



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-100-105>  
УДК 669.1

Поступила 03.02.2021  
Received 03.02.2021

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЫРОДУТНОГО СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ НА ТЕРРИТОРИИ СОВРЕМЕННОЙ БЕЛАРУСИ В ДОИНДУСТРИАЛЬНЫЙ ПЕРИОД

Д. В. АНДРЕЕВ, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: smithmaster.by@gmail.com

*В статье описаны эксперименты по реконструкции технологии сыродутного процесса получения железоуглеродистых сплавов в печах на основании археологических источников. Приведено описание конструкции печей, технологии металлургического процесса и подготовки сырьевых материалов. Описан процесс рафинирования крицы методом кузнечной обработки. Сделаны научно обоснованные предположения о возможных технологических приемах получения сталей в доиндустриальный период на территории современной Беларуси.*

**Ключевые слова.** Сыродутный процесс, болотные руды, крица, окалина, кузнечная сварка, рафинирование.

**Для цитирования.** Андреев, Д. В. Исследование эффективности сыродутного способа получения углеродистых сталей на территории современной Беларуси в доиндустриальный период / Д. В. Андреев // Литье и металлургия. 2021. № 1. С. 100-105. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-100-105>.

## RESEARCH OF THE EFFICIENCY OF THE ONE-STEP PROCESS FOR PRODUCING CARBON STEELS ON THE TERRITORY OF MODERN BELARUS IN THE PRE-INDUSTRIAL PERIOD

D. V. ANDREEV, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: smithmaster.by@gmail.com

*The article describes experiments on the reconstruction of the technology of the one-step process of obtaining iron-carbon alloys in furnaces based on archaeological sources. It contains the description of furnace design, metallurgical process technology and raw materials preparation. The process of refining the iron bloom by forging is described. Scientifically grounded assumptions are made about possible technological methods of obtaining steels in the pre-industrial period on the territory of modern Belarus.*

**Keywords.** Smelting experiment, bloomery, bog iron ore, iron bloom, blacksmith scale, forge welding, blacksmith scale, refining.

**For citation.** Andreev D. V. Research of the efficiency of the one-step process for producing carbon steels on the territory of modern Belarus in the pre-industrial period. Foundry production and metallurgy, 2021, no. 1, pp. 100-105. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-1-100-105>.

Уровень развития металлургии был и остается ярким примером социально-экономического развития общества. Понимание этого уровня в различные исторические периоды позволяет более ясно представлять социально-экономическую ситуацию. Вызывает интерес изучение эффективности производства железа в доиндустриальный период на территории современной Беларуси. Черная металлургия возникла и получила распространение в бассейне реки Днепр уже в первой половине первого тысячелетия нашей эры [1, 2]. Сыродутный способ получения железа был основным вплоть до появления первых крупных металлургических заводов в XVIII в. Первая на территории современной Беларуси доменная печь была построена в 1780 г. на Вишневском заводе, основанном графом Иохимом Хрептовичем [3, 4]. Сырьем для древних металлургов служили болотные руды на основе бурого железняка, содержащего железо в форме гидратных оксидов  $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$ . Влияние занятости населения в процессах добычи руды нашло свое отражение в топонимике населенных пунктов – на сегодняшний день около 180 населенных пунктов Республики Беларусь в своем названии содержит производные от корня «руд»: Рудня, Руденск, Рудище, Рудники и др. [5].

Древние металлургические печи, к сожалению, дошли до нас в сильно фрагментированном или разрушенном состоянии. Сохранились, в основном, только основания печей, элементы футеровки, обломки керамических фурм. Таким образом, судить о параметрах конструкции печей можно исходя из графической реконструкции, созданной исследователями данных печей. Неудивительно, что одни и те же печи

по-разному интерпретированы археологами. Наряду с этим в отечественной исторической литературе достаточно скромно описана древняя металлургия и железообрабатывающее ремесло. Технология самого металлургического процесса получения железа упрощена до процесса загрузки руды и топлива в печь [2], что не дает объективного представления о процессе восстановления оксидов железа, содержащихся в руде. Также получили распространение гипотезы о возможности производства железа в примитивных инженерных сооружениях типа ямах-плавильнях с использованием естественной тяги [5] и куполообразных печах, высота которых не превышает диаметр их основания [1, 2]. Внести ясность в данный вопрос представляется возможным путем критической оценки и восстановления археологических данных об инженерных сооружениях, идентифицируемых как печи для производства железа, применяя современные знания о металлургическом процессе прямого восстановления оксидов железа. Для решения этой задачи был проведен ряд металлургических экспериментов по восстановлению руды до металлического железа в моделях сыродутных печей с использованием материалов и технологий, потенциально доступных древним металлургам. Каждый эксперимент включал следующие этапы: изготовление печи, обогащение руды, собственно плавку, анализ полученного материала. Сырьем для эксперимента служил бурый железняк, собранный на берегу реки Бобр в районе города Крупки Минской области (табл. 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

