

УДК 621.365.2:669.2/8

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2025-3-7-15>

Научная статья

Research article



Влияние кинетики высокотемпературного окисления меди на электротехнические свойства расплава

С.И. Холод^{1,3}, В.П. Жуков², С.В. Мамяченков³, В.В. Рогачев³

¹ Технический университет УГМК

Россия, 624091, Свердловская обл., г. Верхняя Пышма, Успенский пр-т, 3

² АО «Уралмеханобр»

Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. Хохрякова, 87

³ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

✉ Сергей Иванович Холод (hsi503@yandex.ru)

Аннотация: Кинетика высокотемпературного окисления меди различного химического состава кислородом газовой фазы протекает по параболическому закону окисления в температурном интервале 350–1050 °С. Для специалистов, занимающихся теорией и практикой огневого рафинирования, интересна кинетика высокотемпературного окисления меди в более широком температурном диапазоне 350–1160 °С, в пределах которого осуществляются окисление твердой меди и ее плавление, окисление жидкой меди кислородом воздуха, вводимого в расплав, растворимость в ней кислорода, процесс шлакообразования. Продолжительность высокотемпературного взаимодействия меди с кислородом оказывает большое влияние на технико-экономические показатели анодной плавки и электротехнические свойства меди. Поэтому исследование кинетики высокотемпературного окисления меди и влияния ее на электротехнические свойства металла имеет принципиальное значение для оптимальной организации огневого рафинирования. В температурном интервале 1100–1200 °С окисление меди осуществляется преимущественно за счет кислорода воздуха, вводимого в расплав. Образовавшийся оксид меди (I) перемещается из зоны непосредственного контакта с газообразным кислородом в глубину расплава с низкой концентрацией кислорода и диссоциирует на медь и кислород, что способствует повышению концентрации кислорода в расплаве. Переокисление меди и чрезмерное насыщение анодного металла газами приводят к переводу ее в шлак в виде оксидов, перерасходу материальных ресурсов и огнеупорных материалов и оказывают отрицательное влияние на электротехнические свойства металла. Для поиска оптимальных режимов окисления и оценки влияния кинетики окисления меди на электротехнические свойства расплава проведен сопоставимый анализ кинетических закономерностей окисления твердой и жидкой меди различного химического состава, полученной в одинаковых условиях эксперимента, методом дифференциально-термогравиметрического анализа (ДТА) и путем поверхностного обдува воздушной смесью медного расплава. Проведенные исследования показали, что образцы меди окисляются практически с одинаковой скоростью и наличие примесей не влияет на этот процесс. Весь кислород, предназначенный для образования оксида меди (I), растворяется в нем до предела термодинамического ограничения (до 12 % Cu₂O). Установлено, что наличие кислорода в расплаве больше 0,06 % отрицательно влияет на электротехнические свойства меди.

Ключевые слова: кинетика высокотемпературного окисления, черновая медь, анодная медь, огневое рафинирование меди, концентрация кислорода, электросопротивление расплава.

Для цитирования: Холод С.И., Жуков В.П., Мамяченков С.В., Рогачев В.В. Влияние кинетики высокотемпературного окисления меди на электротехнические свойства расплава. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2025;31(3):7–15.

<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2025-3-7-15>

Influence of high-temperature oxidation kinetics of copper on the electrical properties of the melt

S.I. Kholod^{1,3}, V.P. Zhukov², S.V. Mamyachenkov³, V.V. Rogachev³

¹ Technical University of UMMC

3 Uspenskiy Prosp., Sverdlovsk reg., Verkhnyaya Pyshma 624091, Russia

² JSC “Uralmekhanobr”

87 Khokhryakova Str., Ekaterinburg 620144, Russia

³ Ural Federal University n.a. the First President of Russia B.N. Yeltsin

19 Mira Str., Ekaterinburg 620002, Russia

✉ Sergey I. Kholod (hsi503@yandex.ru)

Abstract: The kinetics of high-temperature oxidation of copper of various chemical compositions by gaseous oxygen follows a parabolic rate law within the temperature range of 350–1050 °C. For specialists engaged in the theory and practice of fire refining, of particular interest is the kinetics of copper oxidation over a broader temperature interval of 350–1160 °C. Within this range, the processes include oxidation of solid copper and its melting, oxidation of liquid copper by oxygen introduced into the melt, oxygen solubility in copper, and slag formation. The duration of high-temperature interaction between copper and oxygen has a considerable effect on both the technical and economic indicators of anode smelting and the electrical properties of copper. Therefore, investigating the kinetics of high-temperature oxidation of copper and its influence on the electrical properties of the metal is essential for the optimal organization of fire refining. In the temperature range of 1100–1200 °C, copper oxidation occurs predominantly due to oxygen introduced into the melt with air. The copper(I) oxide formed migrates from the zone of direct contact with gaseous oxygen into the depth of the melt with lower oxygen concentration, where it dissociates into copper and oxygen, thus increasing oxygen concentration in the melt. Overoxidation of copper and excessive saturation of the anode metal with gases lead to its transfer into slag in the form of oxides, to excessive consumption of resources and refractory materials, and to a deterioration of the electrical properties of the metal. To identify optimal oxidation modes and to assess the influence of copper oxidation kinetics on the electrical properties of the melt, a comparative analysis was conducted of the kinetic patterns of oxidation of solid and liquid copper of various chemical compositions under identical experimental conditions, using differential thermogravimetric analysis (DTA) and by surface blowing of the copper melt with an air mixture. The results show that copper samples oxidize at nearly the same rate and that the presence of impurities does not affect the process. All oxygen intended for copper (I) oxide formation dissolves in copper up to the thermodynamic limit (up to 12 % Cu₂O). It was established that oxygen concentrations in the melt above 0.06% adversely affect the electrical properties of copper.

