

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СЫРОДУТНОГО
ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА ЖЕЛЕЗА
В ДОИНДУСТРИАЛЬНЫЙ ПЕРИОД НА ТЕРРИТОРИИ
СОВРЕМЕННОЙ БЕЛАРУСИ**

Д.В. АНДРЕЕВ

Белорусский национальный технический университет

В статье описаны эксперименты по реконструкции технологии получения железа из болотной руды в металлургических печах, изготовленных на основе археологических источников. Приведено описание конструкции печей, металлургического процесса и технологии подготовки сырья. Полученные данные позволяют критически оценить теорию некоторых исследователей относительно того какие именно технологические решения применялись для получения железа в рассматриваемый период.

Ключевые слова: эксперименты, металлургические печи, получение железа из болотной руды, технологические решения.

**RESEARCH OF THE TECHNOLOGY OF THE CHEESE
PROCESS OF IRON PRODUCTION DURING
THE PRE-INDUSTRIAL PERIOD IN THE TERRITORY
OF MODERN BELARUS**

D.V. ANDREEV

Belarusian National Technical University

The article contains the results of iron production from bog ore experiments using furnace based on archaeological sources. It gives a review of furnace design features, ore smelting preparation operations and ore recovery up to iron itself. The data obtained allow us to critically evaluate the theory of some researchers regarding exactly which technological solutions were used to produce iron in the period under consideration.

Keywords: experiments, metallurgical furnaces, iron production from bog ore, technological solutions.

Общеизвестно, что современная металлургическая промышленность в Беларуси возникла фактически с момента ввода в эксплуата-

тацию в 1984 г. металлургического мини-предприятия – Белорусского металлургического завода, годовая мощность которого в настоящее время составляет около 2,7–2,8 млн. т жидкой стали. Вместе с тем представляет интерес рассмотреть некоторые исторические аспекты возникновения металлургии на территории Беларуси и выполнить исследования получения железоуглеродистых сплавов из местного сырья по ранее существовавшим технологиям. Следует отметить, что, например, в деревне Налибокская рудня в 18 веке работали крупный на тот момент времени металлургический завод и параллельно стекольная фабрика, принадлежавшие Анне и Карлу Радзивилам [1]. В качестве сырья металлурги использовали болотную руду на основе бурого железняка, содержащего железо в форме гидратированных оксидов $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$. В Беларуси много месторождений бурых железняков, которые выходят на поверхность земли или залегают на глубине до 1 метра. Особенно богата ими Гомельская область (Полесье). Археологические исследования культурного слоя поселений, рядом с которыми бурые железняки выходят на поверхность, свидетельствует о повсеместной добыче и переработке этого сырья предками современных белорусов [2]. Сыродутный способ восстановления руды до металлического железа был основным и единственным вплоть до 19 века, когда ему на смену пришел пудлинговый способ. Однако есть свидетельства кустарного производства сыродутного железа еще в начале 20-го века [1]. Как известно, сыродутное железо, также называемое кричным, довольно долго конкурировало с более качественным металлом индустриального производства. На протяжении многих веков руду восстанавливали до металлического железа в небольших глинобитных печах шахтного типа – домницах. Воздух для интенсификации горения подавался с помощью кузнечных мехов через специальные керамические фурмы. С развитием железндобывающего производства увеличивался и размер печей. Если в конце первого тысячелетия нашей эры крица массой в несколько килограмм была результатом одного металлургического цикла небольшой печи, то в 18 веке металлургический завод Храптовичей (строительство которого началось в 1773 г. в Налибокской пуще в районе Вишево, Воложинский район) еженедельно производил 600 пудов железа [1, 3].