Первоначально был проведен эксперимент согласно технологии, описанной Б. А. Колчиным [6]. Руду тщательно промывали, измельчали до фракции 50–100 мм, прожигали в открытом пламене костра. С целью понижения температуры шлакообразования и последующего улучшения процесса отделения шлака от металлического железа в состав шихты был добавлен мел  $\text{Ca}(\text{CO})_3$ . Количество  $\text{Ca}(\text{CO})_3$  составляло 24% от общей массы руды. Расчет проводили исходя из современных представлений о составе шлаке при доменном процессе для обеспечения минимальной температуры шлакообразования. Отожженную руду измельчали до фракции 0,1–1,0 мм и загружали в предварительно прогретую дровами глинобитную печь шахтного типа. Высота печи – 100 см, внутренний диаметр основания – 50 см. В качестве топлива использовали древесный уголь. Загрузку порций руды и топлива проводили каждые 5–7 мин по мере прогорания угля. Плавку продолжали 6–7 ч, за это время было израсходовано 20 кг шихты и 60 кг угля. В результате эксперимента удалось получить лишь незначительное количество металла (~10 г). Вероятными причинами столь малого металлургического выхода стали недостаточная жидкотекучесть шлака, низкая газопроницаемость ствола шахты печи, заполненной шихтой и топливом, а также малый диаметр фурмы для подачи воздуха в сочетании с большим внутренним диаметром основания печи. При проведении второго эксперимента были учтены ранее выявленные недостатки, а также осуществлено агломерирование руды. В качестве связующего вещества, исходя из возможностей древних металлургов, использовали пищевую муку растительного происхождения. Измельченные шихтовые материалы смешивали с мукой и водой, образуя тестообразную массу, которая после высыхания дробилась на куски фракцией 10–15 мм. В состав шихты было добавлено 20% окалины, образовавшейся в результате ручной кузнечной обработки. Также были внесены изменения в конструкцию самой печи: уменьшен внутренний диаметр ствола шахты, основание печи выполнено в форме чаши, увеличен внутренний диаметр фурмы для подачи воздуха. Порядок проведения эксперимента и количество используемого сырья остались прежними. В результате второго эксперимента удалось повысить эффективность процесса. Было получено около 600 г металла.

Таким образом, принятые меры по оптимизации технологии сыродутного процесса позволили увеличить металлургический выход, однако металл, полученный в результате второго эксперимента, представлял собой множество слитков неправильной формы. Это не соответствовало известным данным. Согласно археологическим данным [6,7], продуктом сыродутного процесса древних металлургов являлась крица массой 1,2–5,9 кг. Анализ известных археологических данных и современных металлургических знаний позволил сделать предположение о целесообразности использования в качестве сырья для получения первичной крицы окалины. Использование окалины вместо болотной руды в качестве сырья имеет ряд преимуществ:

- Возможность исследовать процесс восстановления чистого оксида железа без учета особенностей местных болотных руд.
- Снижение расхода топлива, так как нет необходимости в значительном количестве отшлаковывать пустую породу, содержащуюся в руде.
- Меньшее содержание вредных примесей, в первую очередь фосфора, по сравнению с болотной рудой.
- Доступность окалины по сравнению с болотной рудой в средневековом производстве.

Для дальнейших экспериментов была использована кузнечная окалина (табл. 2, рис. 1). В отличие от болотной руды она имеет более высокое содержание железа, находящегося преимущественно в оксидах. Металлические элементы, за исключением алюминия, самостоятельных оксидов не образуют и находятся в составе оксидов железа. На дифрактограмме присутствуют также следы феррита.