Keywords: kinetics of high-temperature oxidation, blister copper, anode copper, fire refining of copper, oxygen concentration, electrical resistivity of the melt.

For citation: Kholod S.I., Zhukov V.P., Mamyachenkov S.V., Rogachev V.V. Influence of high-temperature oxidation kinetics of copper on the electrical properties of the melt. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2025;31(3):7–15. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2025-3-7-15>

Введение

Кинетика высокотемпературного окисления меди кислородом газовой фазы являлась объектом теоретических и практических исследований ученых второй половины XX в. В работах отечественных и зарубежных авторов подробно рассмотрены механизмы окисления меди различного химического состава. Установлен параболический закон окисления в температурном интервале 350–1050 °C, который условно делится на 3 участка: низкотемпературный (350–550 °C), промежуточный (550–850 °C) и высокотемпературный (850–1050 °C) [1]. Для специалистов, занимающихся тео-

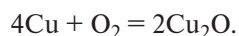
рией и практикой огневого рафинирования, интересна кинетика окисления меди в более широком температурном диапазоне 350–1170 °C, в пределах которого осуществляются окисление твердой меди (окислительная атмосфера печи с коэффициентом избытка окислителя $\alpha = 1,1\div 1,15$), ее плавление, окисление жидкой меди кислородом воздуха, вводимого в расплав, растворимость в ней кислорода, процесс шлакообразования.

Продолжительность высокотемпературного взаимодействия меди с кислородом оказывает большое влияние на технико-экономические показатели

анодной плавки и электротехнические свойства металла. Поэтому исследование кинетики этого процесса и влияния ее на электротехнические свойства меди имеет принципиальное значение для оптимальной организации огневого рафинирования.

В работах [1; 2] показано, что наличие примесей в меди оказывает разное влияние на скорость ее окисления. В низкотемпературном и промежуточном интервалах оно имеет место, тогда как в высокотемпературном диапазоне скорости окисления меди различной чистоты практически одинаковы [1]. В общем случае кинетические закономерности процесса зависят от формирования оксидной пленки на поверхности твердой меди, причем в высокотемпературном интервале (600–1050 °C) — в основном за счет роста фазы оксида меди (I), ограниченной определенным значением парциального давления кислорода (P_{O_2}).

При $t = 1100\div 1200$ °C окисление меди осуществляется преимущественно за счет кислорода воздуха, вводимого в расплав:



Образовавшийся Cu_2O перемещается из зоны непосредственного контакта с газообразным кислородом в глубину расплава с низкой концентрацией кислорода. Направление реакции меняется на противоположное, Cu_2O растворяется в расплаве меди, что способствует повышению концентрации O_2 в расплаве. В этом случае кинетические закономерности высокотемпературного окисления меди ограничены переводом меди в шлак при условии ее насыщения кислородом (1,4 %) до 12,4 % Cu_2O .

Переокисление меди и чрезмерное насыщение расплава кислородом, приводят к переводу ее в шлак в виде оксидов, что влечет за собой перерасход материальных ресурсов и огнеупорных материалов и оказывает отрицательное влияние на электротехнические свойства металла.

Целью настоящей работы являлось сопоставимый анализ кинетических закономерностей окисления твердой и жидкой меди различного химического состава, полученных в одинаковых условиях эксперимента, методом дифференциально-термогравиметрического анализа (ДТА) и путем поверхностного обдува воздушной смесью медного расплава, а также оценка степени растворимости кислорода в жидкой меди и его влияния на электротехнические свойства расплава, в частности при его концентрации $>0,08$ мас. %.

Методика исследований

Сопоставление кинетических закономерностей окисления меди проводили с помощью дифференциально-термогравиметрического анализа (ДТА) образцов различного химического состава в окислительной атмосфере на термоанализаторе марки NETZCH STA 449 F3 (Германия), сопряженном с Фурье-ИК-спектрометром Tensor 27 фирмы «Bruker» (США). Прибор фиксировал изменение массы навески (Δm_i) и выделение (поглощение) теплоты (ДСК) при непрерывном нагреве со скоростью 10 °C/мин до температуры 1150 °C.

