

А. В. Петраускас,
А. А. Шапов

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ КРИЧНОГО ЗАЛІЗА *

В статті розглянуті питання досліджень сиродутного процесу та створення його діючої моделі. Це є одним із актуальних завдань, які існують перед експериментальними дослідженнями давньоруської та східнослов'янської металургії.

Ключові слова: моделювання, сиродутний процес, криця, фурма, горно, металургійні шлаки.

Натурне моделювання сиродутного способу отримання заліза не раз привертало увагу вітчизняних та зарубіжних дослідників. В численних наукових працях розглядалися питання експериментального дослідження сировинної бази, агломерації руди, особливостей побудови та функціонування піротехнічних споруд, хімічних та металографічних особливостей криці та ін. [Колчин, 1963, с. 7—18; Біленін, 2000, с. 79—81; Готун, 2005, с. 52—65; Завьялов, 2011, с. 104—118; Souchorova, Stransky 2008].

Актуальність дослідження сиродутного процесу шляхом натурального моделювання пояснюється відносно малою численністю залишків об'єктів металургійного виробництва, які репрезентують лише окремі ланки технологічного процесу. На сьогоднішній день існують декілька центрів, які проводять регулярні експерименти по відтворенню стародавнього способу отримання заліза в Чехії, Польщі та ін. В результаті багаторічних дослідів в них створено діючі натурні моделі сиродутних горен рубежу н. е., другої половини I та початку II тис. н. е. Східної та Центральної Європи.

* Стаття виконана в рамках проекту ДФФД–БРФФД «Палеоекономіка населення лісової зони України та Білорусі: археологічні реконструкції та моделювання», № Ф41.5/006

Одним із актуальних завдань експериментальних досліджень давньоруської та східно-слов'янської металургії (можна більш широко окреслити хронологію питання — на протязі всього існування чорної металургії на території сучасної України, Білорусі та Росії) можна назвати створення діючої натурної моделі сиродутного процесу.

Цікаві результати, які отримані вітчизняними вченими в галузі створення піротехнічних споруд, дослідження сировинної бази, попередньої підготовки руди, вивчення системи подачі повітря для горна та ін. дозволяють підійти до відтворення сиродутного процесу.

Головною метою під час моделювання сиродутного процесу було вивчення особливостей температурного режиму, особливостей подачі повітря, кількості та системи подачі шихти. Окремим об'єктом дослідження було обрано процес проковування криці, вийнятої з горна.

Матеріалом для плавки було обрано окалину — окис заліза (Fe_3O_4), який утворюється при нагріванні сталі в ковальському горні. Ця речовина має високий вміст заліза та малу кількість домішок, за хімічною формулою може бути співвіднесена з магнетитом, який відомий як корисна копалина в природі і використовується в чорній металургії. Використання окалини для отримання криці підтверджується писемними джерелами початку XIX ст. — «...из отпадающей при расковке железа чешуи выплавляются крицы, из коих выбивают железные листы. Из пудовой крицы выходит лист в 18 фунтов. Из сих листов сковывают пивные котлы. Из той же чешуи выдывают сталь и уклад, которого из семи пудов выходит три пуда» [Озерецковский, 1808, с. 58].

Можна зробити припущення, що використання окалини для отримання криці ввійшло в широкий вжиток з появою мануфактур, де використовувалися водяні молоти.

На сьогоднішній день було проведено дев'ять проб виготовлення кричного заліза, результати яких приведені в таблиці № 1, а також зроблено хімічний аналіз в Інституті археології НАНУ фрагментів декількох криць з перших експериментів, результати яких приведено в таблиці № 2. Впродовж цих плавок ми намагалися встановити найкращий температурний режим для отримання криці, підібрати оптимальні параметри печі для плавки, а також спробувати отримати якісне залізо після проковування криці.

Суть процесу отримання кричного заліза теоретично дуже проста. Потрібно відділити від оксиду заліза (Fe_2O_3) кисень за допомогою вуглецю (С), який і є паливом в печі. Але на практиці все складніше — потрібно врахувати якість руди, провести її збагачення, тобто перетворити Fe_2O_3 на Fe_3O_4 . Це досягається шляхом обпалення руди на багатті, що змінює хімічні властивості руди, а також робить її м'якою, здатною легко подрібнюватися. Це перша фаза перед просіюванням болотної руди, з якої потрібно максимально прибрати пісок. Підтвердження цьому знаходимо в середньовічному трактаті Валентія Роздзеньського «*Officina ferraria*»:

*Есть еще и другая руда,
с иными свойствами,
Чем та первая:
много находят ее на болотах;
В воде лежит,
отчего и зову ее болотной,
А можно бы ее — по ее достоинству —
назвать золотой.
Весьма пригодна для плавки,
не нуждается в обжиге,
Только очистив водой от песка —
кидай в печь;*

[Роздзеньський, 2012].