Таблица 2. Химический состав окалины (среднее значение трех измерений), %

Химический элемент, %						
Al	P	Cr	Mn	Ni	Cu	W
0,915	0,235	0,210	0,560	0,144	0,164	0,175

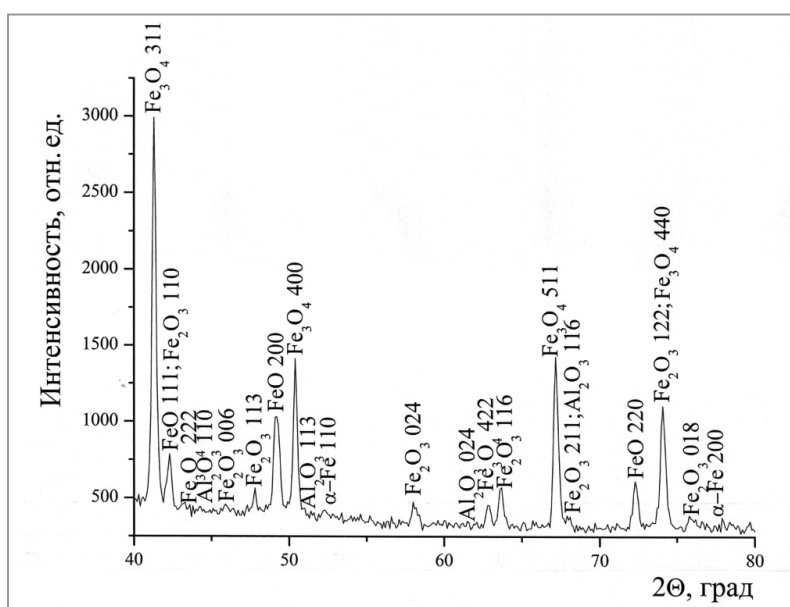


Рис. 1. Фазовый состав используемой в эксперименте окалины

Следующий эксперимент был проведен с учетом анализа результатов первых двух экспериментов. Для проведения эксперимента была изготовлена усовершенствованная глинобитная печь шахтного типа (рис. 2). Высота печи составила 58 см, внутренний диаметр основания – 30 см. В передней части печи на высоте 10 см от основания печи была монтирована керамическая фурма для подачи воздуха. Дутье обеспечивал центробежный вентилятор низкого давления и малой производительности, приводимый в движение электродвигателем с регулируемыми оборотами. Такой вентилятор позволяет моделировать воздушный поток, создаваемый примитивными воздухоподогревателями – мехами. Перед началом эксперимента печь прогревали дровами, после чего весь внутренний объем печи заполняли древесным углем. Сверху на уголь помещали порцию окалины массой 300–400 г. По мере прогорания топлива добавляли новую порцию угля и окалины. Всего было израсходовано 10 кг окалины и 20 кг древесного угля. Общее время продолжительности эксперимента – 4 ч. По окончании плавки переднюю часть печи



Рис. 2. Глинобитная печь шахтного типа, изготовленная на основе археологических источников



разламывали, горновую крицу извлекали клещами и повергали предварительной кузнечной обработке. Задача предварительной кузнечной обработки состояла в том, чтобы по возможности уплотнить горячую крицу и удалить наиболее крупные куски налипшего шлака. Общая масса полученной горновой крицы составила 4 кг. Полученная горновая крица представляла собой ком губчатого железа, сильно загрязненный неметаллическими включениями (рис. 3).



Рис. 3. Горновая крица, полученная в эксперименте. Внешний вид и разрез

Как известно из археологических данных, стальной полуфабрикат, полученный в сыродутной металлургической печи (горновая крица), не являлся готовым сырьем для производства металлических изделий. Сырьем для кузнечного производства служила заготовка из рафинированного металла – товарная крица [8]. Горновая крица имеет большое количество пор, неметаллических включений, существенную неравномерность распределения углерода и примесей по сечению слитка. Это обусловлено тем, что максимальная температура при сыродутном процессе не превышает 1420 °С [9]. В рамках проводимых исследований были выполнены работы по кузнечной обработке горновой крицы. Следует отметить, что данный аспект доиндустриального производства железа мало освещен в литературе. Было высказано и экспериментально проверено предположение о возможности рафинирования горновой крицы методом многократной кузнечной сварки. Передел горновой крицы в товарную осуществляли многократной кузнечной сваркой с предварительным разделением первоначальной заготовки на несколько фрагментов. Этот процесс сопровождался значительным угаром металла. Этапы кузнечной обработки, реализованные в эксперименте, приведены на рис. 4.