В качестве объектов исследования использовали твердые образцы меди: 49,5 мг чистой (99,98 % Cu) и 48,47 мг черновой (98,7 % Cu). Их помещали в тигель с внутренним диаметром 6 мм и высотой 4 мм. В ходе опытов рабочее пространство поверхности тигля продували воздухом с расходом 250 мл/мин. В опыте с чистой медью изменение массы навески (Δm_i) относили к общей массе кислорода $m_{[O]}$ оксидов меди системы Cu—O. Для черновой меди за величину Δm_i принимали интегральное количество кислорода, образующегося в системе Cu—Mei—O.

С целью оценки степени растворимости кислорода и влияния ее на электротехнические свойства меди проводили поверхностное окисление образцов расплава черновой и чистой (анодной) меди воздушной смесью. Эксперимент осуществляли в лабораторных условиях с использованием следующего оборудования:

- электропечи с карбидокремневыми нагревателями и блоком управления и контроля температуры ≈ 1170 °C;

- тигля с порционной загрузкой стружки черновой и анодной меди с площадью поверхности расплава $S \approx 7539$ мм²;

- лабораторного компрессора производительностью 7 м³/ч и расходом дутья $\approx 1,75\div 2,45$ м³/ч.

В качестве объектов исследования было выбрано по 3 образца черновой и анодной меди с различным химическим составом массой ≈ 5000 г. Плавку всех образцов вели под слоем древесного угля. После расплавления меди с поверхности тигля удаляли шлак и проводили ее окисление путем обдува воздушной смесью в течение $\approx 12\div 18$ мин.

Степень растворимости кислорода оценивали путем периодического отбора проб (1 проба на 1 измерение) с последующим их анализом на приборе ELTRA CS-2000 (Германия) (углерод /сера),

анализаторе химического состава меди SPECTROLAB S (Германия) и анализаторе газов ELTRA ON-900 (Германия). Влияние кинетики окисления меди на ее электротехнические свойства исследовали путем измерения сопротивления расплава анодной меди [3].

Результаты и их обсуждение

Кривые ДТА, полученные за 120 мин при нагреве до $t = 1150^\circ\text{C}$ образцов чистой и черновой меди, для наглядности разместили на одной координатной плоскости (рис. 1). В поле диаграмм отдельно показаны численные значения величин Δm_i , τ и t_i в наиболее характерных точках [4].

Кинетические зависимости изменения массы навески от времени окисления в температурном интервале $300\text{--}1050^\circ\text{C}$ показывают их сложный временной закон, близкий к параболическому, что соответствует большинству проведенных исследований (рис. 1, кривая 2а — чистая медь, кривая 2б — черновая медь) [5].

Сложный механизм окисления объясняется термодинамически вероятными реакциями в системе медь—кислород: окисления меди до Cu_2O

атомарным и молекулярным кислородом и «рекомбинационного восстановления» CuO до Cu_2O .

При температуре $\sim 650^\circ\text{C}$ и выше объемная диффузия катионов меди в кристаллической решетке Cu_2O начинает преобладать над зернограничной диффузией, и в результате коагуляции увеличиваются размер зерен Cu_2O в оксидном слое и их массовая доля, которая обеспечивает полное окисление меди до Cu_2O [6–15]. Скорость диффузии кислорода возрастает, что и наблюдается в виде увеличения массы навески и подтверждает параболический временной закон (см. рис. 1).

Сопоставление масс Cu_2O , образовавшихся при окислении чистой и черновой меди, показывает их достаточное сходство (3,55 и 3,01 мг соответственно). Это свидетельствует о том, что исследуемые образцы окисляются практически с одинаковой скоростью, и наличие примесей практически не влияет на этот процесс.

По изменению массы навески было рассчитано необходимое количество кислорода для образования оксида меди (I) при окислении чистой и черновой меди и установлено, что для получения 3,55 мг Cu_2O в первом случае требуется 0,267 мл кислорода, а во втором — 0,234 мл, что состав-

