

## ЧАСТЬ 5. АРХЕОМЕТАЛЛУРГИЯ И МЕТАЛЛООБРАБОТКА

**Ю.П. Шубин**  
**Y.P. Shubin**

*Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск,  
u0502823920@yandex.ru*

### **Результаты исследования медеплавильного производства Картамышского археологического комплекса Донбасса**

### **The results study of copper smelting of the Kartamysh archaeological complex in Donbass**

Экспериментальные плавки медных руд Картамышского рудопоявления Бахмутской котловины Донбасса позволили установить причины, влияющие на их результативность. В результате анализа опыта экспериментальных плавок и собранного археологического материала, относящегося к металлургическому производству, выполнены эффективные медеплавильные плавки с формированием слитка черновой меди (выход меди в слиток составил до 80 %). Отработанные параметры металлургического процесса, детальное изучение продуктов древних и экспериментальных плавок, позволили воссоздать наиболее вероятную технологию плавки меди из сульфидных медных руд на медных рудниках Донбасса в эпоху поздней бронзы. Отмеченные закономерности перераспределения химических элементов по продуктам медеплавильного производства могут быть использованы для их увязки с источниками рудного сырья.

The experimental copper ore smelting of Kartamysh ore manifestation of the Bakhmut basin in Donbass provided to examine the reasons that affect on their effectiveness. Effective copper smelting was carried out with the formation of a black copper ingot (copper yield to the ingot was up to 80 %) as a result of the experimental smelting analysis and collected archaeological material related to metallurgical production. The established parameters of the metallurgical process and a detailed study of ancient and experimental smelts products made it possible to recreate the most likely technology for melting copper from sulfide copper ores at the copper mines in Donbass in the era of late bronze. The observed patterns of chemical elements redistribution by copper smelting products can be used to link them with crude ore sources.

Одной из важнейших составляющих древнего металлопроизводства является недостаточно изученный вопрос технологии плавки медных руд [Григорьев, 2013; Черных, 2004]. Опыт экспериментального моделирования медеплавильного производства отечественных и зарубежных исследователей обычно не позволял приблизиться к потенциально-возможным эффективным технологиям металлургического передела прошлого. Для достижения этого необходимо добиться удовлетворительного выхода меди в слиток, а продукты плавок (металл, штейн, шлак, расплавные сульфиды) должны быть сопоставимы с таковыми древних металлургических плавок (морфология, зональность, стратификация, химический и фазовый состав).

Многолетние экспериментальные плавки концентратов медных руд Картамышского рудопоявления восточной оконечности Бахмутской котловины Донбасса [Бровендер, Шубин, 2009; Кусков, Никитин, 2002] позволили отработать оптимальную технологию металлургического передела, а также установить факторы, влияющие на его процесс.

На подготовительном этапе работ важны конструкция и параметры печи, определённый уровень содержания извлекаемого металла (меди) в рудном концентрате (шихте), его минеральный состав и степень измельчения. При использовании предварительного обжига важна степень удаления серы из сульфидов меди. Температура плавки и консистенция расплава зависят от наличия естественного флюса в виде кварцевого песка – неотъемлемой части меднорудного концентрата месторождений формации медистых песчаников. Большинство примесей (As, Sb, Sn и т.д.) понижают температуру плавления сплава (бронза с 20 % As имеет точку плавления почти на 400 °С ниже точки плавления чистой меди), а восстановление металлов из оксидов на угле также может идти и при температурах ниже точки плавления меди. Последнее свидетельствует о том, что комплексный химический состав рудного концентрата может существенно снизить температуру металлургического передела. Немаловажным также является подбор оптимального объёма меднорудного концентрата и древесного угля, загружаемых в печь, соответствующий применяемой технологии и мощности экспериментальной печи. Сама печь должна иметь определённую систему воздухоподвода, форму, размеры, 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 важен принцип укладки меднорудного концентрата и древесного угля в медеплавильной чаше и печи. Количество подаваемого в печь воздуха определяется количеством и параметрами мехов и сопел. Пропускная способность последних определяется диаметром их выходного отверстия, тогда как меха должны иметь объём, достаточный для обеспечения определённой устойчивой скорости и расхода воздуха, подаваемого в печь. Сопла должны быть изготовлены из жаропрочного материала, важна их ориентировка в плане и в вертикальной плоскости относительно поверхности и центра загрузки меднорудного концентрата в плавильной чаше.