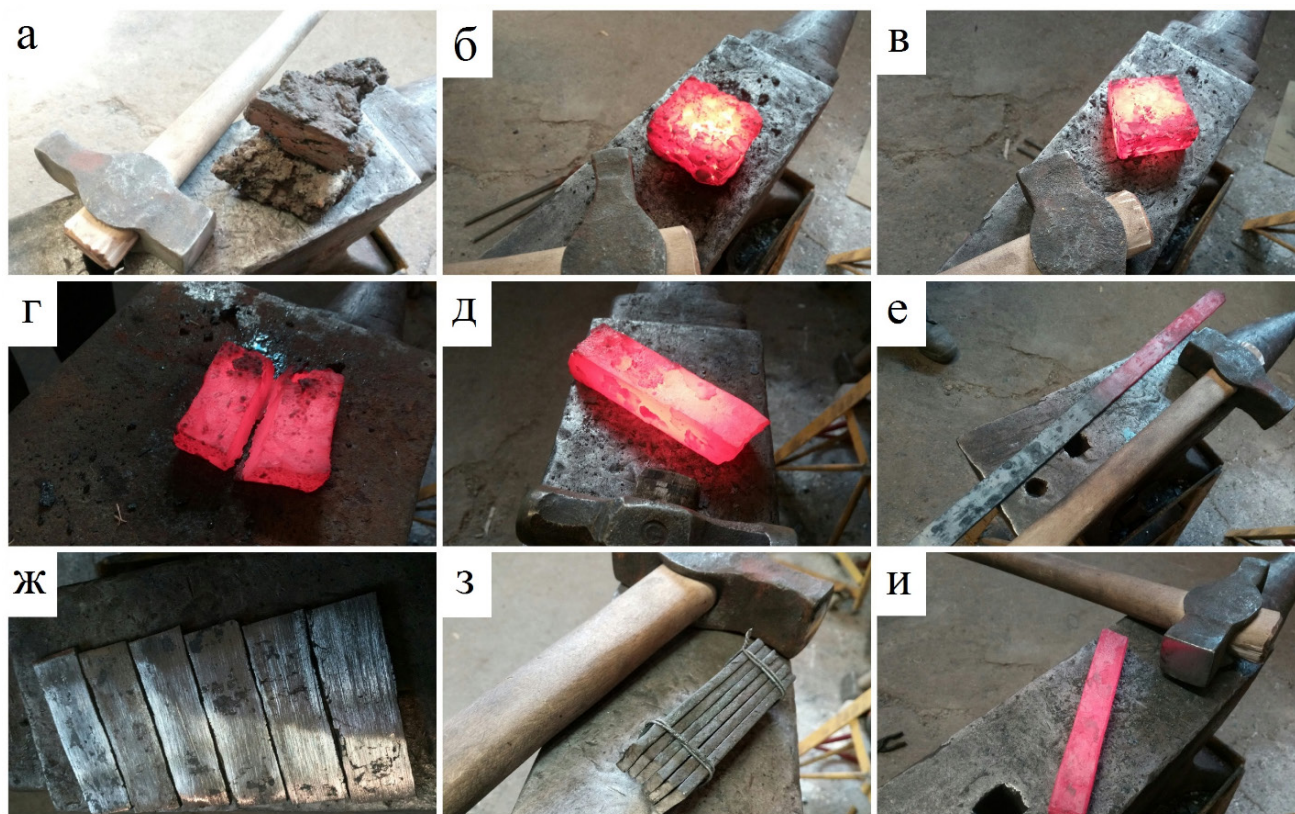


Рис 4. Технологические этапы кузнечной обработки крицы:

- а – горновая крица; б, в – формирование поковки правильной формы; г, ж – разделение поковки на части; д – поковка после соединения частей кузнечной сваркой; е – поковка, вытянутая в полосу; з – 6 частей поковки, подготовленные к соединению кузнечной сваркой; и – заготовка из рафинированного металла

Исходная масса обрабатываемого фрагмента горновой крицы составляла 0,7 кг, после кузнечной обработки – 0,35 кг. Значительные потери массы обусловлены удалением шлака и других неметаллических включений, а также угаром металла при нагреве дляковки и кузнечной сварки. В процессе кузнечной обработки у заготовки формируется характерная волокнистая макроструктура (рис. 5). Чем больше количество частей, на которые разделена исходная поковка, тем выше вероятность вскрыть все пустоты, заполненные неметаллическими включениями, что позволяет механически удалить данные включения в процессе горячей деформации металла и впоследствии заварить очищенные пустоты. В процессе многократной кузнечной сварки и высокотемпературных рекристаллизационных процессов активизируются диффузионные процессы, происходит частичная или полная гомогенизация по углероду, примесям, что позволяет получить более однородный химический состав по сечению поковки. С увеличением количества циклов кузнечной сварки и соответственно разделений на части поковки происходит более полное рафинирование металла. Вместе тем, подобная технология рафинирования связана с потерями металла из-за угара при большом количестве нагревов. Таким образом, экспериментально было подтверждено, что от характера кузнечной обработки горновой крицы напрямую зависят свойства металла, полученного сыродутным способом по доиндустриальной технологии.