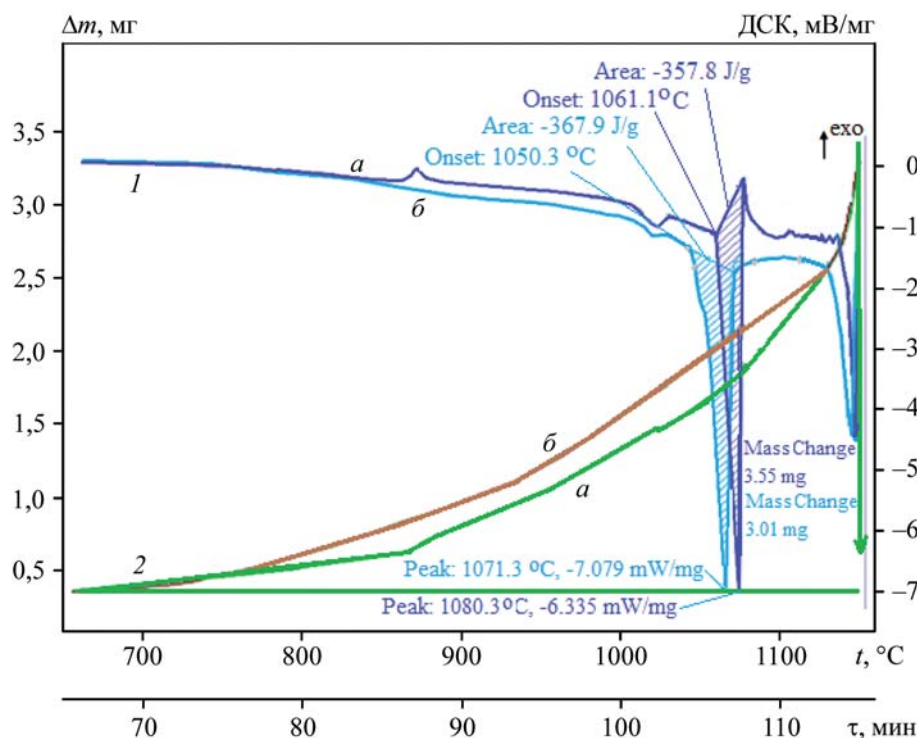


Рис. 1. Кривые ДТА окисления чистой (а) и черновой (б) меди

1 — ДСК, 2 — изменение массы навески, мг

Fig. 1. TG—DSC curves of copper oxidation: pure copper (a), blister copper (b)

1 — DSC signal, 2 — sample mass change, mg

ляет $0,00355$ ат. % ($8,8 \cdot 10^{-4}$ мас. %) и $0,00301$ ат. % ($7,5 \cdot 10^{-4}$ мас. %) соответственно.

Максимальная растворимость кислорода в меди (ат. %) при $t = 750 \div 1030$ °C определяется по формуле [11; 12]

$$\lg[\%O]_{\max} = -\frac{6600}{t} + 3,41.$$

При $t = 1030$ °C предельная концентрация кислорода в твердой меди составляет $0,02215$ ат. % ($0,0055$ мас. %). Данное обстоятельство свидетельствует о том, что при заданной температуре весь кислород, предназначенный для формирования оксида меди (I), растворяется в ней и на границе $\text{Cu}-\text{Cu}_2\text{O}$ сплошной оксидный слой на поверхности меди не образуется.

В процессе огневого рафинирования в температурном интервале $1100-1200$ °C окисление меди осуществляется преимущественно атомарным кислородом воздуха, вводимого в расплав [16]. Максимальная его растворимость в меди в заданном интервале определяется следующим образом:

$$\lg[\%O]_{\max} = -\frac{9260}{t} + 7,15.$$

При $t = 1170$ °C предельная концентрация кислорода в жидкой меди составляет $5,4$ ат. % ($1,41$ мас. %).

Для оценки степени растворимости кислорода и влияния ее на электротехнические свойства черновой меди использовали 3 образца со средневзвешенным химическим составом (табл. 1).

Кинетические кривые окисления черновой меди различного химического состава при $t = 1170$ °C представлены на рис. 2.

Анализ эмпирических зависимостей (рис. 2) показывает сложный закон окисления образцов черновой меди различного химического состава. На начальном этапе (до 6 мин) наблюдается отклонение от линейного закона окисления. Это объясняется тем, что основная часть кислорода

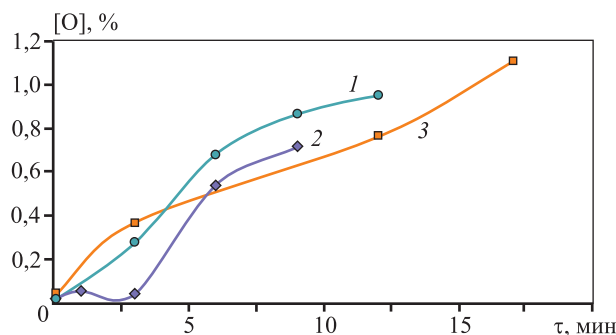


Рис. 2. Эмпирическая зависимость концентрации кислорода в расплаве меди от продолжительности окисления

1–3 – образцы черновой меди различного химического состава (см. табл. 1)

Fig. 2. Empirical dependence of oxygen concentration in copper melt on oxidation time

1–3 – blister copper samples of different chemical compositions (see Table 1)

задействуется для окисления примесей (Zn, Fe, Ni, S) и перевода их в шлаковую и газовую фазы. Особенно сильно от линейности отклоняется кривая 2 (см. рис. 2). После продувки в течение 3 мин концентрация кислорода уменьшается с $0,06$ до $0,047$ %, а затем начинает расти. Такая закономерность объясняется достаточно высоким содержанием серы в образце черновой меди ($0,23$ %) по сравнению с другими образцами ($0,019$ и $0,083$ %). Так как опыты проводились в изотермических условиях, то продувка в течение 1 мин позволила насытить расплав кислородом с $0,02$ до $0,06$ % и обеспечить окисление Zn и Fe, но этого времени не хватило для дегазации расплава меди до SO_2 , и сера в виде растворенных пузырьков газа SO_2 практически осталась в расплаве. Дальнейшая длительная продувка воздухом привела к удалению SO_2 из расплава меди. Одновременно снизилось содержание кислорода с $0,06$ до $0,047$ % [17–22].