На этапе металлургического передела важным является количество и характер распределения древесного угля, служащего для достижения и поддержания в печи необходимой температуры, создания 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, генерирующих угарный газ, необходимый для создания благоприятных условий 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. Кроме того, в процессе перемешивания расплавленной массы, улучшается доступ газовых компонентов к рудному веществу. В итоге улучшаются условия, необходимые для протекания химических реакций и стратификации расплавных фаз в плавильной чаше. Важной также является оптимизация металлургического процесса (увеличение коэффициента полезного действия печи), что позволяет снизить расход древесного угля и воздуха до минимально необходимых величин, обеспечивающих успешную плавку. Для этого подбираются оптимальные параметры загрузки печи рудным концентратом и древесным углём, подачи воздуха, времени плавки и т.д. Необходимое время плавления руды контролируется достижением бело-жёлтого цвета пламени [Ровира, 2005], жидкого состояния шлака в плавильной чаше и прекращения выделения пузырьков газа.

На этапе охлаждения важна скорость остывания расплава. Пятнадцать экспериментальных плавок, выполненных нами, позволили добиться эффективного металлургического передела сульфидных руд (до 80 % выход меди в слиток в пересчёте от общего количества меди загруженного меднорудного концентрата). Об использовании в древности сульфидного сырья свидетельствуют включения расплавных включений сульфидов (халькозина, ковеллина) в археометаллургических шлаках и археометаллах. В результате удачных экспериментальных плавок произошла чёткая стратификация вещества в медеплавильной чаше (сверху вниз, рис.): зелёный пористый лёгкий силикатный шлак → бурый сливной средней тяжести силикатный шлак → чёрный, тёмно-серый, тяжёлый сливной плиткообразный штейн, состоящий из окислов чёрных металлов → переплавленный халькозин → черновая медь → синец, возможно с примесью серебра (зеркальная поверхность нижней части слитка черновой меди). Подобные археологические свидетельства медеплавильного производства обнаружены в пределах древних рудников Бахмутской котловины – Картамышское, Клиновое и Медная Руда.

Удавшиеся экспериментальные плавки медных руд говорят о потенциальной возможности эффективной их плавки. Результативная плавка может быть итогом применения разных технологий, или разных её особенностей. На фоне возможных технологических различий продукты удачных экспериментальных плавок чётко дифференцировались, являясь важным источником материала для детальных исследований вещественного состава и последующих реконструкций. Важность таких исследований подтверждается обнаружением аналогичных продуктов металлургии (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 позволила получить слиток меди, её продуктом явились рассеянные в массе недифференцированного вязкого шлака вкрапления меди (до 5 мм), для извлечения которых потребовалось раздробить весь шлак. Восстановление меди в металл при этом составило 43 % (доля от общего содержания меди загрузочной шихты). В процессе нагнетания воздуха через сопла по технологии плавки руды поверх песчаника выдувалась часть рудного концентрата за пределы области плавки. Последнее требует применения крутостенных, высотой до 10 см, плавильных чаш, предохраняющих рудный материал от выноса за пределы области плавки. Локализация процесса плавки в пределах плавильных чаш позволяет достичь сравнительно быстро высоких температур в небольшом объёме загруженного рудного концентрата, сокращая длительность процесса плавки и экономя древесный уголь. Последующее охлаждение печи, перекрытой сверху крышкой, может происходить длительное время. В то же время, при необходимости чашу со слитком черновой меди можно было извлечь из печи специальными ухватами.

