

УДК 669.3+902.01

к.г.н. Шубин Ю.П.

(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР, u0502823920@yandex.ru)

ПРОБЛЕМЫ РЕКОНСТРУКЦИИ МЕДЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА ЭПОХИ ПОЗДНЕЙ БРОНЗЫ (НА ПРИМЕРЕ КАРТАМЫШСКОГО АРХЕОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДОНБАССА)

Экспериментальное моделирование медеплавильного производства эпохи поздней бронзы на базе окисно-сульфидных руд Картамышского рудопроявления Бахмутской котловины Донбасса (15 экспериментальных плавов) позволило установить комплекс факторов, влияющих на его эффективность. На базе анализа этих факторов, а также археологических свидетельств древнего медеплавильного производства получены удачные плавки медных руд с восстановлением до 77% меди в слиток. Установленные параметры металлургического передела медных руд, а также детальные исследования продуктов древнего металлургического производства и экспериментальных плавов позволили предложить эффективные, наиболее вероятные технологии медеплавильного производства, применяемые на медных рудниках Донбасса эпохи поздней бронзы.

Ключевые слова: металлопроизводство, экспериментальное моделирование, металлургический передел, меднорудный концентрат, технология плавки, медь.

В настоящее время в связи с масштабными геоархеологическими исследованиями древних рудников в странах СНГ и мира актуальной проблемой является реконструкция древнего металлургического производства [1, 2]. Для эпохи бронзы речь идёт, прежде всего, о медных рудниках и медеплавильном производстве. Накоплен опыт в экспериментальном моделировании медеплавильного производства из медных руд разного минерального состава. Многие исследователи пытались подвести научную основу при анализе медеплавильного производства, но тем не менее эксперименты по плавке медных руд в большинстве случаев не давали на выходе удовлетворительного количества восстановленной меди. Последнее означает, что обычно не удаётся даже приблизиться хотя бы к одной из потенциально возможных эффективной технологии металлургического передела. Поэтому исследователи древнего металлопроизводства зачастую апеллируют к необходимости присутствия у исполнителей металлургических плавов большого опыта и навыков в области металлургии. В связи с этим возникла необходимость экспериментальным

путём варьирования технологических параметров и вещественного состава материала металлургической шихты добиться удовлетворительного выхода меди в слиток. Последнее должно быть согласовано с артефактами, относящимися к области металлургии, чтобы максимально приблизиться к реконструкции металлургического производства прошлого. Материалы удачных экспериментальных плавов подлежат детальному анализу с фиксацией всех технологических параметров металлургического передела и изучением вещественного состава материала шихты и продуктов передела.

Наблюдения за экспериментальными плавками медных руд, изучение результатов ранее проведённых плавов [3], выполненных в разные годы (2004 -2009 гг.) из медных руд Картамышского рудопроявления, а также изучение технологии переработки концентратов медных руд [4], позволили выделить следующие факторы, влияющие на процесс металлургического передела.

На этапе *подготовительных работ* существенное значение имеет конструкция и параметры печи. Необходимо также нали-

чие рудного концентрата (шихты) с определённым содержанием извлекаемого металла (меди), при этом важен его минеральный состав и степень измельчения. В результате предварительного обжига существенное значение имеет степень удаления серы из сульфидов меди. Температура плавки и консистенция расплава зависит от наличия естественного флюса в виде кварцевого песка – неотъемлемой части меднорудного концентрата месторождений формации медистых песчаников. Кроме того, должен быть подобран оптимальный объём меднорудного концентрата и древесного угля, загружаемого в печь, соответствующий применяемой технологии и мощности экспериментальной печи. Экспериментальная печь должна иметь определённую форму, размер, толщину стен, материал, из которого она изготовлена. Последние должны обеспечить накопление тепла, необходимого для протекания процесса плавления шихты и последующего медленного остывания расплава. Особые требования по жаропрочности предъявляются к плавильной чаше, обеспечивающей локализацию вещества и тепла в процессе металлургического передела и последующего остывания продуктов плавки. Технологически важным видится также характер укладки меднорудного концентрата и древесного угля в медеплавильной чаше и печи. Количество подаваемого в печь воздуха определяется количеством мехов и сопел, а также их параметров. Пропускная способность сопел определяется диаметром их выходного отверстия, в то же время меха должны иметь объём, достаточный для обеспечения определённой устойчивой скорости и расхода воздуха, подаваемого в печь. Чрезвычайно большое значение имеет жаропрочность материала, из которого изготовлены сопла, их ориентировка в плане и в вертикальной плоскости (угол наклона) относительно поверхности и центра загрузки меднорудного концентрата в плавильной чаше.