После окисления примесей, удаления шлака и дальнейшего окисления расплава (с 6-й мин) наблюдается практически линейный закон окисле-

Таблица 1. Средневзвешенный состав образцов черновой меди

Table 1. Average chemical composition of blister copper samples

№ обр.	Содержание, %								
	Pb	Sn	As	Sb	Zn	Fe	Ni	O	S
1	0,03	0,001	0,048	0,076	0,0027	0,0017	0,115	0,28	0,083
2	0,041	0,001	0,045	0,077	0,0055	0,037	0,015	0,02	0,23
3	0,13	0,004	0,156	0,24	0,0039	0,0059	0,4	0,047	0,019

ния меди, при котором концентрация кислорода в расплаве в среднем растет со скоростью $\Delta[\text{O}] = 0,07 \text{ \%}/\text{мин}$. Это объясняется тем, что при заданной температуре весь кислород растворяется в меди, участвуя в образовании Cu_2O , и выступает в качестве активной примеси, приводящей к перекислению расплава.

Для оценки степени растворимости кислорода и влияния ее на электротехнические свойства анодной меди использовали 3 образца со средневзвешенным химическим составом (табл. 2). Кинетические кривые окисления анодной меди различного химического состава при $t = 1170 \text{ }^\circ\text{C}$ представлены на рис. 3. Анализ его данных показывает линейный рост концентрации кислорода в расплаве — в среднем со скоростью $\Delta[\text{O}] = 0,05 \text{ \%}/\text{мин}$. Это объясняется тем, что расплавленная анодная медь практически не содержит примесей, а ее структура состоит из непрерывно разрушающихся и создающихся субтаксисов, способствующих увеличению ее «свободного объема» до 6 % и изме-

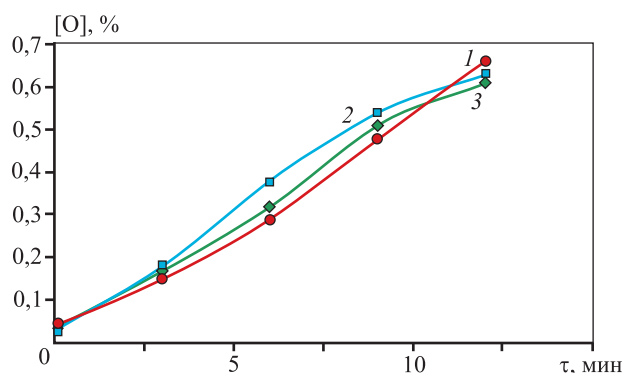


Рис. 3. Эмпирическая зависимость концентрации кислорода в расплаве меди от продолжительности окисления

1–3 – образцы анодной меди различного химического состава (см. табл. 2)

Fig. 3. Empirical dependence of oxygen concentration in copper melt on oxidation time

1–3 – anode copper samples of different chemical compositions (see Table 2)

нению межатомных расстояний на 1–2 %. Так как размер атома кислорода ($r_{\text{O}} = 48 \cdot 10^{-12} \text{ м}$) меньше, чем у меди ($r_{\text{Cu}} = 145 \cdot 10^{-12} \text{ м}$), то они, как правило, равномерно размещаются в междоузлиях, насыщая медь кислородом до его предельной концентрации.

Влияние кислорода на электротехнические свойства меди для твердого агрегатного состояния (бинарная система медь–кислород) достаточно подробно раскрыто в литературе. Экспериментально установлено, что зависимость удельного сопротивления меди от концентрации кислорода носит нелинейный характер [23]. Для получения формализованного описания этой зависимости ее оцифровали с помощью программы WebPlotDigitizer. Результаты показаны на рис. 4. Из графика следует, что незначительная концентрация кислорода (до 0,06 %) оказывает положительное влияние на электротехнические свойства меди, улучшая ее электропроводность [23]. Основная причина этого заключается в том, что кислород в меди может находиться не только в составе оксида меди (I), но и в ее твердом растворе и связан с вредными примесями в виде свободных металлов (например, никеля) путем перевода их в менее вредные оксиды [24–26].

Участок концентрации кислорода от 0,06 % и выше характеризуется линейным увеличением удельного сопротивления меди (рис. 4), и кислород выступает в качестве вредной примеси, ухудшающей ее электропроводность.

Влияние же кислорода на электропроводность жидкой меди различного химического состава изучено весьма ограниченно, а информация по данной тематике носит фрагментарный характер. Поэтому для оценки влияния кинетики окисления жидкой меди на ее электропроводность одновременно с отбором проб провели замеры электросопротивления образцов расплава анодной меди.