Після провіювання або промивання водою руда готова до використання. Через відсутність практичного досвіду в провіюванні руди, в промиванні водою було використано магніт для відділення руди від піску, а окалина взагалі не потребувала такої операції. Далі окалину змішували з мукою (5 % від загальної кількості руди) та водою, для того щоб шихту не викидав потік повітря з колби печі. Нижче наводимо більш докладний опис кожного експерименту.

Експеримент № 2 (13 січня 2012 року)

Ідеї, які лягли в основу другого експерименту базувалися на першому, параметри якого майже не фіксувалися, тому вони не наведені

в таблиці № 1. В результаті отримано невелику крицю в низькій печі (приблизно 60 см) при низькій температурі приблизно 900 °С, яка при подальшому проковуванні повністю розвалилася. Проведений в Інституті археології НАНУ хімічний аналіз показав, що в криці було лише 57 % заліза. Тому ми зробили висновок, що піч потрібно зробити вищою, щоб збільшити час проходження шихти в печі; підвищити температуру плавки для покращення спікання крапель заліза.

Нами була побудована піч 84 см заввишки. Піч будувалася декілька днів по 20—30 см за прийом, використання цегли повністю вирішило проблему з усадкою. Тому в подальших експериментах ми завжди використовували цеглу як основу. Ця піч була без вікна для виймання криці. Її нижня частина в місці, де мала бути фурма, без цегли, для того щоб полегшити виймання криці. Скріплюючим матеріалом був суглинок з додаванням дрібного деревного вугілля — 5—10 % від маси глини, та солома. Помічено, що додавання вугілля робить піч або ковальське горно більш стійкими до перепадів температур, а трава виконує роль армуючої складової, яка не дозволяє суглинкові сипатися. В подальшому таку суміш використовували для зведення практично всіх печей. Особливістю плавки з окалини є те, що майже не утворюється рідкий шлак.

Через тиждень після побудови печі ще до її повного висихання було вирішено провести плавку. Для прибирання зайвої вологи зі стінок печі її спочатку протоплювали дровами, а через 1 годину почали засипати шихту. Шихта засипалася малими порціями до 50 грамів за один раз, кожного разу як вугілля опускалося вниз. Йшов довготривалий монотонний процес, в якому засипання шихти постійно чергувалася із засипанням деревного вугілля. Температура визначалася старим способом за кольорами каління металу, для чого періодично в піч через фурму занурювали залізний прут товщиною 8 міліметрів — температура в печі сягала 1100—1150 °С. Після того, як шихта закінчилася, ще 20 хвилин вугілля продовжували підсипати, щоб остання шихта повністю відновилася до заліза і спікла з основною масою. Далі було виламано вікно, в тому місці де знаходилась фурма і вийнято крицю, яку відразу ж перенесено на дерев'яний пенюк і проковано ковалем та помічником-молотобойцем кувалдою в 3 кг. Криця не розвалювалася і їй молотом намагалися надати форму кулі, тобто прокувати з усіх сторін.

Крім криці було зібрано магнітом з печі невеликі шматочки відновленого заліза, які хоч і неможливо зварити до купи ковальським зварюванням, але можна було б використати при наступній плавці як шихту.

Проковування криці

Це ще один цікавий і, можливо, не менш важливий аспект отримання товарного заліза, ніж сама виплавка. Якщо інформацію про плавлення заліза можна було отримати з писемних середньовічних джерел, статей з експериментальної археології [Колчин, 1965, с. 196—215, Зав'ялов, 2011, с. 104—118], даних сучасних експериментів [Experimental, 2012], то даних про правильне кування криці знайти неможливо, особливо в роботах істориків та археологів.

