DOI: 10.53737/2713-2021.2025.79.96.012

Т.Н. Лошакова, А.В. Паничкин

МЕТАЛЛ ПОСЕЛЕНИЯ ТОКСАНБАЙ (СЕВЕРО-ВОСТОЧНЫЙ ПРИКАСПИЙ)*

Материалы, впервые публикуемые в настоящей статье, представляют собой результаты изучения изделий из металла поселения эпохи бронзы Токсанбай. Полевые исследования, проводившиеся в течение многих лет, позволили собрать коллекцию предметов из металла. Следует указать, что практически вся коллекция изделий — это подъёмный материал со склонов останца, на котором расположено поселение. Одно из помещений содержало в себе следы плавки металла — очажную печь, тигли разной сохранности, капельки металла, но — ни одного готового изделия. Изделия изготовлены из низколегированной однофазной бронзы и загрязнены неметаллическими включениями. Температура горячей обработки отмечена в диапазоне 750—600°С. Основная технология изготовления орудий — ковка в горячем состоянии, с применением кратковременного отжига. Во многих изделиях фиксируются признаки повторной термо-механической обработки. Вся серия предметов демонстрирует устоявшуюся технологическую традицию обработки низколегированных бронз на финальном этапе производства, включавшую чередование ковки и отжига для улучшения пластичности и устранения дефектов. Технология изготовления изделий характерна для развитых металлургических центров позднего бронзового века Урало-Казахстанского региона.

Ключевые слова: Западный Казахстан, Устюрт, поселение Токсанбай, эпоха бронзы, структура металла, термо-механическая обработка, низколегированные бронзы.

Сведения об авторах: Лошакова Татьяна Николаевна[1], старший научный сотрудник Институт археологии имени А.Х. Маргулана; Паничкин Александр Владимирович[2], кандидат технических наук, АО "Институт металлургии и обогащения" НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева».

Контактная информация: [1]050010, Казахстан, г. Алматы, пр. Достык 44, Институт археологии имени А.Х. Маргулана, e-mail: loshakovat@mail.ru; [2]050010, Казахстан, г. Алматы, ул. Шевченко, 29, АО "Институт металлургии и обогащения" НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева», e-mail: abpanichkin@mail.ru, a.panichkin@satbayev.university.

Tatyana Loshakova, Alexander Panichkin

METAL OF THE TOKSANBAY SETTLEMENT (NORTH-EASTERN CASPIAN REGION)

This paper presents the first analytical results on the metal artifacts from the Bronze Age settlement of Toksanbay. Prolonged fieldwork in the area has yielded a collection of metal items, though all specimens were recovered as surface finds from the slopes of the butte where the settlement is situated. One room revealed traces of metal smelting, including a hearth furnace, crucibles of various preservation states, and metal prills, yet no finished implements. Microstructural examination revealed that the items were made of low-alloy, single-phase bronze with abundant non-metallic inclusions. Hot-working temperatures ranged between 750°C and 600°C. The main technological sequence involved hot forging combined with short annealing, with evidence of repeated thermo-mechanical processing. This assemblage reflects a stable technological tradition characteristic of advanced metallurgical centers of the Late Bronze Age in the Ural—Kazakhstan region, where alternating cycles of forging and annealing were used to enhance plasticity and remove structural defects.

* Статья подготовлена в рамках программно-целевого финансирования Комитета науки МНВО РК 2023—2025, ИРН проекта BR20280993.

Статья поступила в номер 2 октября 2025 г.
Принята к печати 16 октября 2025 г.

© Т.Н. Лошакова, А.В. Паничкин, 2025.

Key words: West Kazakhstan, Ustyurt, Toksanbay settlement, Bronze Age, metal structure, thermo-mechanical processing, low-alloy bronze.

About authors: Loshakova Tatyana[1], Senior Researcher, Margulan Institute of Archaeology; Panichkin Alexander[2], PhD in Engineering, Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation.