Археологические раскопки, проведённые в пределах Картамышского археологического микрорайона, подтвердили применение в древности технологии плавки медных руд в плавильных чашах. Ошлакованная керамика и развалы древних металлургических печей, обнаруженных в пределах участков ЧО1 и ЧО3 Картамышского рудника [Бровендер, Шубин, 2009], послужили образцом при изготовлении экспериментальной медеплавильной печи. Экспериментальная печь имела форму усечённого конуса с выпуклыми стенками, приближающими её к полусферической. Диаметр топки в нижней части составил 30 см, диаметр верхнего отверстия (устья) – 20 см, высота печи – 35 см при толщине стен 10–12 см. Кроме того, было сделано углубление в почву на 10 см. Нагнетание воздуха происходило при помощи двух пылесосов «Ракета» через керамические сопла, ориентированные

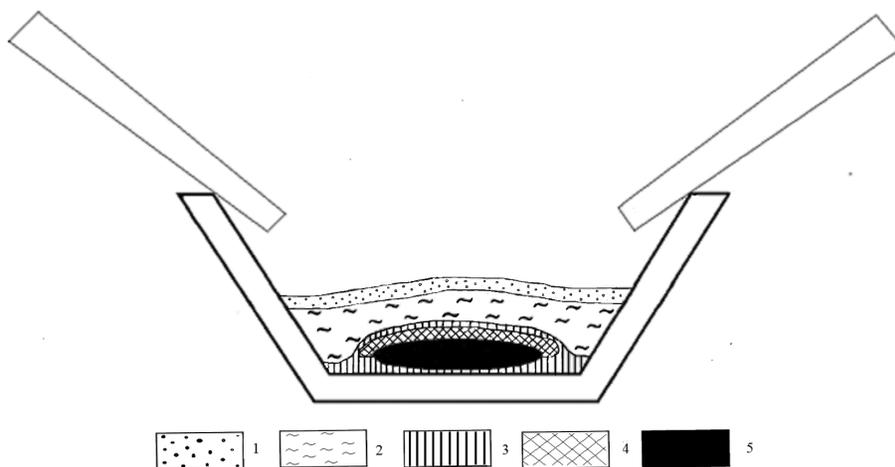


Рис. Распределение продуктов металлургического передела в плавильной чаше:

1 – зелёный пористый шлак; 2 – бурый массивный шлак; 3 – штейн; 4 – халькозин; 5 – медь.

с диаметрально противоположных сторон и направленных в центр плавильной чаши под углом  $45^\circ$  к горизонту. В качестве восстановителя меди использовался древесный уголь, полученный из дуба. Для металлургического передела была подготовлена навеска в 300 г халькозинового концентрата, в последующем измельчённая до фракции 1–3 мм с использованием древних технологий (пестом из кварцитовидного песчаника в ступке из медистого песчаника). В процессе такого измельчения в рудный концентрат примешивалось до 100 г материала использованной ступки (в основном) и песта, игравшего в металлургическом процессе роль флюса. Последний представлен зёрнами кварца, полевого шпата и карбонатно-железистым материалом цемента. Затем подготовленный меднорудный концентрат в течении 20 мин был предварительно обожжён на костре до исчезновения запаха серы и смены тёмно-серого цвета рудных зёрен на красный вследствие образования окисной плёнки куприта. Металлическая медь из обожжённого рудного концентрата может быть получена в результате химических реакций между халькозином и купритом, а также между купритом и угарным газом. В донной части печи помещались горящий древесный уголь слоем в 5 см, поверх которого в центре печи устанавливалась плавильная чаша, вырезанная из донной части старого молочного горшка, с толщиной стен 3 мм. На дно чаши помещались горящие древесные угли слоем в 3 см, поверх которого было засыпано 300 г меднорудного концентрата. Свободное пространство печи засыпалось древесным углём в количестве 2.5 кг. Выходные концы сопел располагались на верхней кромке плавильной чаши. В результате плавки подготовленного концентрата в течении 34 мин., в донной части плавильной чаши образовался слиток меди весом 45 г. По данным полуколичественного рентгеноспектрального анализа (спектрометр ARL-9990, аналитики И.И. Нестеренко и Т.Н. Войткова, Центральная заводская лаборатория Алчевского металлургического комбината), содержание меди в обожжённом меднорудном концентрате составило 19.5 %, следовательно, восстановилось 77 % меди от общего содержания меди меднорудного концентрата, загруженного в печь. Над слитком меди расположен слой переплавленного халькозина мощностью 3 мм, по краям до 5 мм, выше которого образовалась плитка штейна толщиной 5 мм с каплями меди размером 1–2 мм. Основной остаток не восстановившейся в слиток меди перешёл в переплавленный халькозин, чего можно было избежать при лучшем качестве предварительного окислительного обжига. Увеличение длительности плавки видится менее эффективным

для восстановления оставшейся меди в слиток из-за ограниченности доступа угарного газа к осевшему на дно медеплавильной чаши расплавленному сульфиду меди. Над штейном располагался стекловидный бурый шлак толщиной 20 мм, над последним – зеленоватый тонкопористый шлак толщиной 10 мм.