Эмпирические зависимости сопротивления расплава от степени растворения кислорода в

Таблица 2. Средневзвешенный состав образцов анодной меди

Table 2. Average chemical composition of anode copper samples

№ обр.	Содержание, %								
	Pb	Sn	As	Sb	Zn	Fe	Ni	O	S
1	0,081	0,0056	0,0055	0,099	0,0028	0,0016	0,09	0,018	0,0071
2	0,08	0,0056	0,0054	0,099	0,0049	0,0032	0,092	0,023	0,0086
3	0,081	0,0054	0,0054	0,099	0,0023	0,0015	0,088	0,024	0,0055

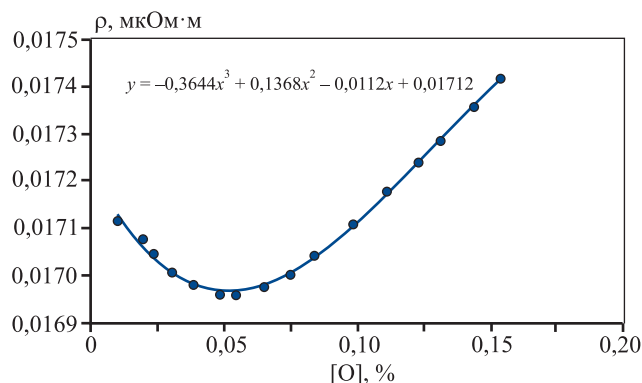


Рис. 4. Зависимость удельного сопротивления меди от содержания кислорода [23]

Fig. 4. Dependence of copper resistivity on oxygen concentration [23]

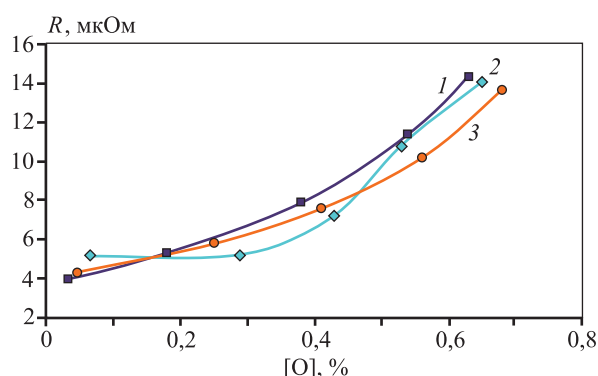


Рис. 5. Зависимость электросопротивления образцов (1–3) расплава меди различного химического состава (см. табл. 2) от содержания кислорода

Fig. 5. Dependence of the resistance of copper (1–3) melt samples of different chemical (see table 2) composition on the oxygen content

образцах анодной меди различного химического состава (рис. 5) сопоставимы с зависимостью удельного сопротивления меди от содержания кислорода в твердой меди на участке графика, где его больше 0,06 % (рис. 4). Анализ эмпирических кривых 1 и 3 (рис. 5) показывает идентичный рост сопротивления расплава от концентрации кислорода, который можно аппроксимировать экспоненциальной функцией. Данное обстоятельство свидетельствует о близких химических составах образцов анодной меди, содержащих минимальное количество примесей. Кривая 2 на рис. 5 показывает отсутствие роста сопротивления расплава при насыщении его кислородом на начальном участке от 0,066 до 0,3 %. Это свидетельствует о том, что данный образец анодной меди имеет завышенное содержание примесей. Весь растворя-

ющийся в меди кислород пошел на доокисление примесей (Pb, Zn, Fe, S), которые не были удалены в ходе анодной плавки, что и наблюдалось в процессе окисления расплава в виде образовавшегося шлака. После удаления шлака и дальнейшего растворения кислорода зафиксирован рост сопротивления расплава.

Заканчивая эти рассуждения, уместно поставить вопрос о практическом применении результатов исследований, которые показали кинетические закономерности окисления твердой и жидкой меди различного химического состава и влияние растворимости кислорода на электротехнические свойства расплава.

Учитывая основное условие огневого рафинирования в соответствии с диаграммой состояния Cu—Cu₂O, которое констатирует необходимость поддержания концентрации кислорода в меди выше, чем равновесная концентрация для реакций окисления примесей (0,4–0,8 % при температуре до 1170 °С), целесообразно анализировать кинетические закономерности растворения кислорода в жидкой меди на этапе окисления с целью оценки процесса перевода примесей в шлак и предотвращения ее переокисления. А влияние кинетики растворения кислорода на электропроводность жидкой меди уместно оценивать после максимального удаления примесей, тем самым обеспечивая расчет и контроль остаточной концентрации кислорода в расплаве меди путем измерения электросопротивления расплава [3].

Заключение

Методами ДТА и поверхностного обдува воздушной смесью медного расплава исследованы макрокинетические закономерности процесса окисления образцов чистой и черновой меди различного химического состава. Выявлено, что все они окисляются практически с одинаковой скоростью и наличие примесей не влияет на процесс окисления меди.

Весь кислород, предназначенный для образования оксида меди (I), растворяется в меди до предела термодинамического ограничения (до 12 % Cu₂O). Показано влияние растворимости кислорода в расплаве меди на его электротехнические свойства. Установлено, что повышение концентрации кислорода в расплаве больше 0,08 % отрицательно влияет на электротехнические свойства меди.