Однако в научной исторической литературе достаточно скромно описана древняя металлургия и железообрабатывающее ремесло на территории современной Беларуси. В отечественной историографии имеют место гипотезы о применении в древности примитивных инженерных приспособлений для получения железа. Основным критерием причастности инженерного сооружения к производству железа, по мнению некоторых авторов, является наличие оплавленных глиняных фрагментов конструкции данного сооружения, а также наличие шлака. При этом сам шлак никак дополнительно не исследуется для определения его происхождения. Таким образом, в разряд металлургических печей для производства железа (домниц) были определены самые разнообразные инженерные сооружения, в которых, вероятно, сжигалось топливо. Например, Г.Н. Саганович пишет о получении железа в так называемых «волчьих ямах». Это плавильное приспособление, представляющее собой яму с облепленными глиной стенами, расположенную обычно на возвышенности с целью использования природного дутья – ветра [4]. М.Ф. Гурин к печам для производства железа относит глинобитные печи шахтного типа, высота которых меньше диаметра их основания, а также куполообразные печи аналогичных геометрических пропорций. Технология самого металлургического процесса получения железа представляется, как загрузка руды и топлива в печь. В работе [2] отмечается следующее: «В сыродутную печь, предварительно подготовленную и разогретую, загружалась измельченная, обогащенная руда и древесный уголь. ... Операция обогащения небогатой железом руды заключалась в многократной промывке, сушке, измельчении до величины ореха и прокаливании на костре...».

На основании проведенных исследований, предложено дополнение к вышеизложенной гипотезе по доиндустриальной технологии производства железа. Основные тезисы предлагаемого подхода:

- наличие оплавленных глиняных фрагментов конструкции инженерного сооружения, в совокупности с наличием шлака неопределенного происхождения, не является достаточным критерием для классификации такого сооружения в качестве печи для непосредственного производства железа;

- технология непосредственно металлургического процесса, представляемая, как акт загрузки топлива и руды в печь, формали-

зована до примитивного уровня, который не дает физического понимания процесса восстановления руды до металлического железа;

– технология обогащения руды, представленная операциями промывки, сушки, измельчения и прокаливания на костре, не отвечает условиям эффективного металлургического процесса восстановления руды до металлического железа.

В связи с этим проведена серия экспериментов по реконструкции сыродутного процесса получения железа из болотной руды в печи шахтного типа по технологии, описанной у Б.А. Колчина [5]. Каждый эксперимент включал обогащение руды и подготовку шихтовых материалов, изготовление печи шахтного типа, собственно плавку, анализ полученного материала. Сырьем для эксперимента послужил бурый железняк, собранный на берегу реки Бобр в районе города Крупки Минской области. Химический состав приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав используемой руды на основе бурого железняка

Номер пробы	Химический элемент, %												
	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Zr
1	1,42	14,82	0,76	0,11	1,60	1,03	0,24	0,02	0,06	21,66	0,02	0,02	0,09
2	1,45	14,38	0,76	0,12	1,65	1,03	0,26	0,01	0,06	22,09	0,03	0,02	0,08

Руда была тщательно промыта, просушена и измельчена до фракции 50–100 мм. Куски руды были отожжены на открытом пламене костра. Изменение цвета и наличие реакции на магнит после остывания руды свидетельствовало об успешном магнетизирующем обжиге. При нагреве в открытом пламени костра из руды испаряется вода, а при контакте с горячим древесным углем Fe_2O_3 переходит в Fe_3O_4 . После обжига руда измельчалась до фракции 0,1–1 мм. Также был произведен расчет количества оксида кальция CaO для оптимизации процесса шлакообразования при нагреве шихты в домнице. В качестве кальцийсодержащего вещества, потенциально доступного древним металлургам, был выбран мел $CaCO_3$. Как известно, в зоне высоких температур (900–1000 °С) мел разлагается на углекислый газ CO_2 и негашеную известь CaO . Наличие оксида кальция CaO в составе шихты было необходимо для понижения

температуры шлакообразования и последующего улучшения процесса отделения металлического железа от шлака. Исходя из современных представлений о составе шлака для доменной плавки, для обеспечения минимальной температуры плавки, расчетное количество CaCO_3 составляло 24 % от общей массы руды. Мел смешивался с измельченной рудой. Топливом послужил древесный уголь листовых пород промышленного пиролиза. Печь глинобитная, бескаркасная, шахтного типа. Высота печи 100 см, внутренний диаметр основания 50 см. В передней части печи имеется отверстие, которое служит для выемки продуктов металлургического процесса. Перед прогревом печи отверстие закладывалось кирпичом и глиной. Также в этом отверстии была смонтирована фурма. В качестве устройства для подачи воздуха использовались кузнечные меха двухкамерного типа.