Contact information: [1]050010, Kazakhstan, Almaty, Dostyk Ave., 44, Margulan Institute of Archaeology, e-mail: loshakovat@mail.ru; [2]050010, Kazakhstan, Almaty, 29 Shevchenko St., Institute of Metallurgy and Ore Beneficiation JSC Satpayev University, e-mail: abpanichkin@mail.ru, a.panichkin@satbayev.university.

Введение

Полевые исследования на поселении Токсанбай (Бейнеуский р-н, Мангистауская обл.) проводились специалистами Института в течение многих лет, начиная с конца 1990-х годов (Лошакова 2020; Loshakova 2024). Публиковались материалы, отражающие не только итоги полевых изысканий, но и результаты технико-технологического анализа керамики, орудий из кости и камня, а также исследования ритуальных и жертвенных комплексов (Самашев и др. 2001; 2004; 2007; Шевнина, Лошакова 2017; Ержанова, Лошакова 2022; Лошакова, Усачук 2023).

Поселение стало эталонным памятником эпохи бронзы Северо-Восточного Прикаспия. Именно отсюда происходит самая большая коллекция изделий из металла в регионе, которая позволила выявить категории изделий, особенности их изготовления и использования. Однако все приведённые в статье металлические изделия получены в результате сбора с поверхности склонов останца, на котором расположено поселение. На поселении зафиксированы остатки металлургического производства: шлаки, обломки тиглей, дробильные инструменты. Основная часть этих находок имеет привязку к небольшому участку поселения на западном склоне. Слои, из которых происходят отходы производства, могут быть соотнесены со слоями, давшими абсолютную дату XVIII—XVII вв. до н.э. (Самашев и др. 2001). Говорить о наличии полноценного производственного участка на поселении не представляется возможным, но очевидны следы технологических процессов, связанных с металлургией. Становится ясным, что шлаки, зафиксированные здесь, получены при вторичной металлообработке, и выплавка меди из руды не производилась. Отметим, что процессы плавки и изготовления изделий из металла всегда были не только ремеслом, но и формой сакрализованной деятельности. Зоны металлургических работ на поселениях, как правило, имели обособленный характер и выделялись среди других функциональных участков по составу находок и особенностям планировки (Лошакова 2022). На поселении Токсанбай в основании стены жилища, в котором происходила переплавка металла, обнаружено ритуальное погребение человека, вероятно, связанное с представлениями о сакральной природе металлургического производства. Подобные практики, направленные на обеспечение успешности технологических процессов, известны и на других поселениях эпохи бронзы Казахстана, в частности на поселении металлургов Талдысай в Улытау (Талдысай 2020)[1], на поселениях Южного Урала, где была развита металлургия и зафиксированы погребения людей (Епимахов, Молчанов 2013; Каргалы 2002; 2005; Черных 2007; Berseneva 2023; Koryakova et al. 2011)[2].

[1] Информацию об этом памятнике см. также в ряде других публикаций: Yermolayeva et al. 2024; Ержанова и др. 2025; и др.

[2] В апреле 2019 г. в г. Берлине состоялась конференция, посвященная анализу случаев с погребениями людей на поселениях, где также были представлены материалы, полученные при изучении поселения Токсанбай (подробнее см.: Лошакова 2019; Берсенева и др. 2019).

Материал и методы исследования

Методика исследований

В предлагаемой статье впервые в научный оборот вводятся результаты изучения структуры металлических изделий с поселения Токсанбай. Представленные ниже результаты и выводы получены в Институте металлургии и обогащения НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева», где проводились исследования.

В рамках проведённых исследований изучена микроструктура семи образцов бронзовых артефактов. Для этого из шести образцов были подготовлены шлифы в продольном и поперечном сечении. Один образец не подвергался разрушению, на его поверхности был подготовлен продольный шлиф. Шлифы подготавливали по классической технологии. Вырезанные образцы заливали в эпоксидную смолу и затем их шлифовали, применяя абразивную бумагу, последовательно увеличивая номер абразива. После этого их подвергали полировке на алмазных пастах с различной дисперсностью абразива.