Список литературы/References

- Белоусов В.В., Климашин А.А. Высокотемпературное окисление меди. *Успехи химии*. 2013;3:3–6. Belousov V.V., Klimashin A.A. High-temperature oxidation of copper. *Uspekhi khimii*. 2013;3:3–6. (In Russ.).
- Белоусов А.А., Пастухов Е.А., Алешина С.Н. Влияние температуры, парциального давления кислорода на кинетику окисления жидкой меди. *Расплавы*. 2003;2:3–6. Belousov A.A., Pastukhov E.A., Aleshina S.N. Effect of temperature, partial pressure of oxygen on the kinetics of oxidation of liquid copper. *Rasplavy*. 2003;2:3–6. (In Russ.).
- Лисиенко В.Г., Холод С.И., Чесноков Ю.Н., Рогачев В.В., Киселев В.В. Устройство для производства анодной меди: Патент 2779418 (РФ). 2022.
- Жуков В.П., Холод С.И., Демин А.И., Меньшиков В.А. Исследование кинетики окисления меди методом дифференциально-термографического анализа. В сб.: *Современные тенденции в области теории и практики добычи и переработки минерального и техногенного сырья* (06–07 ноября 2024) г. Екатеринбург: АО «Уралмеханобр», 2024. С. 284–287.
- Ферапонтов Ю.А., Путин С.Б., Ферапонтова Л.Л., Путин П.Ю. Исследование кинетики топохимических процессов неизотермическом режиме дериватографическим методом. *Вестник ТГТУ*. 2009;15(14):826–834. Ferapontov Yu.A., Putin S.B., Ferapontova L.L., Putin P.Yu. Study of kinetics of topochemical processes in non-isothermal mode by derivatographic method. *Vestnik of TSTU*. 2009;15(14):826–834. (In Russ.).
- Иванич Л., Кочовски Б. Исследование кинетики переноса кислорода в меди. *Цветные металлы*. 1997;9:24–25. Ivanic L., Kochovski B. Study of oxygen transfer kinetics in copper. *Tsvetnye metally*. 1997;9:24–25. (In Russ.).
- Сафаров Д. Д. Кинетика окисления сплавов на основе меди газовой фазой переменного состава: Дис. канд. хим. наук. Свердловск: ИМЕТ УрО РАН, 1983.
- Martin T., Utigard T. The kinetics and mechanism of molten copper oxidation by top blowing of oxygen. *Journal of Metals*. 2005;2:58–62.
- Barton R.G., Brimacombe J.K.. Influence of surface tension-driven flow of the kinetics of oxygen absorption in molten copper. *Metallurgical Transactions A*. 1977;8 B:417–427.
- Лямкин С.А., Танутров И.Н., Свиридова М.Н. Кинетика окисления расплавленной меди кислородом газовой фазы. *Расплавы*. 2013; 2: 83 — 89.
- Lyamkin S.A., Tanutrov I.N., Sviridova M.N. Kinetics of oxidation of molten copper by gas phase oxygen. *Rasplavy*. 2013;2:83–89. (In Russ.).
- Gerlach J., Schneider N., Wuth W. Oxygen absorption during blowing of molten Cu. *Journal of Metals*. 1972;25(11):1246–1251.
- Аветисян А.А., Чатилян А.А., Харатян С.Л. Кинетические особенности начальных стадий высокотемпературного окисления меди. *Химический журнал Армении*. 2013;3:407–415. Avetissyan A.A., Chatilyan A.A., Kharatyan S.L. Kinetic features of the initial stages of high-temperature oxidation of copper. *Khimicheskii zhurnal Armenii*. 2013;3:407–415. (In Russ.).
- Ловшенко Г. Ф., Хина Б. Б. Макрокинетическая математическая модель внутреннего окисления сплавов на основе меди при отжиге механически легированных композиций системы Cu–Al–CuO. *Вестник Белорусско-Российского университета*. 2006;4(13):119–127. Lovshenko G. F., Khina B. B. Macrokinetic mathematical model of internal oxidation of copper-based alloys during annealing of mechanically alloyed compositions of the Cu–Al–CuO system. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo universiteta*. 2006;4(13):119–127.
- Warrczok A., Thorstein A. Reaction rate between carbon dioxide and graphite. *Steel Research International*. 2000;71(8):277–280.
- Фромм Е., Гебхардт Е. Газы и углерод в металлах. М.: Металлургия, 1980. 712 с.
- Брюквин В.А., Задиранов А.Н., Леонтьев В.Г., Цыбин О.И. Взаимодействие расплавов металлической меди с паровоздушными газовыми смесями применительно к задачам технологии их рафинирования от примесей. *Цветные металлы*. 2003;5:34–36. Bryukvin V.A., Zadiranov A.N., Leontyev V.G., Tsybin O.I. Interaction of metallic copper melts with steam-air gas mixtures as applied to the tasks of their refining technology from impurities. *Tsvetnye metally*. 2003;5:34–36. (In Russ.).
- Davenport W.G., King M., Schlesinger M., Biswas A.K. Extractive metallurgy of copper. Oxford: Elsevier Science Ltd., 2002;452.
- Biswas A.K., Davenport W.G. Extractive metallurgy of copper. Oxford: Pergamon, 1996. 441 p.
- Gerlach J., Herfort P. The rate of oxygen uptake by molten copper. *Journal of Metals*. 1968;22(11):1068–1090.
- Gerlach J., Schneider N., Wuth W. Oxygen absorption during blowing of molten Cu. *Journal of Metals*. 1972;25(11):1246–1251.
- Frohne O., Rottmann G. Wuth W. Processing speeds in the pyrometallurgical refining of Cu by the top-blowing process. *Journal of Metals*. 1973;27(11):1112–1117.