В результате выполненных работ была получена кузнечная крица высокоуглеродистой стали (табл. 3). Кузнечное рафинирование позволило несколько уменьшить количество оксидов алюминия и предположительно сульфидов марганца. Остальные легирующие элементы остались на уровне примесей. Содержание фосфора хорошо коррелирует с данными табл. 2. Это подтверждает известные данные об ограниченных возможностях кузнечного рафинирования. Сравнительный анализ полученных результатов и данных М.Ф. Гурина [7] позволяет полагать, что полученная сталь близка по составу к высокоуглеродистым вставкам трехполосных ножей Полоцкой земли (рис. 6).

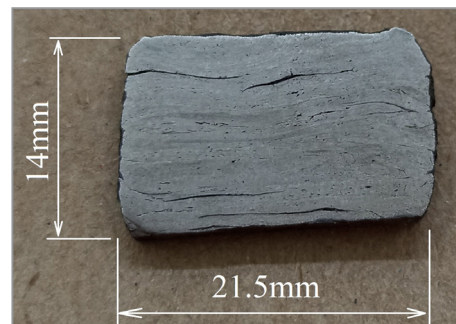


Рис. 5. Макроструктура рафинированного металла после травления

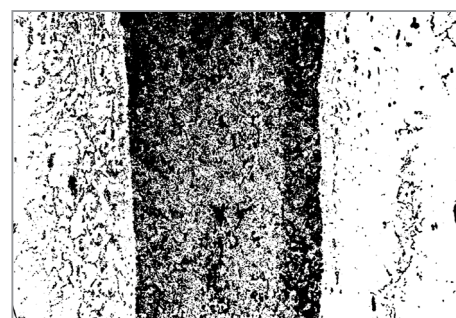


Рис. 6. Микроструктура трехполосного ножа Полоцкой земли [7]. x 80

Таблица 3. Химический состав металла, полученного экспериментальным путем (среднее значение четырех измерений), %

Химический элемент, %							
C	Al	P	Cr	Mn	Ni	Cu	W
0,927	0,577	0,253	0,092	0,120	0,139	0,367	0,508

### Выводы

Проведена металлургическая реконструкция доиндустриального сыродутного способа получения углеродистых сталей на базе известных археологических данных. Экспериментально доказана несостоятельность упрощенных представлений о металлургической культуре производства железа в этот период на территории современной Беларуси. Примитивное описание доиндустриального металлургического процесса в отечественной исторической литературе, формализованное до процесса загрузки руды и топлива в печь, не соответствует действительности. Понижение температуры жидкотекучести шлака и обеспечение высокой газопроницаемости шихты представляются наиболее проблемными вопросами в гипотетическом «примитивном» сыродутном процессе.

Есть основания полагать, что анализируемые процессы получения стального полуфабриката в доиндустриальный период имели более сложный многостадийный характер, чем принято считать. Экспериментально подтверждена возможность частичного обогащения руды в этот период доступными приемами. Подтверждена эффективность агломерирования.

Экспериментально подтверждена гипотеза о возможном применении древними металлургами технологии переработки отходов кузнечного производства. Установлено, что окалина эффективно восстанавливается до металлического железа в реконструированной доиндустриальной сыродутной печи



шахтного типа. Для восстановления окалина требуется меньше топливно-энергетических затрат по сравнению с рудой. Добавление окислы в состав шихты существенно повышает эффективность и металлургический выход.

