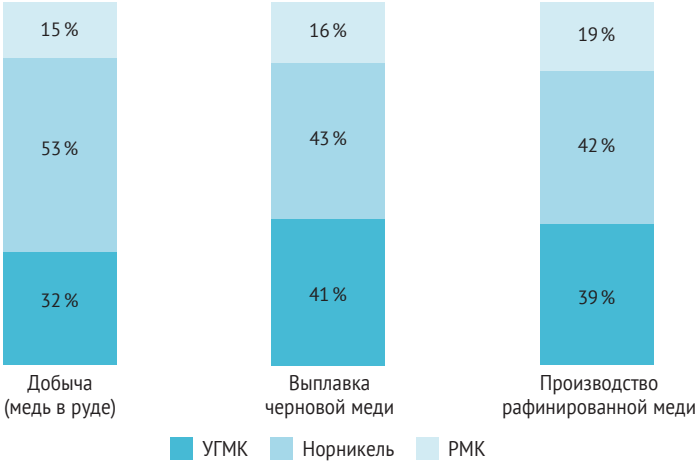


Рис. 18. Доли отдельных компаний в добыче и производстве меди в России

Производство меди в России за первый квартал 2021 г. снизилось на 10 %. Снижение вызвано уменьшением выпуска на предприятиях «Норильского никеля»: Заполярный филиал снизил выпуск на 24 %, Кольская ГМК — на 46 %. В качестве причин снижения компания указывает временную остановку рудников «Октябрьский» и «Таймырский», Норильской обогатительной фабрики и планового закрытия металлургического цеха на Кольской ГМК. По предварительной оценке, общее снижение выпуска меди «Норильским никелем» в 2021 г. составило 65 тыс. т.

Структура производства медных катодов в 2021 г. представлена на рисунке 19.

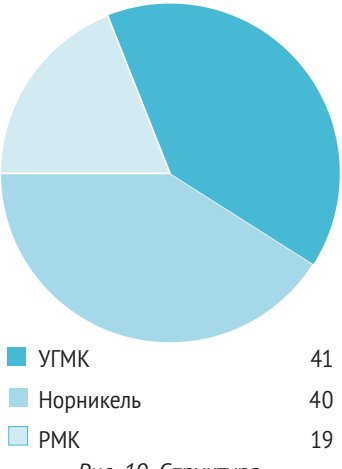


Рис. 19. Структура производства медных катодов в 2021 г., %

Видимое потребление меди снизилось на 28 % за счет снижения выпуска медной катанки. Основные предприятия-производители снизили выпуск на 24 %. Предположительно такое снижение связано с неблагоприятной внешней конъюнктурой рынка, на которую повлияли большие запасы китайской катанки, находящиеся на складах у производителей, а также низкий спрос на внутреннем рынке, потребление инвестиционных товаров на котором сокращается.

Рафинированная медь является основным сырьем для производства медных полуфабрикатов. В структуре экспорта полуфабрикатов основная часть приходится на экспорт медных катодов — 80 %, на медную катанку приходится 17 %, на прокат и порошки — 3 %. В 2021 г. экспорт катодов снизился на 8 %, до 134 тыс. т, катанки — остался без изменений, составив 29 тыс. т (рис. 20).

Рис. 20. Структура экспорта медных полуфабрикатов, %

ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ МЕДНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Одним из самых востребованных металлов в экологически чистом будущем, по мнению экспертов, может стать медь — ее называют «новым золотом».

Российская Федерация занимает пятое место в мире по производству рафинированной меди, объем выпуска которой в нашей стране по итогам 2020 г. составил 1 млн т в год.

Ключевыми производителями в этом направлении являются ПАО «ГМК Норильский никель», ОАО «УГМК» с рыночными долями по 40 % каждое и АО «РМК» с рыночной долей 20 %. Также компания «Металлоинвест» реализует проект строительства горно-обогатительного комбината и медеплавильного производства, осваивая Удоканское медное месторождение (которое, кстати, является крупнейшим в России и одним из крупнейших месторождений меди в мире). После запуска производства объем выпуска меди, производимой из концентратов Удоканского месторождения, должен составить порядка 135 тыс. т в год. Это, безусловно, будет способствовать удовлетворению

потребностей в катодной меди внутренних потребителей и укрепит позиции Российской Федерации в данной отрасли на внешних рынках.

Глобальный энергопереход и развитие зеленых технологий существенно меняют структуру потребления цветных металлов, создавая предпосылки для повышенного спроса в долгосрочной перспективе. Тренд зеленой энергетики и развитие высокотехнологичных направлений, таких, как электромобили, системы накопления энергии повышенной емкости, высокотехнологичная микроэлектроника, толкают рынок к увеличению потребления этих металлов.