Для проковування криці було побудовано окреме горно з боковим дуттям спеціально для деревного вугілля. Воно нагадувало за формою, якщо дивитися зверху — дві дужки (). Така форма найбільш ефективна для досягнення високої температури при проковуванні криці, тому що зварювання криці з низьким вмістом вуглецю потребує набагато більшої температури, ніж під час отримання самої криці в печі. Таке горно було використано для проковування всіх наступних криць. Дана криця до зварювальної температури не нагрівалася, її кували в режимі 1100—800 °C спочатку на дерев'яному пні легким молотком несильними, швидкими ударами, а потім на ковадлі. Криця вела себе дуже податливо і нагадувала пластилін — постійно зменшуючись у розмірах і ущільнюючись. Але тріщини повністю прибрати не вдалось. Їх поява була зумовлена як формою криці, так і відсутністю температурного режиму ковальського зварювання.

За результатами експерименту ми зробили висновки про доцільність збільшення кількості окалини до 4 кг, необхідність підвищення температури в печі до 1200—1250 °C та збільшення висоти печі до 1 метра.

Експеримент № 3 (20 січня 2012 року)

В цьому досліді було використано той самий пристрій, що й в попередньому, надбудувавши зверху 16 см; такий же тип шихти, але додано шматочки заліза з попередньої плавки, а також збільшено кількість шихти, що засипається в піч за один прийом. Через 3,5 години плавки було вийнято крицю, яка за формою нагадувала кулю. Прокована на пні, вона тримала форму, відразу відчувалася її висока щільність. Під час плавки відпала глиняна обмазка від фурми і вона згоріла. Ця проблема постійно супроводжувала всі експерименти, де використовувалась залізна фурма, обмазана глиною.

Спроба отримати товарне залізо показала, що якщо додавати при плавці нетоварні шматочки заліза з попередньої плавки, то щільність криці збільшується і зменшується усадка при куванні. Тріщини не вдалось прибрати повністю, декілька залишилося.

За результатами експерименту ми зробили висновки про доцільність використання для

обмазки фурми вогнетривкої глини або повної заміни залізної фурми на глиняну; збільшення завантаження окалини до 8—10 кг; підвищення температури в печі до 1300—1400 °C; проведення проковування криці більш інтенсивно.

Експеримент № 4 (20 квітня 2012 року)

В цьому досліді використано ту саму піч, що і в попередньому. Висота печі майже не змінилась. Було вирішено майже повністю змоделювати попередню плавку, збільшивши тільки кількість шихти і трохи змінивши розташування фурми. Але цього разу була допущена суттєва конструктивна помилка — через невичищений від двох попередніх плавок черинь печі, криця швидко повністю перекрила фурму і процес плавки зупинився в той час, коли було використано лише половина шихти. Щоб дістати крицю довелося зруйнувати всю піч. Сама криця була ледь нагріта до 700 °C і її неможливо було прокувати, до неї налипли глиняні шматки стінки і череня.

При проковуванні криці ці неметалеві включення відрізу повністю відділилися. Але порушення температурного режиму відновлення кричного заліза призвело до того, що товарне залізо майже все було вкрите тріщинами і не годилося для виробництва.

За результатами експерименту було зроблено висновки про необхідність підкидання шихти малими порціями, що збільшує ефективність плавки; будівництва нової печі із вставною передньою стінкою, що дасть зручно встановлювати фурму та можливість чистити черинь печі; поставити піч на щільну (цегляну основу), це збільшить її міцність та стійкість під час сиродутного процесу; зменшення товщини стінок до 15—12 см, достатньої для забезпечення стійкості конструкції в ході експерименту; розміру відстані до фурми від поду печі в 15—25 см в залежності від кількості шихти, що планується використати; провести плавку із завантаженням 7 кг окалини та збільшенням висоту печі на 20 см (до 1200 мм).

Експеримент № 5 (19 травня 2012 року)

Даний експеримент проводився в рамках міжнародного науково-практичного семінару з експериментальної археології в місті Олевськ Житомирської області. Цього разу нам не вдалося побудувати піч, використавши материковий суглинок на місці побудови горна — ґрунт на місці експерименту був піщаний, і нам довелося використати місцеву глину, виявлену в розташованих поруч вертикальних відслоненнях. Як показало моделювання, застосовувати чисту глину нерационально. Стінки йдуть тріщинами, через які вибивається полум'я, що призводить

до падіння температури, тому їх постійно потрібно замазувати. Також нам не вдалося досягти високої температури, вона була на рівні 950—1000 °С. Більша частина шихти перейшла в шлак і осіла на стінках печі, тому криця вийшла нещільна, мала по вазі і, скоріш за все, з низьким вмістом заліза. Можливо це особливості місцевої глини, в якій є якась сполука, що завадила спіканню і відновленню заліза. На сьогоднішній день криця не проковувалася, а її хімічний аналіз не проведений.