22. Вольхин А.И., Елисеев Е.И., Жуков В.П., Смирнов Б.Н. Анодная и катодная медь. Челябинск: Юж.-Ур. кн. изд-во, 2001. 431 с.
23. Аглицкий В.А. Рафинирование меди. М.: Металлургия, 1971. 184 с.
24. Coursol P., Valencia C.N., Mackey V.P., Bell S., Davis B. Minimization of copper losses in copper smelting slag during electric furnace treatment. *Journal of Metals*. 2012;64(11):1305–1313.
<https://doi.org/10.1007/s11837-012-0454-6>
25. Namil Um, Seon-Oh Park, Cheol-Woo Yoon, Tae-Wan Jeon. A pretreatment method for effective utilization of copper product manufacturing waste. *Environmental Chemical Engineering*. 2021;9(4):105–109.
26. Задиранов А.Н., Мещеряков А.В., Малькова М.Ю., Нурмагомедов Т.Н., Дегтярев С.В., Григорьевская И.И., Грушева Т.Г., Ерошенко В.О. Обеспечение эффективности рафинирования расплава медных ломов паровоздушной смесью на основе математического моделирования и экспериментальных исследований. *Металлург*. 2023;3:101–107.
Zadiranov A.N., Meshcheryakov A.V., Malkova M.Yu., Nurmagomedov T.N., Degtyarev S.V., Grigorievskaya I.I., Grusheva T.G., Eroshenko V.O. Ensuring the efficiency of refining copper scrap melt with a steam-air mixture based on mathematical modeling and experimental studies. *Metallurgist*. 2023;3:101–107.
https://doi.org/10.52351/00260827_2023_03_101

Информация об авторах

Сергей Иванович Холод — вед. инженер кафедры литейного производства и упрочняющих технологий, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ); зам. заведующего кафедрой металлургии, Технический университет УГМК.

E-mail: hsi503@yandex.ru

Владимир Петрович Жуков — д.т.н., профессор, вед. науч. сотрудник, АО «Уралмеханобр».

E-mail: zhukov_vp@umbr.ru

Сергей Владимирович Мамяченков — д.т.н., профессор, зав. кафедрой металлургии цветных металлов, УрФУ.

<https://orcid.org/0000-0002-4458-3792>

E-mail: s.v.mamiachenkov@urfu.ru

Владимир Васильевич Рогачев — к.т.н., доцент кафедры металлургии железа и сплавов, УрФУ.

E-mail: v.v.rogachev@urfu.ru

Information about the authors

Sergey I. Kholod — Leading Engineer, Department of foundry and hardening technologies, Ural Federal University n.a. the First President of Russia B.N. Eltsin (UrFU); Deputy Head of the Department of metallurgy, Technical University of UMMC.

E-mail: hsi503@yandex.ru

Vladimir P. Zhukov — Dr. Sci. (Eng.), Professor, Leading Researcher, JSC “Uralmekhanobr”

E-mail: zhukov_vp@umbr.ru

Sergey V. Mamyachenkov — Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of non-ferrous metallurgy, UrFU.

<https://orcid.org/0000-0002-4458-3792>

E-mail: s.v.mamiachenkov@urfu.ru

Vladimir V. Rogachev — Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of metallurgy of iron and alloys, UrFU.

E-mail: v.v.rogachev@urfu.ru

Вклад авторов

С.И. Холод — проведение исследований, написание статьи, участие в обсуждении результатов.

В.П. Жуков — определение цели работы, проведение исследований, участие в обсуждении результатов.

С.В. Мамяченков — написание статьи, участие в обсуждении результатов.

В.В. Рогачев — проведение исследований, участие в обсуждении результатов.

Contribution of the authors

S.I. Kholod — conducted investigations, wrote the manuscript, participated in the discussion of results.

V.P. Zhukov — defined the research objectives, conducted investigations, participated in the discussion of results.

S.V. Mamyachenkov — wrote the manuscript, participated in the discussion of results.

V.V. Rogachev — conducted investigations, participated in the discussion of results.

Статья поступила в редакцию 05.05.2025, доработана 19.05.2025, подписана в печать 23.05.2025

The article was submitted 05.05.2025, revised 19.05.2025, accepted for publication 23.05.2025