Была выполнена пионерная реконструкция кузнечного рафинирования полученной горновой крицы. В процессе кузнечного рафинирования масса горновой крицы снижается до 50%. В результате выполненных работ была получена кузнечная крица высокоуглеродистой стали. Кузнечное рафинирование позволило несколько уменьшить количество оксидов алюминия, сульфидов марганца. Полученная сталь близка по составу к высокоуглеродистым вставкам орудий доиндустриального периода на территории современной Беларуси.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Лявданский, А. Н.** Да гісторыі жалезнага промыслу на Палес'сі. Рудні і месцазнаходжаньні руды. Менск, 1933.
2. **Гурин, М. Ф.** Древнее железо Белорусского Поднепровья (I тысячелетие н.э.) / М. Ф. Гурин. Минск: Наука и техника, 1982. 126 с.
3. **Киштымов, А. Л.** Урал и судьбы черной металлургии Беларуси в XIX в. // Развитие металлургического производства на Урале: сб. докл. и сообщений историко-экономической секции Международного конгресса, посвященного 300-летию металлургии Урала и России. Екатеринбург: Академкнига, 2001. С. 70–76.
4. **Сидорович, В. Е.** Naliboki Forest: Historical outline and ethnographical sketch. CHATYRY CHVERCI, 2016. 367 p. (in English).
5. **Саганович, Г. Н.** Кузнечное ремесло Белоруссии XIV–XVIII вв.: дис. ... канд. ист. наук. Киев, 1989.
6. **Колчин, Б. А.** Черная металлургия и металлообработка в древней Руси (домонгольский период). М.: Изд-во АН СССР, 1953. 259 с.
7. **Гурин, М. Ф.** Кузнечное ремесло Полоцкой земли. IX–XIII вв. / М. Ф. Гурин. Минск: Наука и техника, 1987. 151 с.
8. **Наумов, А. Н.** Черная металлургия и железообработка на сельских памятниках Куликова поля в конце XII – середине XIV вв.: дис. ... канд. ист. наук. М., 2004. 295 с.
9. **Adam Thiele.** Smelting experiments in the early medieval fajszi-type bloomery and the metallurgy of iron bloom // Mechanical Engineering. January 2010.

#### REFERENCES

1. **Ljavidanskij A. N.** *Da gistoryi zhaleznaга promyslu na Pales'si. Rudni i mescaznahodzhan'ni rudy* [The history of the iron industry in Polesie. Mines and ore locations]. Mensk, 1933.
2. **Gurin M. F.** *Drevnee zhelezo Belorusskogo Podneprov'ja (I tysjacheletie n. je.)* [Ancient iron of the Belarusian Dnieper region (1st millennium AD)]. Minsk, Nauka i Tehnika Publ., 1982. 126 p.
3. **Kishtymov A. L.** *Ural i sud'by chernoj metallurgii Belarusi v XIX v.* [The Urals and the fate of the ferrous metallurgy of Belarus in the 19th century]. Razvitie metallurgicheskogo proizvodstva na Urale. Sb. dokladov i soobshhenij istoriko-jekonomicheskoy sekcii Mezhdunarodnogo kongressa, posvjashhennogo 300-letiju metallurgii Urala i Rossii. Ekaterinburg, Akademkniga Publ., 2001, pp. 70–76.
4. **Sidorovich V. E.** Naliboki Forest: Historical outline and ethnographical sketch – CHATYRY CHVERCI, 2016. 367 p. (in English).
5. **Saganovich G. N.** *Kuznechnoe remeslo Belorussii XIV–XVIII vv. Diss. kand. ist. nauk* [Blacksmith's craft of Belarus XIV–XVIII centuries. Kand. ist. sci. diss]. Kiev, 1989.
6. **Kolchin B. A.** *Chernaja metallurgija i metalloobrabotka v drevnej Rusi (Domongol'skij period)* [Ferrous metallurgy and metalworking in ancient Russia (Pre-Mongol period)]. Moscow, Izd-vo AN SSSR Publ., 1953. 259 p.
7. **Gurin M. F.** *Kuznechnoe remeslo Polockoj zemli. IX–XIII vv.* [Blacksmith craft of the Polotsk land. IX–XIII centuries]. Minsk, Nauka i Tehnika Publ., 1987. 151 p.
8. **Naumov A. N.** *Chernaja metallurgija i zhelezoobrabotka na sel'skih pamjatnikah Kulikova polja v konce XII – seredine XIV vv. Diss. kand. ist. nauk* [Ferrous metallurgy and iron processing on the rural monuments of the Kulikovo field at the end of the XII – the middle of the XIV centuries. Kand. ist. sci. diss.]. Moscow, 2004. 295 p.
9. **Adam Thiele.** Smelting experiments in the early medieval fajszi-type bloomery and the metallurgy of iron bloom. Article in Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering. January 2010.