Исследование структуры проводили на металлографической рабочей станции на базе инвертированного микроскопа LeicaDMIRM при увеличениях от 50 до 1500 крат. Неметаллические включения изучали до травления, структуру металла исследовали после травления. Для выявления структуры использовали несколько растворов. Состав раствора № 1: 10 г $FeCl_2$, 0,1 г $SnCl_2$, 1 г $CuCl_2$, 100 мл HCl. Состав раствора № 2: концентрированная соляная кислота. Травление проводили путем натирания ватным тампоном.

При исследовании структуры металла оценивали форму зёрен, наличие двойников и дислокационной сетки. При анализе неметаллических включений рассматривали цвет, форму и распределение включений, наличие трещин. Основываясь на результатах исследования микроструктуры и закономерностях изменения структуры меди после пластической деформации при различных температурах, представленных в работах (Zolotorevsky et al. 2023; Chen et al. 2023), делали выводы о режимах термической обработки и условиях обработки давлением.

Характеристика материала и полученные результаты

Образец № 1 — бронзовый нож, происходит с юго-восточного склона останца (рис. 1)[3]. Поверхность ножа покрыта слоем патины (толщиной 0,2—0,4 мм) с рыхлой структурой. На рисунке 1 красным выделено место подготовки шлифа. Шлиф подготавливался в продольном сечении без разрушения образца. В структуре ножа выявлены дисперсные неметаллические оксидные, сульфидные включения и поры (рис. 2). Размер неметаллических включений не превышает 30 мкм.

[3] Все фотографии выполнены А.В. Паничкиным. Благодарим М.А. Антонова за помощь в подготовке иллюстративного материала к публикации.