На этапе *металлургического передела* важным является количество и характер

распределения древесного угля, добавляемого в печь для достижения и поддержания в печи необходимых температур, а также восстановительных условий, путём генерации угарного газа, обеспечивающего восстановление меди и предохраняющего её от повторного окисления. В связи с этим существенным также является расход, скорость и локальность подачи воздуха, обеспечивающего нормальное протекание окислительных реакций. Последние необходимы для создания ранее оговоренных благоприятных условий протекания металлургического передела. Введение в расплав инородных тел-«дразнителей металла» способствует перемешиванию плавящейся массы, приводящему к объединению капель выплавленной черновой меди в единый слиток и его оседанию на дно плавильной чаши. В процессе перемешивания расплавленной массы открывается доступ газовым компонентам к рудному веществу. В итоге происходит улучшение условий, необходимых для протекания химических реакций и стратификации расплавных фаз в плавильной чаше. Важным фактором металлургического передела является оптимизация его процесса (увеличение коэффициента полезного действия печи). Это позволяет снизить расход древесного угля и воздуха до минимально необходимых количеств, обеспечивающих успешную плавку. Последнее достигается за счёт подбора оптимальных параметров загрузки печи, подачи воздуха, времени плавки и т. д. Длительность процесса плавления руды контролируется фиксацией достижения бело-жёлтого цвета пламени [5], жидкого состояния шлака в плавильной чаше и прекращением выделения пузырьков газа.

На этапе охлаждения существенное значение имеет скорость остывания расплава.

Многочисленные экспериментальные плавки (15 плавок), выполненные нами, подтвердили возможность эффективного металлургического передела сульфидных руд (выход меди в слиток на уровне 60-

70%), о чём свидетельствуют также включения расплавленных сульфидов в археометаллургических шлаках и археометаллах. В результате плавления руд получена чёткая стратификация вещества в медеплавильной чаше (сверху вниз): зелёный пористый силикатный шлак→бурый силикатный шлак→штейн, состоящий из окислов чёрных металлов→переплавленный халькозин→медь→свинец. Аналогичные продукты металлургического передела были обнаружены при раскопках объектов Картамышского археологического микрорайона и других древних рудников Бахмутской котловины (Клиновое, Медная Руда).

Безусловно, удачная экспериментальная плавка медных руд свидетельствует о потенциальной возможности эффективной их плавки. В то же время позитивный результат может быть итогом применения разных технологий или, по крайней мере, её особенностей [1]. Тем не менее продукты металлургического передела в удачных экспериментальных плавках дифференцировались достаточно чётко и поэтому являются объектами для детальных исследований вещественного состава. Важность последних подтверждается обнаружением аналогичных металлургических продуктов (шлаки, штейны, медь) в пределах производственных зон металлургического цикла древних медных рудников Бахмутской котловины Донбасса.

При экспериментальном моделировании древнего медеплавильного производства нами использовалась технология плавки руды в плавильных чашах, а также технология с послойной загрузкой древесного угля и рудного концентрата в печь поверх плиты песчаника. Последняя технология плавки не привела к получению хорошо сформированного крупного слитка меди, а получались мелкие (до 5 мм) включения меди каплевидной формы, рассеянные в массе недифференцированного вязкого шлака. Количество восстановленной меди составило при этом 43 %. Для извлечения всей меди потребовалось раздробить

весь образованный шлак. К тому же в процессе нагнетания воздуха через сопла происходило рассеивание (выдувания) части вещества рудного концентрата. Дробление мягкого и хрупкого халькозина предполагает формирование высокого процента переизмельчённой пылевой фракции, которая при подаче воздуха через сопла может легко выдуться из области плавки. В связи с этим целесообразно использование крутостенных, достаточно высоких (высотой около 10 см) плавильных чаш, предотвращающих вынос мелких рудных частиц за пределы области металлургического передела. Кроме того, применение плавильных чаш позволяет добиться высоких локальных температур в небольшом объёме рудного концентрата в течение непродолжительного времени, тем самым сокращая длительность плавки, что в свою очередь позволяет экономить древесный уголь. Последующее охлаждение печи, перекрытой сверху крышкой, предполагает слабый отвод тепла через донную часть плавильной чаши, подстилаемой озолённым древесным углём. С другой стороны, при необходимости плавильную чашу со слитком черновой меди можно было легко извлечь из печи через непродолжительный интервал времени с помощью специальных ухватов.

Археологические раскопки, проведённые в пределах Картамышского археологического микрорайона, подтвердили применение в древности технологии плавки медных руд в плавильных чашах. При изготовлении медеплавильной печи в качестве образца были взяты древние медеплавильные печи, обнаруженные в пределах участков ЧО1 и ЧО3 Картамышского рудника [3]. В результате была изготовлена экспериментальная печь формы усечённого конуса с выпуклыми стенками, приближающими форму печи к полусферической. При этом диаметр топки в нижней части составил 30 см, диаметр верхнего отверстия (устья) составил 20 см, высота печи – 35 см при толщине стен 10-12 см. Также было сделано углубление в почву на 10 см.

