Епимахов А.В., Куприянова Е.В., Хоммель П., Хэнкс Б.К. От представлений о линейной эволюции к мозаике культурных традиций (бронзовый век Урала в свете больших серий радиоуглеродных дат) // Куприянова Е.В. (отв. ред.). Древние и традиционные культуры во взаимодействии со средой обитания: проблемы исторической реконструкции. Мат. I Междунар. междисципл. конф. Челябинск: ЧелГУ, 2021. С. 7–29.

Кузьминых С. В., Черных Е.Н. Спектроаналитическое исследование металла бронзового века лесостепного Притоболья // Потемкина Т.М. Бронзовый век лесостепного Притоболья. М.: Наука, 1985. С. 346–367.

Молодин В.И., Епимахов А.В., Марченко Ж.В. Радиоуглеродная хронология эпохи бронзы Урала и юга Западной Сибири: принципы и подходы, достижения и проблемы // Вестник НГУ. Серия: История, филология. 2014. Т. 13. Вып. 3: Археология и этнография. С. 136–167.

Потемкина Т.М. Бронзовый век лесостепного Притоболья. М.: Наука, 1985. 376 с.

Черных Е.Н. История древнейшей металлургии Восточной Европы / Материалы и исследования по археологии № 132. М.: Наука, 1966. 144 с.

Черных Е.Н., Луньков В.Ю. Методика рентгено-флуоресцентного анализа меди и бронз в лаборатории Института археологии // Черных Е.Н. (отв. ред.). Аналитические исследования лаборатории естественнонаучных методов. Вып. 1. М.: Ин-т археологии РАН, 2009. С. 78–83.

Artemyev D.N., Ankushev M.N. Trace Elements of Cu-(Fe)-Sulfide Inclusions in Bronze Age Copper Slags from South Urals and Kazakhstan: Ore Sources and Alloying Additions // Minerals. 2019. 9 (12), 746.

Doonan R. Compositional analyses of metalwork from Stepnoye VII cemetery and kurgan 4 Stepnoye I сеmetery // Куприянова Е.В., Зданович Д.Г. Древности лесостепного Зауралья: могильник Степное VII. Челябинск: Энциклопедия, 2015. С. 188–194.

И.А. Русанов ¹, Н.Б. Виноградов² I.A. Rusanov, N.B. Vinogradov

¹Челябинский государственный университет, г. Челябинск ²Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет, г. Челябинск, vinogradov n@mail.ru

Реконструкция технологического процесса выплавки меди из руды на укрепленном поселении Устье I (по образцам металлургического шлака)

Reconstruction of the copper smelting technological process at the Ustye I fortified settlement (based on metallurgical slag samples)

Работа, по сути, является частью обширной авторской программы по реконструкции металлургического процесса в рамках сообщества укрепленных поселений бронзового века Зауралья (укрепленные поселения Синташта I, Аркаим) и содержит базу данных по реконструкции металлургического процесса в горнах укрепленного поселения бронзового века Устье I через изучение особенностей металлургических шлаков из раскопок этого памятника (измерение параметров отпечатков слитков на шлаках укрепленного поселения Устье I, вычисление параметров слитков: диаметр, толщина, объем, масса слитка металла, получаемого за одну плавку; массы загрузки шихты на одну усредненную и на максимальную плавку, массы применявшихся в плавку флюсов). По формам венчиков и закраин фрагментов шлаковых «лепешек» создана классификация вариантов профилей их венчиков. Описаны образцы шлака по степени их магнитности, цвету,

степени пористости, количеству нерасплавленных включений в шлаке. В рамках исследования был выявлен ряд параметров, позволяющих провести достоверную статистическую обработку образцов шлака.