Експеримент № 6 (17 червня 2012 року)

Було побудовано піч за висновками четвертого експерименту. Збільшено діаметр. Також зроблено окреме вікно внизу для виймання криці, висотою 20 см. Було вирішено не збільшувати кількість шихти, а провести тестування нової моделі. Експеримент пройшов успішно. Отримано щільну крицю, залізозмісний шлак, хоча не зовсім ясно, яким чином та з яких сполук він утворився, адже в попередніх експериментах він був відсутній. Можливо, стінки печі з ділянками, де був високий вміст піску, прореагували з оксидом заліза утворюючи фаяліт (Fe_2SiO_4). Крицю було проковано на пні, вона виявилася щільною, з вмістом вуглецю приблизно 0,1—0,2 %. Вміст вуглецю встановлено приблизно за допомогою проби на іскру. Подальше проковування не проводилося.

За результатами експерименту можна зробили висновки, що оптимальний діаметр печі внизу становить 25 см; оптимальна пропорція руди відносно до вугілля 1:2; потрібно ретельно чистити черинь після плавки; збільшити кількість окалини необхідно до 8 кг.

Експеримент № 7 (22 червня 2012 року)

Цю і наступну плавку було проведено в рамках ковальського фестивалю «Трудолюб» під містом Миргород. Через обмеження часу було вирішено побудувати піч висотою близько 90 сантиметрів. Матеріалами слугували місцеві матеріали: суха трава, обмазка старої хати. Вирішено провести плавку при максимально можливій температурі, яку може дати вентилятор. Тому вона пройшла дуже швидко. За 2,5 годин використано 7 кг шихти, отримано дуже нерівномірно науглецьовану крицю з вмістом вуглецю від 0,1 до 1,2 %. При проковці криця розділилася на 2 шматки. Один з них був прокований на сучасному пресі, а криця нагрівалася в газовому горні. Результати показали, що ці сучасні пристрої взагалі не підходять для нагрівання та проковування цього матеріалу. Тому для виробництва кричного заліза потрібно використовувати лише давні методи та види палива.

За результатами експерименту зроблено висновки, що через малу кількість шихти і високу температуру відбулось нерівномірне науглецьовання криці; провести плавку потрібно при низькій температурі — 1100 °С, і цим збільшити час проходження шихти.

Експеримент № 8 (22 червня 2012 року)

Повторно використано попередню піч. Змінено тільки температурний режим — подачу повітря зробили мінімальною. Цього разу плавка продовжувалася 5,5 годин. В результаті було отримано крицю вагою до 3 кг, яка при подальшому проковуванні в товарне залізо повністю розвалилася. Нами було вибрано помилковий температурний режим, при якому залізо інтенсивно відновлювалося, але не спікалося між собою.

За результатами експерименту ми зробили висновки, що для отримання якісного кричного заліза потрібно виключно висока температура — 1200 °С і вище; науглецьовання криці при високій температурі регулюється двома параметрами: висотою печі та кількістю шихти.

Експеримент № 9 (6 липня 2012 року)

Ми використали ту ж саму піч, що і в експерименті № 6. Збільшили кількість окалини до 12 кг та кількість шихти, що засипається за одним прийомом до 100—150 грам, встановили температурний режим в печі в межах 1200—1300 °С. В результаті плавки отримано 2 криці гарної щільності з вмістом вуглецю від 0,01 до 0,8 %, які вдалося обтиснути на дерев'яному пні. Одна з них була в подальшому прокована в товарне залізо.

Цього разу ми вирішили відразу кувати крицю в режимі ковальського зварювання. Наше рішення виявилось вірним. Тріщини з поверхні заліза повністю зникли, але в результаті довгого витримування заліза при високих температурах структура металу стала дуже крупнозерниста, що призвело до руйнування штаби заліза фактично на фінішному етапі проковування. Таким чином, питання правильного режиму кування криці залишається поки що відкритим. Також було помічено цікавий момент з вмістом вуглецю в криці. Криця була науглецьована нерівномірно: зонами від низьковуглецевої сталі до високовуглецевої. Після ретельного проковування вміст вуглецю став більш-менш однорідний по всій криці і становив не більше 0,1 %.