Нагнетание воздуха осуществлялось через два керамических сопла, «смотрящих» с противоположных сторон в центр плавильной чаши под углом 45° к горизонту. Для этого использовались два пылесоса модели «Ракета». Для восстановления меди использовался древесный уголь, изготовленный из дуба. Халькозиновый концентрат общей навеской в 300 г был предварительно измельчён до размера 1-3 мм с использованием древних технологий (дробление и истирание фрагментов сульфидной руды кварцитовым пестом в ступке из медистого песчаника). При этом в рудный концентрат примешалось около 100 г материала использованной ступки (в основном) и песта, который играл в металлургическом процессе роль флюса. Примешанный материал был представлен зёрнами кварц-полевошпатового состава на карбонатно-железистом цементе. Затем подготовленный меднорудный концентрат был подвержен предварительному обжигу на костре до исчезновения характерного запаха серы (в течение 20 мин.). При этом цвет рудных зёрен изменился от тёмно-серого до красного в результате формирования на поверхности зёрен окисной плёнки куприта (Cu_2O). Последнее обстоятельство обеспечивает возможность восстановления металлической меди в результате протекания химических реакций между халькозином и купритом, а также между купритом и угарным газом.

На дно печи помещался горящий древесный уголь слоем в 5 см. Затем в центре печи устанавливалась плавильная чаша, вырезанная из донной части старого молочного горшка, толщина стен 3 мм. На дно чаши засыпался 3 см слой горящих древесных углей, поверх которых было засыпано 300 г меднорудного концентрата. Свободное пространство печи засыпалось древесным углём (2,5 кг). Края сопел устанавливались на верхней части плавильной чаши. Время плавки составило 34 мин. В результате в донной части чаши образовался слиток меди весом 45 г. По данным

рентгеноспектрального анализа (спектрометр ARL 9900, аналитики Нестеренко, Центральная лаборатория АМК, г. Алчевск) содержание меди в обожжённом меднорудном концентрате составило 19,5 %. Следовательно, при этом восстановилось 77 % меди. Над слитком меди расположен слой переплавленного халькозина мощностью 3 мм, выше которого фиксировалась плитка штейна толщиной 5 мм. В последней обнаружены капли меди размером 1-2 мм. Выше располагался стекловидный бурый шлак толщиной 20 мм, над которым – зеленоватый тонкопористый шлак толщиной 10 мм.

Эксперимент показал, что на дно плавильной чаши не следует укладывать древесный уголь, поскольку в продуктах металлургического производства отмечено значительное количество переплавленного сульфида – халькозина. Как показали многочисленные экспериментальные плавки, плавильные чаши не удаётся использовать повторно в силу приваривания металлургических шлаков к стенкам плавильной чаши. Последнее означает, что плавильные чаши были одноразовыми. Отмечено повышенное содержание мышьяка (до 0,0n %) в археологических продуктах металлургической деятельности по сравнению с таковыми экспериментальной плавки. Это может быть обусловлено как геологическими (повышенная мышьяковистость исходных руд), так и технологическими (принудительное введение мышьяка или его соединений в рудный концентрат или расплав; более низкие температуры плавления; меньшее время металлургического передела) факторами. Примечательно также перераспределение химических элементов по продуктам экспериментальной плавки. Для исследований продуктов экспериментальной плавки применялся рентгеноспектральный анализ (спектрометры ARL8410-131 и ARL9900) и энергодисперсионный рентгеновский анализ (для изучения химического состава черновой меди и переплавленного халькозина). В

слитках черновой меди нами отмечена концентрация свинца, серы, ванадия, рублидия, хлора, серебра, иридия, иттербия, олова, мышьяка и сурьмы. В переплавленном халькозине концентрировался свинец, серебро, иттербий и галлий. В штейне накапливалось железо, марганец, хром, цирконий, ванадий и рубидий. Бурый шлак концентрировал в себе кальций, марганец, фосфор, цирконий, стронций, олово, никель и сурьму. В зелёном пористом шлаке концентрировался кремний, алюминий, магний, калий, натрий, сера, титан, галлий, ниобий, кобальт, никель, цинк и литий. Вероятно, характер перераспределения химических элементов по продуктам металлургического передела во многом зависит от длительности процесса и достигаемой при этом температуры.

Отмеченные ранее для подобной технологии металлургического передела окислительные условия в радиусе 15 см от сопла требуют присутствия восстановителя в зоне плавки. В связи с этим наличие некоторого количества сульфидов в шихте благоприятно влияет на протекание металлур-

гического передела, тем более в связи с возможностью протекания химических реакций между компонентами обожжённого рудного концентрата (купритом и халькозином).