The paper, in fact, is part of an extensive author's program for the reconstruction of the metallurgical process within the community of fortified settlements of the Bronze Age of the Trans-Urals (fortified settlements of Sintashta I, Arkaim) and contains a database on the reconstruction of the metallurgical process in the furnaces of the fortified settlement of the Bronze Age Ustye I through the study of the features of metallurgical slags from the excavations of this monument (measuring the parameters of ingot prints on the slags of the fortified settlement Ustye I, calculating the parameters of ingots: diameter, thickness, volume, mass of a metal ingot obtained in one melting; charge loading weights for one averaged and maximum melting, the masses of fluxes used in melting. According to the shapes of corollas and edges of fragments of slag "cakes", a classification of variants of the profiles of their corollas has been created. Slag samples are described according to their degree of magnetism, color, degree of porosity, and the number of non-molten inclusions in the slag. As part of the study, a number of parameters were identified that allow for reliable statistical processing of slag samples.

Судьба отмерила Игорю Алексеевичу Русанову чуть больше полувека и остановила его сердце в начале августа 2014 года. Если кратко охарактеризовать его, то это будет словосочетание, не побоюсь его произнести, «гениальный самородок». Мой многолетний преподавательский опыт свидетельствует: такие люди появляются не благодаря разнообразным обстоятельствам, а вопреки им. «Уроженец» классического ЧелГУ, он остался работать в археологической лаборатории университета. Своей специализацией избрал древнее металлопроизводство бронзового века, особенности металлургического процесса в этот период древней истории края [Григорьев, Русанов, 1995; Русанов, 2011].

В начале наступившего тысячелетия наши с ним контакты резко участились. Игорь Алексеевич много работал в лаборатории с нашими богатыми фондами по древнему металлопроизводству, полученными в ходе раскопок укрепленного поселения бронзового века Устье I [Древнее..., 2013]. Особенно его привлекали обломки «лепешек» металлургического шлака. Мы много общались, и я поражался той оригинальности его мышления и понимания обсуждаемой проблематики, которую демонстрировал Игорь Алексеевич! Касалось ли это конструктивных особенностей теплотехнических устройств, топлива для металлургических горнов, восстановленных им изысков технологии получения меди (реконструированные им «травяные «венчики» или вид топлива, например) – не суть важно! Он всегда был оригинален в суждениях. Он, в частности, не без оснований полагал, что даже визуальное обследование обломков металлургического шлака позволит дешифровать этапы и особенности технологического процесса получения металла. Этот текст должно считать преамбулой к не дождавшейся публикации рукописи И.А. Русанова, посвященной исследованию металлургических шлаков из раскопок укрепленного поселения Устье І. Внесенные незначительные правки касаются стиля, но не содержательной стороны.

В рамках поставленной задачи — реконструкции технологического процесса получения меди на поселении Устье I, исследовались шлаки из раскопок этого памятника.

Было проведено измерение параметров отпечатков слитков на шлаках укрепленного поселения Устье I, вычислены параметры слитков: диаметр, толщина, объем, масса слитка металла, получаемого за одну плавку (табл. 1). Вычислены массы загрузки шихты на одну усредненную и на максимальную плавку, массы применявшихся в плавку флюсов. Описаны формы венчиков и закраин фрагментов шлаковых «лепешек». Сделана классификация вариантов профилей венчиков шлаковых «лепешек». Описаны об

 $\begin{tabular}{l} $\it Taблицa\ 1$ \\ $\it \Pi$ араметры\ cлитков\ меди,\ paccчитанные\ пo\ otneчatkam\ нa\ металлургических \\ $\it шлаках\ nocenehus\ Устье\ I$ \\ \end{tabular}$