Процесс проводили следующим образом. Холодная печь прогревалась дровами в течение 1,5 ч. После прогрева вся шахта печи заполнялась древесным углем. По мере прогорания угля происходила загрузка шихтовых материалов, чередующаяся с загрузкой топлива каждые 5–7 мин. Таким образом, было обеспечено заполнение печи топливом и шихтой. Один металлургический цикл в такой домнице, как правило, длится 6–7 ч, за это время перерабатывается 20 кг шихтовых материалов и около 60 кг древесного угля.

Во время проведения первой экспериментальной плавки возник ряд проблем, из-за которых, вероятно, удалось получить лишь незначительное количество металлического железа (~10 г). Металл, полученный экспериментальным путем, представлял собой сферические капли диаметром 1–5 мм. Полученного металла было достаточно для проведения спектрального анализа с целью определения химического состава. Внешний вид полученного металла приведен на рисунке 1.

Низкая жидкотекучесть шлака в комплексе с малым внутренним диаметром фурмы стали причиной периодической остановки процесса из-за перекрытия устья фурмы затвердевшим шлаком. При этом даже кратковременное прекращение дутья могло вызывать общее падение температуры внутри печи и, как следствие, затвердевание шлака в стволе шахты с последующим ухудшением газопроницаемости. Было замечено, что часть шихты пылевидной фракции сдувало дымовыми газами при загрузке в печь.



Рисунок 1 – Конкреции металлического железа в шлаке
(зоны их образования обведены кругом)

Предположили, что основные причины низкой эффективности процесса следующие:

1. Малый диаметр фурмы, через которую подается воздух (внутренний диаметр 20–25 мм).

2. Недостаточная жидкотекучесть шлака, вероятно, из-за относительно низкой температуры процесса.

3. Низкая газопроницаемость ствола шахты печи, заполненной шихтой и топливом из-за слишком мелкой фракции руды.

4. Большой внутренний диаметр основания домницы. Одна фурма не обеспечивает подачу необходимого количества воздуха для создания восстановительной среды во всем объеме печи с диаметром основания 50 см. Условия для восстановления оксидов железа, содержащихся в руде, обеспечиваются только в передней части печи (над фурмой), в то время как объем печи, прилежащий к задней стенке, фактически не участвует в восстановительном процессе.

При проведении последующих экспериментов скорректирована технология плавки с учетом вышеизложенного. Применена технология получения агломерата, в частности, в качестве связующего вещества использована пищевая мука растительного происхождения. Мелко измельченные шихтовые материалы смешивались с пищевой мукой и водой, получившаяся тестообразная масса после затвердевания дробилась на куски фракцией 10–15 мм. Таким обра-

зом, была увеличена газопроницаемость слоя шихты. Мука, попадая в зону высоких температур, выгорала, обеспечивая наличие большого количества пор в каждом куске. В состав шихты было добавлено также 20 % окалины, образовавшейся при ручной кузнечной обработке низкоуглеродистой конструкционной стали. Известно, что фрагменты окалины восстанавливаются до металлического железа с меньшими затратами топливно-энергетических ресурсов, чем оксиды железа в составе бурого железняка, и могут послужить центрами концентрации капель металла для образования крицы большего размера. Кроме того, был уменьшен диаметр основания печи, что позволило эффективно использовать весь объем домницы, применяя одну фурму для подачи воздуха.