Курс на «озеленение» технологических процессов производства конечной продукции будет только усиливаться.

Существуют разные прогнозы авторитетных мировых экспертов отрасли в отношении роста спроса на медь к 2030 г., к 2040 г. Очевидно, что при сохранении прогнозируемого спроса на медь в мире будет наблюдаться отрицательный баланс спроса и предложения, и рынок меди будет дефицитным.

Значительная часть меди, производимой в России, экспортируется. Реализация крупных инвестиционных горно-металлургических проектов позволит нашим компаниям и российскому бизнесу в целом укрепить позиции в нарастающей конкурентной борьбе на глобальных рынках в следующие десятилетия.

Стоит отметить, что особое внимание уделяется необходимости увеличения глубины переработки меди, применению современных экологичных технологий переработки с низкой степенью выбросов и созданию продукции с высокой добавленной стоимостью в виде чистового металла и продуктов высоких переделов.

Перспективы развития технологий медной промышленности

По экономическим соображениям горные предприятия преимущественно должны иметь большой объем добычи интенсивными механизированными методами. В мировой практике помимо традиционных открытых и подземных разработок можно обнаружить океанические рудники и использование тех или иных способов выщелачивания для извлечения меди из горных массивов. В настоящее время в мире производится три главных вида рафинированной меди: твердая медь, раскисленная медь и бескислородная медь.

Около 80 % меди производят из бедных сульфидных руд, которые обычно после флотационного обогащения перерабатывают пирометаллургическими методами. Около 15 % меди извлекают из окисленных и смешанных руд, в основном гидрометаллургическими способами. И только 5 % меди получают из богатых медных руд по традиционной схеме или плавкой в шахтной печи. Известны попытки в лабораторном и пилотном масштабах замены традиционного окислителя — кислорода — другими химическими элементами, прямого восстановления сульфидов углеродом, но они не достигли промышленной реализации, так же как не завершены испытания электролиза штейнов в водных и расплавленных средах.

Известны также многочисленные испытания в опытном масштабе прямой плавки медных концентратов на черновую медь. Многолетние работы Института «Гинцветмет» и Института металлургии УрО РАН завершились созданием промышленной технологии непрерывной плавки сульфидных медных концентратов на белый матт и черновую медь с использованием высокоосновных ферритно-кальциевых саморассыпающихся шлаков. И как показали зарубежные и российские исследователи, применение ферритно-кальциевых шлаков может быть эффективно при плавке медных концентратов, особенно на белый матт и черновую медь. Прямая плавка на черновую медь по-прежнему остается актуальной задачей на будущее, хотя многое зависит от исходного состава концентратов.

Развитие непрерывных процессов плавки и конвертирования, создание крупных единичных агрегатов, управление поведением примесей привели к необходимости поиска новых решений в огневом рафинировании меди. После получения черновой меди ее подвергают пирометаллургическому рафинированию и затем направляют на электролитическое рафинирование или перерабатывают в отдельном цикле в виде анодов, выплавленных из первичной или смеси первичной и вторичной анодной меди. Причем основные затраты ложатся на электролиз меди. Поэтому во многих странах ищут возможность снижения затрат путем исключения электролиза за счет коренного усовершенствования огневого рафинирования расплава черновой меди.

Проведенные работы в России по огневому рафинированию меди показали возможность получения меди марок, пригодных для изготовления радиаторной ленты, различных сплавов и для изготовления тянутых и прессованных медных прутков. Однако проблема получения меди марки для электротехнической промышленности и прецизионных сплавов не получила своего завершения. Уже многие годы (более 40 лет) идет непрерывное совершенствование электролитического рафинирования меди — повышение плотности и реверс тока, интенсивная фильтрация электролита, новые экстракционные и другие методы его очистки, автоматизированный реагентный контроль, новые полимерные ванны и т. д. Принципиальным достижением является создание электролитической ячейки с катодом из нержавеющей стали. Очевидно, что все это движение — в сторону повышения эффективности электролиза.

В последние 10–15 лет существенное развитие получил так называемый способ SX–EW (жидкостная экстракция — электроэкстракция). Суть его проста и понятна, а технология весьма эффективна для окисленных руд и продуктов. Последовательность операций следующая: выщелачивание медьсодержащего сырья с переводом меди в раствор, концентрирование меди в растворе с помощью жидкостной экстракции и электроэкстракция меди из раствора с нерастворимым анодом. Долгое время вне поля зрения этой технологии оставались сульфидные медьсодержащие продукты. Однако в последние годы делаются попытки применения SX–EW и для сульфидных продуктов.