W W													
Шифр	№	Диа- метр,	Толщи-	Объем,	Mac-	Macca	Шифр	№	Диа- метр,	Толщи-	Объем,	Macca,	Macca
161У	31=	CM	на, см	CM ³	са, г	руды, г	шифр	312	CM	на, см	CM ³	Γ	руды, г
3066	1.6	14	0.9	138.54	1177.6	2066.0	9709	13.5	18	1	254.47	2163.0	3794.7
1391	3.1	14	0.8	123.15	1046.8	1836.5	9412	13.6	19	1.2	340.23	2892.0	5073.7
3068	3.5	6	0.6	16.96	144.2	253.0	9199	13.9	10	1	78.54	667.6	1171.2
5127	3.8	9	0.8	50.89	432.6	758.9	9324	13.10	10	0.9	70.69	600.8	1054.1
3290	3.9	16	0.9	180.96	1538.1	2698.5	9618	13.13	8	0.6	30.16	256.4	449.7
167	3.10	16	1.1	221.17	1879.9	3298.1	9343	13.14	13	0.9	119.46	1015.4	1781.4
(7,3) 5128	3.12	16	0.8	160.85	1367.2	2398.6	9619	13.21	9	0.9	57.26	486.7	853.8
3265	3.12	14	0.8	138.54	1177.6	2066.0	10282	13.21	10	0.9	62.83	534.1	937.0
4485	4.1	7		42.33	359.8	631.3	9630	13.22	15	0.8	123.70	1051.5	1844.7
		9	1.1						6				
1545	4.2	_	0.9	57.26	486.7	853.8	10472	13.24		0.9	25.45	216.3	379.5
5312	5.1	8	0.9	45.24	384.5	674.6	10451	13.25	19	1.1	311.88	2651.0	4650.9
1389	5.4	11	0.9	85.53	727.0	1275.4	10084		6	1	28.27	240.3	421.6
2042	5.5	12	1	113.10	961.3	1686.5	10066		6	1.3	36.76	312.4	548.1
5312	5.6	9	0.9	57.26	486.7	853.8	9187	13.36	6	1.2	33.93	288.4	506.0
5310	5.7	10	0.9	70.69	600.8	1054.1	10056	13.37	17	1	226.98	1929.3	3384.8
5311	5.8	6	0.9	25.45	216.3	379.5	10178	14.2	18	0.8	203.58	1730.4	3035.8
1493	5.11	6	0.9	25.45	216.3	379.5	10234	14.4	10	0.8	62.83	534.1	937.0
1597	5.15	17	1	226.98	1929.3	3384.8	10159	14.7	11	1.1	104.54	888.6	1558.9
3261	5.17	15	1.4	247.40	2102.9	3689.3	9426	14.8	10	0.9	70.69	600.8	1054.1
2560	5.18	16	0.9	180.96	1538.1	2698.5	9393	14.9	17	1.3	295.07	2508.1	4400.2
2852	5.19	19	0.9	255.18	2169.0	3805.3	10176	14.10	17	0.8	181.58	1543.5	2707.8
3261	5.22	11	1	95.03	807.8	1417.2	10232	14.13	19	0.7	198.47	1687.0	2959.6
2589	5.23	7	1.2	46.18	392.5	688.7	10177	14.16	14	0.9	138.54	1177.6	2066.0
2044	6.1	20	1.1	345.58	2937.4	5153.3	10377	14.26	11	0.9	85.53	727.0	1275.4
1674	6.9	7	1.1	42.33	359.8	631.3	10696	14.28	16	0.9	180.96	1538.1	2698.5
1929	6.10	10	1.1	86.39	734.3	1288.3	10409	14.36	16	0.8	160.85	1367.2	2398.6
7587	6.12	12	1.4	158.34	1345.9	2361.2	10343	14.37	15	0.8	141.37	1201.7	2108.2
2043	6.13	12	1.1	124.41	1057.5	1855.2	10289	14.38	14	0.9	138.54	1177.6	2066.0
6305	6.15	20	1.2	376.99	3204.4	5621.8	10255	14.39	8	0.9	45.24	384.5	674.6
1306	7.3	12	1	113.10	961.3	1686.5	10410	14.41	16	0.9	180.96	1538.1	2698.5
1300	7.4	19	1	283.53	2410.0	4228.1	10007	14.47	15	0.8	141.37	1201.7	2108.2
5110	7.5	10	1	78.54	667.6	1171.2	10378	14.51	10	0.7	54.98	467.3	819.8
6008	7.7	6	0.9	25.45	216.3	379.5	9338	14.52	17	0.8	181.58	1543.5	2707.8
2041	7.8	19	1.2	340.23	2892.0	5073.7	9466	14.53	6	1	28.27	240.3	421.6
1475	7.11	19	1	283.53	2410.0	4228.1	10058	14.54	11	0.8	76.03	646.2	1133.7
1490	7.12	11	1.1	104.54	888.6	1558.9	9366	14.55	11	1.3	123.54	1050.1	1842.3
1292	7.13	18	1		2163.0	3794.7		14.56	18	0.9	229.02	1	i i
1639	7.16	19	1.1	311.88		4650.9	10773		17	0.8	181.58		2707.8
6827	7.18	17	0.9	204.28		3046.3	10279		8	0.8	40.21	341.8	599.7
6979	7.19	18	1.3	330.81	2811.9	4933.1	10650		15	1	176.71	1502.1	2635.2
8216	7.20	18	1.2		2595.6	4553.7	10847		5	0.8	15.71	133.5	234.2
7730	7.20	19	0.9	255.18	2169.0	3805.3	10717		9	0.8	31.81	270.4	474.3
7722	7.21	12	1.2	135.72	1153.6	2023.8	10617		8	0.9	45.24	384.5	674.6
		20	1.3	408.41	3471.5	6090.3	9986	15.14				1879.9	3298.1
54(46)	7.24	1		!					16	1.1	221.17	1	!!
5910	7.27	12	0.6	67.86	576.8	1011.9	10131	15.17	18	0.8	203.38	1/30.4	3035.8