За результатами експерименту зроблено такі висновки: потрібно намагатися отримати крицю з найменшим вмістом вуглецю; його низький вміст дасть змогу досить довго тримати залізо при зварювальних температурах без зростання зерна в структурі металу; проковування криці має здійснюватися обов'язково з помічником-

молотобойцем на всіх фазах кування; потрібно збільшувати кількість шихти, щоб повністю вийти на співвідношення 1 (шихта) до 2 (вугілля).

Виходячи з вищенаведеної інформації можна зробити такі висновки. Відновлення кричного заліза з окалини — значно легший процес, ніж з болотяної руди з великим вмістом піску, що заважає отриманню заліза. При плавках з окалини відсутній шлак у великих об'ємах, як це буває при плавках з болотяної руди, його кількість незначна, тому можна припустити що відбувається взаємодія закису заліза (FeO) зі стінками самої печі. Високий температурний режим в печі дуже важливий для отримання якісної щільної криці. Висота печі та кількість шихти вирішальні фактори регулювання кількості вуглецю в криці при сталій температурі плавки. Проковування криці в товарне залізо такий же важливий етап, як і отримання самої криці. Для отримання якісного кричного заліза потрібно продовжити експериментувати з режимом інтенсивності кування, температури, кількості нагрівів криці.

Таким чином, після проведення ще декількох контрольних плавок з окалиною, можна очікувати позитивні результати експериментів з отримання криці з болотної руди, якщо при цьому врахувати визначені шляхом проведеного дослідження оптимальні показники температурного режиму, співвідношення руди та вугілля, висоти встановлення фурми та її нахилу, параметрів самої печі.

Біленін К. Стародавнє залізодобування і гірнична справа в Свентокшиських горах (Південна Польща) / К. Біленін // Археологія. — 2000. — №4. — С. 79—81.

Готун І. А. Моделювання чорнометалургійних та лісохімічних процесів за матеріалами Північної експедиції / І. А. Готун, А. В. Петраускас, О. В. Петраускас // Археологія. — 2005. — № 3. — С. 52—65.

Зав'ялов В. И. Моделирование сыродутного процесса в России / В. И. Зав'ялов, М. А. Раткин / Экспериментальна археологія: завдання, методи, моделювання. — К.—М., 2011. — С.104—118. — (Археологія і давня історія України, вип. 4).

Колчин Б. А. Физическое моделирование сыродутного процесса производства железа / Б. А. Колчин, О. Ю. Круг // — МИА. — № 129: Археологія і естетичні науки. — М., 1965. — С. 196—215.

Озерецковский Н. Обзорные места от Санкт-Петербурга до Старой Руссы и на обратном пути в 1805 году / Н. Озерецковский. — СПб., 1808. — 103 с.

Роздзенський В. Officina ferraria или Железоплавильня и кузнечные мастерские благородного железоделательного ремесла (перевод Л. И. Авилловой) [Электронный ресурс] / В. Роздзенський. — Точка доступу: <http://www.ancientcraft.archeologia.ru/polonia.htm> (від 30.10.2012), заголовок з екрану. *Souchopova V., Stransky K.* Tajemsvi davneho zezeza / V.Souchopova, K.Stransky. — Brno, 2008. — 170 s.

Experimental iron smelting // Точка доступу: <http://www.warehamforge.ca/ironsmelting/index.html> (від 30.10.2012), заголовок з екрану.

А. В. Петраускас, А. А. Шапов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА КРИЧНОГО ЖЕЛЕЗА

Актуальность изучения сыродутного процесса путем натурального моделирования основана на относительно малой численности археологических объектов металлургического производства, которые представляют не весь технологический процесс а лишь его отдельные звенья.

Одной из главных задач, которые стоят перед экспериментальными исследованиями в области древнерусской и восточнославянской металлургии и даже на протяжении всего периода существования чёрной металлургии на территории современной Украины, можно считать создание действующей натурной модели сыродутного процесса. В ходе проведенных экспериментов, мы получили значительные результаты, продвинувшие вперед решение этой задачи.

A. Petrauskas, A. Shapov

THE EXPERIMENTAL STUDY OF BLOOMERY PRODUCTION

There is a small number of archaeological sites of metallurgical production. They do not represent the whole technological process. The urgency of bloomery studying through full-scale simulation based on a relatively small number of archaeological sites of metallurgical production, which do not represent the entire process and only some of its units. One of the most urgent tasks facing experimental study of Ancient Rus and Eastern Slavs metallurgy could be the creation of the acting full-scale bloom iron smelting model.