К стенкам плавильных чаш крепко приваривался металлургический шлак, что не позволяло извлечь из них выплавленный слиток меди, не разрушив плавильную чашу. Последнее означает, что плавильные чаши были одноразовыми. Отмеченное повышенное содержание As (до 0.0n %) в археологических материалах металлургии по сравнению с таковыми экспериментальной плавки может быть обусловлено его искусственным добавлением в рудоплавильную массу, либо более низкими температурами плавления и меньшей длительностью металлургического передела. Для исследований продуктов экспериментальной плавки применялся полуколичественный рентгеноспектральный анализ на приборе лаборатории, указанной ранее. На основании полученных данных по химическому составу исходного рудного концентрата отмечено перераспределение элементов по продуктам металлургического производства. В слитках черновой меди сконцентрировались (%) Pb (2.450), Rb (0.011), Cl (0.097), Ag (0.067), Ir (0.021) и As (0.019). В переплавленном халькозине сконцентрировались (%) Pb (0.555) и Ag (0.020). В штейне накапливались (%) Fe (27.2), Mn (0.71), Cr (0.031), Zr (0.016), V (0.027) и Pb (5.79). Бурый шлак концентрировал в себе (%) Ca (5.58), Mn (1.09), P (0.213), Zr (0.019), Sr (0.018) и Pb (3.59). В зелёном пористом шлаке концентрировались (%) Si (27.2), Al (10.81), K (3.17), Na (0.37), и Ti (0.46).

Таким образом, результаты выполненных экспериментальных плавков медных руд позволили установить факторы, отвечающие за эффективность металлургического передела. Анализ последних, а также вещественных свидетельств древнего металлургического производства позволил добиться удачных экспериментальных плавков сульфидных медных руд. В целом, морфология и вещественный состав продуктов древнего металлургического производства оказались близки таковым экспериментальных плавков [Бровендер, Шубин, 2009]. Последнее позволяет полагать, что установленные параметры удачных экспериментальных металлургических плавков удовлетворительно моделируют древнюю технологию выплавки меди в плавильных чашах, которая применялась на древних медных рудниках Бахмутской котловины Донбасса в эпоху поздней бронзы. Отмеченные закономерности перераспределения химических элементов по продуктам металлургического передела могут быть использованы для привязки продуктов древнего металлопроизводства к сырьевой базе.

## Литература

*Бровендер Ю.М., Шубин Ю.П.* К вопросу о закономерностях перераспределения химических элементов в процессе металлургического передела медных руд в эпоху бронзы // Проблеми гірничої археології: Матеріали VII міжнародного Картамиського польового археологічного семінару. Алчевськ, 2009. С. 90–96.

*Бровендер Ю.М., Шубин Ю.П.* Эксперименты по выплавке меди из руд Картамышского рудопоявления в Донбассе // Археология восточноевропейской лесостепи. Воронеж: ВГУ, 2009. С. 114–123.

*Григорьев С.А.* Металлургическое производство в Северной Евразии в эпоху бронзы. Челябинск: Цицеро, 2013. 660 с.

Обогащение и переработка полезных ископаемых: учеб. пособие / В. Б. Кусков, М. В. Никитин // Санкт-Петербургский горный ин-т (технический университет). СПб., 2002. 84 с.

*Ровира С.* Технология выплавки меди в эпоху поздней бронзы в Каргалах (Оренбург, Россия). Экспериментальные плавки в Горном // Проблеми гірничої археології: Матеріали II міжнародного Картамиського польового археологічного семінару. Алчевськ, 2005. С. 203–206.

*Черных Е.Н.* Каргалы. В V т. Т. III. М.: Языки славянской культуры, 2004. 320 с.