Шифр	№	Диа- метр,	Толщи-	Объем,	Mac-	Macca	Шифр	№	Диа- метр,	Толщи-	Объем,	,	
161У		CM	на, см	CM ³	са, г	руды, г	TI		CM	на, см	CM ³	Γ	руды, г
3357	7.32	14	0.9	138.54	1177.6	2066.0	9928	15.18	16	0.7	140.74	1196.3	2098.8
6141	7.33	18	1	254.47	2163.0	3794.7	10675	16.9	13	0.9	119.46	1015.4	1781.4
6149	7.34	6	1.1	31.10	264.4	463.8	10651	16.10	17	0.9	204.28	1736.4	3046.3
-	7.36	18	1.2	305.36	2595.6	4553.7	10868	16.11	18	0.9	229.02	1946.7	3415.2
4821	8.3	19	1	283.53	2410.0	4228.1	10772	16.16	17	0.9	204.28	1736.4	3046.3
4820	8.5	17	0.8	181.58	1543.5	2707.8	10655	16.18	10	0.9	70.69	600.8	1054.1
7733	8.6	8	0.9	45.24	384.5	674.6	10719	16.20	16	1.1	221.17	1879.9	3298.1
6456	8.9	14	1	153.94	1308.5	2295.6	10379	16.24	18	0.9	229.02	1946.7	3415.2
6452	8.12	9	1.1	69.98	594.8	1043.5	10779	16.26	10	0.8	62.83	534.1	937.0
7736	8.15	16	1.3	261.38	2221.7	3897.8	10860	16.30	12	0.9	101.79	865.2	1517.9
5123	8.18	18	0.9	229.02	1946.7	3415.2	10831	16.31	14	1	153.94	1308.5	2295.6
9448	8.21	19	1	283.53	2410.0	4228.1	10762	16.36	16	1.2	241.27	2050.8	3598.0
6828	8.27	6	1	28.27	240.3	421.6	10913	16.38	8	0.9	45.24	384.5	674.6
7703	8.28	13	0.9	119.46	1015.4	1781.4	10250	16.43	6	1	28.27	240.3	421.6
8089	8.29	13	0.9	119.46	1015.4	1781.4	10083	16.50	9	0.8	50.89	432.6	758.9
10352	8.30	11	0.9	85.53	727.0	1275.4	10621	16.52	6	1	28.27	240.3	421.6
8438	10.1	14	1	153.94	1308.5	2295.6	10023	16.58	17	0.8	181.58	1543.5	2707.8
9246	11.4	13	0.9	119.46	1015.4	1781.4	10236	16.60	20	0.7	219.91	1869.2	3279.4
9938	11.11	13	0.9	119.46	1015.4	1781.4	10099	16.63	9	0.9	57.26	486.7	853.8
9925	11.13	13	0.7	92.91	789.8	1385.5	10613	16.66	14	0.9	138.54	1177.6	2066.0
9893	11.17	16	0.9	180.96	1538.1	2698.5	10886	17.2	7	0.8	30.79	261.7	459.1
9939	11.19	12	1.3	147.03	1249.7	2192.5	10630	17.5	9	0.8	50.89	432.6	758.9
9094	11.21	12	1	113.10	961.3	1686.5	10928	17.7	7	0.7	26.94	229.0	401.7
9233	11.23	15	1	176.71	1502.1	2635.2	10864	17.11	16	0.9	180.96	1538.1	2698.5
9234	11.25	9	0.9	57.26	486.7	853.8	10865	17.12	8	0.9	45.24	384.5	674.6
9616	13.1	19	1.1	311.88	2651.0	4650.9	10723	17.13	7	0.9	34.64	294.4	516.5
9284	13.2	8	1	50.27	427.3	749.6	10716	17.16	9	0.8	50.89	432.6	758.9