Также дополнительно были созданы условия для формирования крицы в основании домницы. Сферические капли металла, образовавшиеся в шлаке в этих условиях, вероятно, не обладают достаточной текучестью, для того чтобы свободно стекать в основание печи и соединяться в более крупные образования – крицы. Для создания «шлаковой ванны» необходимо было уменьшить теплопотери от основания печи в окружающую среду. Возможные способы снижения теплопотерь включают увеличение толщины и снижение коэффициента теплопроводности ограждающей конструкции; создание полусферического профиля основания домницы и расположение фурмы выше уровня «шлаковой ванны» с небольшим уклоном вниз. Претерпела изменение также конструкция фурмы – внутренний диаметр фурмы был увеличен до 50 мм, а снабжение фурмы «kozyрьком» обеспечило стекание шлака по фурме без перекрытия потока воздуха. В ходе эксперимента удалось получить слитки металла размером 25–30 мм. Внешний вид полученных слитков металла приведен на рисунке 2, б. По форме, размеру, наличию пор и внешнему виду они сопоставимы со слитками, добытыми и исследованными М.Ф. Гуриным, в процессе его археологических исследований Белорусского Поднепровья [2] (рисунок 2, а).

Результаты исследования химического состава металла, полученного экспериментальным путем, приведены в таблице 2. В качестве образцов для сравнения приведены данные по исследованию химического состава конкреций, обнаруженных в древнем металлургическом шлаке в районе озера Селява и в Налибокской Рудне.

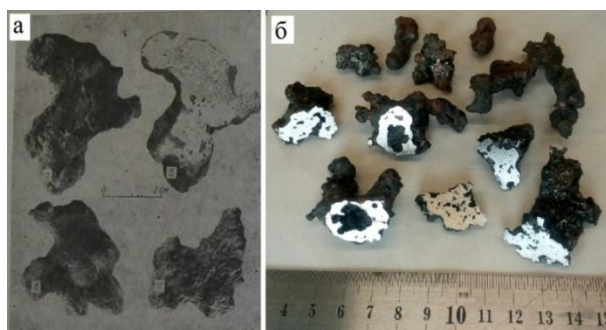


Рисунок 2 – Внешний вид полученных слитков:
а – крицы из селища Тайманово, исследованные М.Ф. Гуриным;
б – слитки, полученные во время второго эксперимента

Таблица 2 – Химический состав исследованных железуглеродистых сплавов, %

Химический элемент	Экспериментальные образцы						Археологические образцы	
	Плавка № 1	Плавка № 2		Плавка № 3			Образец «Налибокская рудня»	Образец «Озеро Селява»
	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3	Образец № 4	Образец № 5	Образец № 6		
C	3,3–3,5	0,852	0,762	1,639	1,968	0,301	1,800	0,144
Si	0,035	0,012	<0,001	0,016	0,013	0,046	0,488	0,145
Mn	0,259	0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,001	0,137	0,01
P	0,228	2,090	2,743	1,291	1,341	0,899	3,363	1,499
S	0,010	0,216	0,048	0,142	0,136	0,092	0,088	0,075

Анализ представленных в таблице данных показывает, что химический состав образца, полученного в результате плавки № 1, не коррелирует с данными химического анализа образцов, полученных в других плавках и археологических образцах, прежде всего по содержанию углерода и фосфора. Высокое содержание фосфора в полученном металле связано с большой концентрацией фосфора в исходной руде (см. таблицу 1). Разница фосфора в разных образцах, полученных во время одного эксперимента, вероятно, свидетельствует о неравномерном распределении примесей по объему крицы,

что также подтверждается исследованиями М.Ф. Гурина [2]. Разница по содержанию углерода в образцах, полученных во время одной плавки, вероятно, обусловлена неравномерностью процесса цементации поверхности слитков.

Данные слитки, полученные в домнице (рисунок 3), не являются крицами в общепринятом понимании этого определения. Однако, существенное увеличение массы и размеров металлических слитков, полученных в результате повторного эксперимента, свидетельствует о создании условий для эффективного восстановления оксидов железа, содержащихся в болотной руде, до металлического железа и последующего формирования крицы в нижней части печи. Вероятно, если увеличить в 2–3 раза количество шихтовых материалов, пропорционально повысив количество топлива и продолжительность металлургического процесса, то результатом будет крица массой 1,2–1,8 кг. Также следует учитывать, что используемая в описанных экспериментах руда содержала только 21,9 % железа. Использование в аналогичных экспериментах более богатых железом руд, вероятно, увеличат количество получаемого железа.