Следует признать, что гидрометаллургия меди, безусловно, будет развиваться и с появлением новых эффективных и дешевых растворителей и экстрагентов постепенно будет вытеснять пирометаллургию, создавая условия для полной

механизации и автоматизации производства при замкнутых циклах с получением максимальных показателей по извлечению меди и экологических параметров. Однако в обозримом будущем, конечно, пирометаллургия не потеряет своего значения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Авилова Л. И.* Металлопроизводство древней Анатолии: специфика региона / Л. И. Авилова // Краткие сообщения института археологии РАН. — 2009. — Вып. 223. — С. 48–87.
2. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году» // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации : [официальный сайт]. — URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/gosudarstvennyy_doklad_o_sostyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/ (дата обращения: 13.01.2022).
3. Добыча и обогащение руд цветных металлов : Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям 23-2017 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. — URL: https://docs.cntd.ru/document/556173697 (дата обращения: 13.01.2022).
4. *Карабасов Ю. С.* Металлургия и время : энциклопедия : [в 6 т.] / Ю. С. Карабасов, П. И. Черноусов, Н. А. Коротченко, О. В. Голубев. — Т. 1. — Москва : Объединенная металлургическая компания ; Издательский Дом МИСиС, 2011.
5. *Кулбахтин Н. М.* Этапы модернизации медеплавильной промышленности Южного Урала / Н. М. Кулбахтин // Вестник Башкирского университета. — 2015. — Т. 20, № 4. — С. 1417–1425.
6. *Максимов М. М.* Очерк о первой меди / М. М. Максимов, М. Б. Горнунг. — Москва : Недра, 1976.
7. *Павлова О. И.* История техники электроосаждения металлов / О. И. Павлова. — Москва : Изд-во АН СССР, 1963.
8. Производство меди : Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям 3-2019 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. — URL: https://docs.cntd.ru/document/564068888 (дата обращения: 16.01.2022).
9. *Рузанова С. А.* Металлургия древнего Египта в раннем бронзовом веке / С. А. Рузанова // Краткие сообщения института археологии РАН. — 2009. — Вып. 223. — С. 88–100.
10. *Степанов В. С.* Термодинамические исследования металлургических процессов: энергетические балансы, эксергетический анализ : монография / В. С. Степанов, С. В. Степанов. — 2-е изд., доп. — Иркутск : Изд-во Иркутского государственного технического университета, 2013.
11. Техника в ее историческом развитии : От появления ручных орудий труда до становления техники машинно-фабричного производства / С. В. Шухардин, А. А. Кузин, Н. Н. Стоскова [и др.] ; отв. ред. С. В. Шухардин [и др.]. — Москва : Наука, 1979.
12. Уральская горно-металлургическая компания : [сайт]. — URL: https://ugmk.com/activity/primary_production/tsvetnaya-metallurgiya/ (дата обращения: 20.01.2022).
13. *Уткин Н. И.* Металлургия цветных металлов / Н. И. Уткин. — Москва : Металлургия, 1985.

14. Фабрично-заводская промышленность и торговля России. — Санкт-Петербург : Типография И. А. Ефрона, 1896.
15. Copper Alliance : [сайт]. — URL: https://copperalliance.org/ (дата обращения: 14.01.2022).
16. Copper Development Association Inc. : [сайт]. — URL: https://copper.org/ (дата обращения: 15.01.2022).
17. EN 1978 Медь и медные сплавы. Медные катоды // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. — URL: https://docs.cntd.ru/document/461941150 (дата обращения: 12.01.2022).
18. European Commission, DG XI, Technical BAT Note Heavy Metal Emissions from Non-Ferrous Industrial Plants, 1991.
19. OSPARCOM, Description of BAT for the Primary Production of Non-Ferrous Metals (Zinc, Copper, Lead and Nickel).
20. *Riekkola-Vanhanen M.* Finnish Expert Report on BAT in Copper Production and By-Production of Precious Metals / M. Riekkola-Vanhanen. — Finnish EPA, 1999.
21. *Rentz O.* Report on BAT in German Copper Production (Final Draft) / Rentz O. [et al.]. — Karlsruhe : University Karlsruhe (DFIU), 1999.
22. *Traulsen H.* Plant Information — Copper Industry (Draft) / H. Traulsen. — Copper Expert Group, 1998.
23. Special Contract Rules for Copper Grade A. — London : The London Metal Exchange, [w/o yr].
24. VDI 2102. Part 1 : Emission Control. Secondary copper smelting and refining plants. — 2007.
25. VDI 2102. Part 2 : Emission Control. Copper and copper alloy melting plants. — 2013.