разцы шлака по степени их магнитности, цвету, степени пористости, количеству нерасплавленных включений в шлаке. В рамках исследования был выявлен ряд параметров, позволяющих провести достоверную статистическую обработку образцов шлака. Выделены группы шлаковых образцов для проведения спектрального и минералогического анализов. Особое внимание было уделено выявлению и описанию характера отпечатков на поверхностях образцов шлака, выяснению причин появления отпечатков.

Полученные данные мы сопоставляли с результатами экспериментальных работ 2002–2007 гг. Некоторые аспекты технологического процесса получения меди, обнаруженные в ходе обработки металлургического шлака, были специально проверены в ходе дополнительных полевых экспериментов осенью 2007 г.

Для вычисления количества загружаемой шихты и получаемой за одну плавку меди из коллекции шлака были выбраны образцы, наиболее пригодные для необходимых замеров. Для большей достоверности результатов, при проведении расчетов мы привлекали средние, а в некоторых случаях и минимальные значения замеров.

Средняя загрузка руды в плавку на укрепленном поселении Устье I составляла 2–3 кг малахита, средняя масса получаемого слитка составляла 1–1.5 кг, причем на исследованных других памятниках синташтинской культуры соответственно 1.1–1.3 кг руды и 0.6–0.65 кг меди (табл. 2).

Средние параметры слитков меди, рассчитанные по отпечаткам
на металлургических шлаках поселений Устье I, Аркаим и Синташта

Поселение	Диаметр, см	Толщина, см	Объем, см ³	Масса, г	Масса руды, г	
Устье I	12.9	0.95	140.59	1195.0	2096.5	
Аркаим, Синташта (вместе)	11.15	0.8	89.6	761.6	1336.2	

Осмотр поверхности археологических шлаков выявил наличие на нижней поверхности отпечатков травы из семейства злаковых (ковыль, вейник, колосняк) и сложноцветных (полынь). В некоторых отпечатках были найдены хорошо сохранившиеся угольки травы. Отпечатки конского навоза присутствовали на верхней плоскости шлаковой «лепешки». Кроме того, было обнаружено небольшое количество отпечатков фрагментов шишек и кусочков древесного угля. Эксперименты показали, что при использовании в качестве топлива сосновых шишек и простого хвороста достигается температура выше 1600 °. Вследствие этого выдвинуто предположение, что навоз, шишки (степные боры), хворост использовались в качестве топлива при металлургической плавке, что достаточно актуально в условиях степи.

Массовость и четкая локализация отпечатков травы по нижнему краю венчика шлаковой лепешки свидетельствуют о целенаправленном использовании травы древними металлургами.

Отпечатки травы покрывают края шлаковых лепешек со стороны пода печи. Четкие отпечатки стеблей травы имели, как правило, одинаковую направленность. Это наблюдение дало возможность выдвинуть предположение о том, что трава была уложена определенным образом, скорее всего, в виде валика-венка. При этом отпечатки травы могли оказаться на шлаке только в случае целенаправленного применения влажного флюса (специальная добавка в руду для быстрого образования шлака) на этапе подготовки укладки шихты в печь.