Таким образом, исходя из сравнения результатов первого и второго экспериментов, можно сделать следующие выводы:

1. Форма, размеры и конструктивные особенности плавильного приспособления для производства железа из болотной руды должны соответствовать одновременно двум параметрам: возможность эффективного осуществления процесса восстановления оксидов железа, содержащихся в болотной руде и обеспечение условий, необходимых для формирования крицы из отдельных небольших слитков металла.

2. Технология обогащения руды, а также подготовка других шихтовых материалов к плавке и технология непосредственно металлургического процесса, должны строго соответствовать свойствам используемого сырья. Вероятно, имел место комплексный подход к процессу подготовки руды к плавке. Кроме промывки, сушки и прокаливания руды на костре, вероятно, применяли обогащение руды отходами кузнечного производства (окалина); введение в состав шихты кальцийсодержащих веществ с целью понижения температуры жидкотекучести шлака и агломерацию шихтовых материалов.



а – внешний вид домницы для второго эксперимента; *б* – сушка печи перед эксплуатацией; *в* – домница с установленной фурмой; *г* – выемка продуктов металлургического процесса

Рисунок 3 – Реконструкция сыродутной печи (домницы)

Список литературы

1. **Сидорович, В.Е.** Naliboki Forest: Historical outline and ethnographical sketch – СНАТУРЫ ШВЕРЦИ, 2016. – 367 p. (in English).
2. **Гурин, М.Ф.** Древнее железо Белорусского Поднепровья (I тысячелетие н.э.) / М.Ф. Гурин. – Минск: Наука и техника, 1982. – 126 с.

3. Гурин, М.Ф. Кузнечное ремесло Полоцкой земли. IX–XIII вв. / М.Ф. Гурин. – Минск: Наука и техника, 1987. – 151 с.

4. Саганович, Г.Н. Кузнечное ремесло Белоруссии XIV–XVIII вв.: дисс... канд. историч. наук: 07.00.06: защищена 19.05.1989: утверждена 24.01.1990 / Саганович Геннадий Николаевич. – Киев, 1989.

5. Колчин, Б.А. Черная металлургия и металлообработка в древней Руси (Домонгольский период). – М.: Изд-во АН СССР, 1953. – 259 с. (МИА № 32).

References

1. Sidorovich, V.E. Naliboki Forest: Historical outline and ethnographical sketch – CHATYRY CHVERCI, 2016. – 367 p. (in English).

2. Gurin, M.F. *Drevnee zhelezo Belorusskogo Podneprov'ya (I tysyacheletie n.e.)* [Ancient iron of the Belarusian Dnieper region (1st millennium AD)] / M.F.Gurin. – Minsk: Nauka i tekhnika Publ., 1982. – 126 p.

3. Gurin, M.F. *Kuznechnoe remeslo Polockoj zemli. IX–XIII vv.* [Blacksmith craft of the Polotsk land. IX-XIII centuries] / M.F.Gurin. – Minsk: Nauka i tekhnika Publ., 1987. – 151 p.

4. Saganovich, G.N. *Kuznechnoe remeslo Belorussii XIV–XVIII vv.* [Blacksmithing craft of Belarus XIV – XVIII centuries]: *diss... kand. istorich. Nauk = diss ... cand. historical. Sciences.* Kiev, 1989.

5. Kolchin, B.A. *CHernaya metallurgiya i metalloobrabotka v drevnej Rusi (Domongol'skij period)* [Ferrous metallurgy and metalworking in ancient Russia (Pre-Mongol period)]. – Moscow: Izdatel'stvo AN SSSR Publ., 1953. – 259 p.

Поступила 20.08.2020

Received 20.08.2020