Таким образом, результаты выполненных экспериментальных плавов медных руд позволили выделить факторы, отвечающие за эффективность металлургического передела. Анализ последних, а также вещественных свидетельств древнего металлургического производства позволил выполнить удачные экспериментальные плавки сульфидных медных руд. Морфология и вещественный состав продуктов древнего металлургического производства оказались близки таковым экспериментальных плавов [6]. В связи с этим есть основания полагать, что установленные параметры удачных экспериментальных металлургических плавов наиболее вероятно моделируют технологии медеплавильного производства, которые применялись на древних медных рудниках Бахмутской котловины Донбасса в эпоху поздней бронзы.

Библиографический список

1. Григорьев С.А. Металлургическое производство в Северной Евразии в эпоху бронзы / С.А. Григорьев. — Челябинск : Цицеро, 2013. — 660 с.
2. Черных Е.Н. Каргалы / Е.Н. Черных, Е.Ю. Лебедева, И.В. Журбин, Х.А. Лопес-Саец, П. Лопес-Гарсия, М.И.Н. Мартинес-Наваррете. В 5 т.; т. 3. — М. : Языки славянской культуры, 2004. — 320 с.
3. Бровендер Ю.М. Эксперименты по выплавке меди из руд Картамышского рудопроявления в Донбассе / Ю.М. Бровендер, Ю.П. Шубин // Археология восточноевропейской лесостепи. — Воронеж : ВГУ, 2009. — С. 114–123.
4. Обогащение и переработка полезных ископаемых : учебн. пособие / В.Б. Кусков, М.В. Никитин // Санкт-Петербургский горный ин-т (технический университет). — СПб, 2002. — 84 с.
5. Ровира С. Технология выплавки меди в эпоху поздней бронзы в Каргалах (Оренбург, Россия). Экспериментальные плавки в Горном / С. Ровира // Проблеми гірничої археології: Матеріали II-го міжнародного Картамиського польового археологічного семінару. — Алчевськ, 2005. — С. 203–206.
6. Бровендер Ю.М. К вопросу о закономерностях перераспределения химических элементов в процессе металлургического передела медных руд в эпоху бронзы / Ю.М. Бровендер, Ю.П. Шубин // Проблеми гірничої археології: Матеріали VII-го міжнародного Картамиського польового археологічного семінару. — Алчевськ, 2009. — С. 90–96.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф. Дон ГТУ Новохатским А.М.,
д.г.-м.н. Института минералогии УрО РАН Зайковым В.В.*

Статья поступила в редакцию 21.04.16.

к.г.н. Шубін Ю.П. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

ПРОБЛЕМИ РЕКОНСТРУКЦІЇ МІДЕПЛАВИЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА ДОБИ ПІЗНЬОЇ БРОНЗИ (НА ПРИКЛАДІ КАРТАМИСЬКОГО АРХЕОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ДОНБАСУ)

Експериментальне моделювання мідеплавильного виробництва доби пізньої бронзи на базі окисно-сульфідних руд Картамиського рудопрояву Бахмутської улоговини Донбасу (15 експериментальних плавок) дозволило визначити комплекс факторів, які впливають на його ефективність. На базі аналізу цих факторів, а також археологічних свідчень давнього мідеплавильного виробництва отримані вдалі плавки мідних руд з відновленням до 77% міді у зливки. Встановлені параметри металургійного переділу мідних руд, а також детальні дослідження продуктів давнього металургійного виробництва і експериментальних плавок дозволили запропонувати ефективні, найбільш вірогідні технології мідеплавильного виробництва, які застосовувались на мідних копальнях Донбасу доби пізньої бронзи.

Ключові слова: *металовиробництво, експериментальне моделювання, металургійний переділ, міднорудний концентрат, технологія плавки, мідь.*

PhD in Geology Schubin Yu.P. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

PROBLEMS IN RECONSTRUCTION OF COOPER-MELTING PRODUCTION OF THE LATE BRONZE AGE (ARCHEOLOGICAL DONBASS COMPLEX KARTAMYSH)

In the paper the number of factors influencing cooper-melting production efficiency was determined due to experimental simulation of copper-melting production of the Late Bronze Age using oxide and sulfide ore from Kartamysh ore occurrence of the Donbass Bakhmut basin (15 experimental meltings). On the basis of the factors analysis as well archeological evidence of ancient copper-melting production the well-done copper ore melting with ore reduction up to 77% were obtained into an ingot. The determined parameters of metallurgical copper ore treatment were obtained as well as the detailed investigations of ancient metallurgical production and experimental melts enabled us to propose efficient and most likely the methods of ancient copper-melting production which were probably used in the Late Bronze Age on ancient Donbass copper mines.

Key words: *metal production, experimental simulation, metallurgical treatment, copper and ore concentrate, melting technique, copper.*