Отпечатки на поверхности древних шлаков указывают на то, что влажный флюс, нанесенный на валик-венок из травы, исключал осыпание и раздувание руды во время дутья, растекание шлакового расплава (образовавшегося из флюса) из области максимальных температур и обнажение слитка, что могло привести к окислению меди. Назначение такой тщательной подготовки к выплавке состояло также в том, чтобы:

- во-первых, венок с флюсом четко располагать на полу металлургической печи,
 в области наибольших температур;
- во-вторых, исключить попадание руды вне области максимальных температур. Не исключено, что подобные сложности при укладке шихты в печь были подчинены некоему ритуальному смыслу, т.к. технологической роли, кроме экономии руды, они не играют, но и не разрушают текущие требования к металлургическому процессу.

Активное применение металлургами Устья I флюсовых добавок ставит под сомнение результативность исследования древних шлаков какими-либо анализами с целью выявления месторождений руды, из которой выплавлялся металл. Это нецелесообразно, т.к. спектральный анализ будет показывать состав флюсов, а не рудосодержащих пород. Элементы этих пород в общем фоне данных выявить невозможно, т.к. нам неизвестно откуда древние металлурги брали материалы для флюсов (есть археологические данные о многокомпонентности состава флюсов), которые, несомненно, тщательно готовились



Puc. Эксперименты И.А. Русанова по реконструкции металлургического процесса. Фото из архива Н.Б. Виноградова.

а $-\Gamma$ – выплавка меди из окисленной руды в рамках Летней школы экспериментальной археологии на озере Акакуль (2009 г.): а – И.А. Русанов готовит медную руду к плавке, б – измельченная окисленная медная руда, в – травяной валик-венок для нанесения влажного флюса, г – подготовленные компоненты для экспериментальной плавки, д – экспериментальные гори и мех, е – экспериментальное литье наконечника раннего железного века в составную трехчастную форму.

по определенным технологиям. Тем не менее, проведение исследования шлаков по методике С.А. Григорьева необходимо, чтобы подтвердить или опровергнуть пригодность ее применения в изучении древней металлургии.

Сложность подготовки шихты к плавке, кроме всего комплекса технологических операций древней металлургии, наличие мировоззренческих аспектов позволяет нам присоединиться к утверждению о том, что металлургия не могла быть общедоступным производством. Более того, нами выявлено экспериментальным путем и подтверждено археологическими материалами поселения Устье I, наличие в древности эксклюзивной технологии приготовления и применения флюсов.

В работе доказано, что в качестве топлива могли применяться шишки, хворост, древесная труха, навоз. Высчитаны объемы загрузки руды и получаемого металла. На основе археологических данных реконструирована и проверена экспериментальными полевыми работами (с получением медных слитков) цепочка технологического процесса получения металла применявшаяся на поселении Устье.

Судьбе было угодно свести нас с Игорем Алексеевичем и в летней полевой школе экспериментальной археологии, которую организовали для старшеклассников на озере Акакуль наши коллеги — археологи и учителя из Озерска. И здесь он продолжал эксперименты по реконструкции металлургического процесса в бронзовом веке, уже вместе с юными последователями (рис.).

Публикацию настоящей статьи, рукопись которой случайно сохранилась в моем архиве, следует рассматривать как попытку сохранить результаты трудов этого нестандартного во всем, талантливого исследователя и как дань уважения Игорю Алексеевичу Русанову.

Литература

Григорьев С.А., Русанов И.А. Экспериментальная реконструкция древнего металлургического производства // Аркаим. Исследования. Поиски. Открытия. Челябинск: «Каменный пояс», 1995. С. 147–158.

Древнее Устье: укрепленное поселение бронзового века в Южном Зауралье / Виноградов Н.Б. (отв. ред.), Епимахов А.В. (науч. ред.). Челябинск: Абрис, 2013. 482 с.

Русанов И.А. Особенности металлургии укрепленных поселений бронзового века Зауралья (по данным экспериментальных работ) // Мат. междунар. научн. конф.: «Археология Казахстана в эпоху независимости: итоги, перспективы», посвящ. 20-летию независимости Республики Казахстан и 20-летию института археологии им. А.Х. Маргулана. 12—15 декабря 2011 г., г. Алматы. Т. 1. С. 314—320.