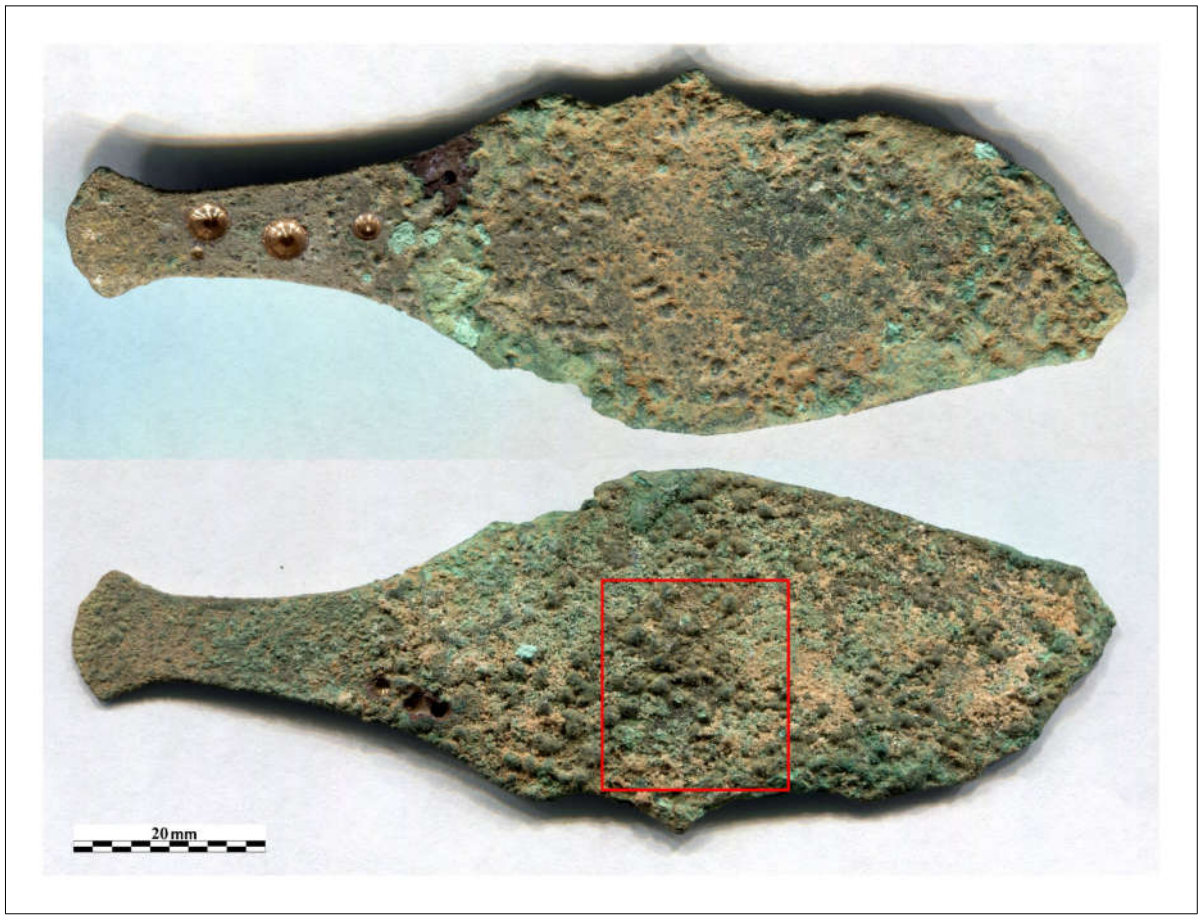

Рис. 1. Поселение Токсанбай. Бронзовый нож.

Fig. 1. Toksanbay settlement. Bronze knife.

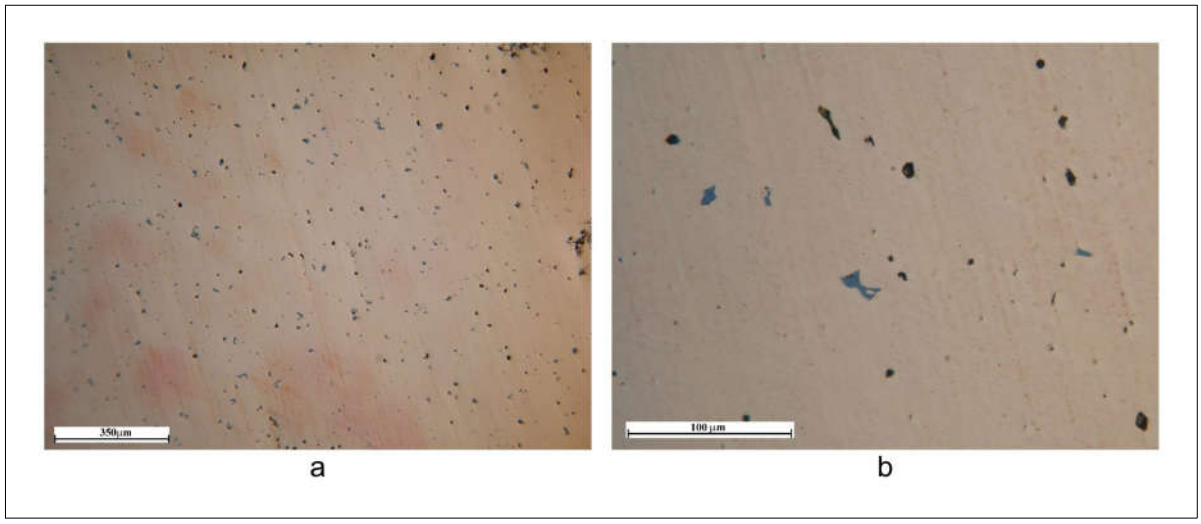

Рис. 2. Поселение Токсанбай. Неметаллические включения в структуре бронзы бронзового ножа: *a* — сульфидные включения и поры, *b* — сульфидные включения (увеличение: а — ×100; б — ×500).

Fig. 2. Toksanbay settlement. Non-metallic inclusions in the bronze structure of the knife: *a* — sulfide inclusions and pores; *b* — sulfide inclusions (Magnification: a — ×100; b — ×500).

Микроструктура ножа однофазная, в продольном сечении образована равноосными зёрнами полиэдрической формы (рис. 3). В пределах исследуемой площади размер зёрен однородный и составляет 20—80 мкм. Форма зёрен характерная для низколегированной бронзы после пластической деформации в горячем состоянии при 750—600°С и отжига при 450—600°С. После отжига поверхность ножа подвергалась несущественной пластической деформации при помощи бойка с неровной поверхностью, что вызвало деформацию зёрен на локальных участках с формированием дислокационной сетки (рис. 3: b).

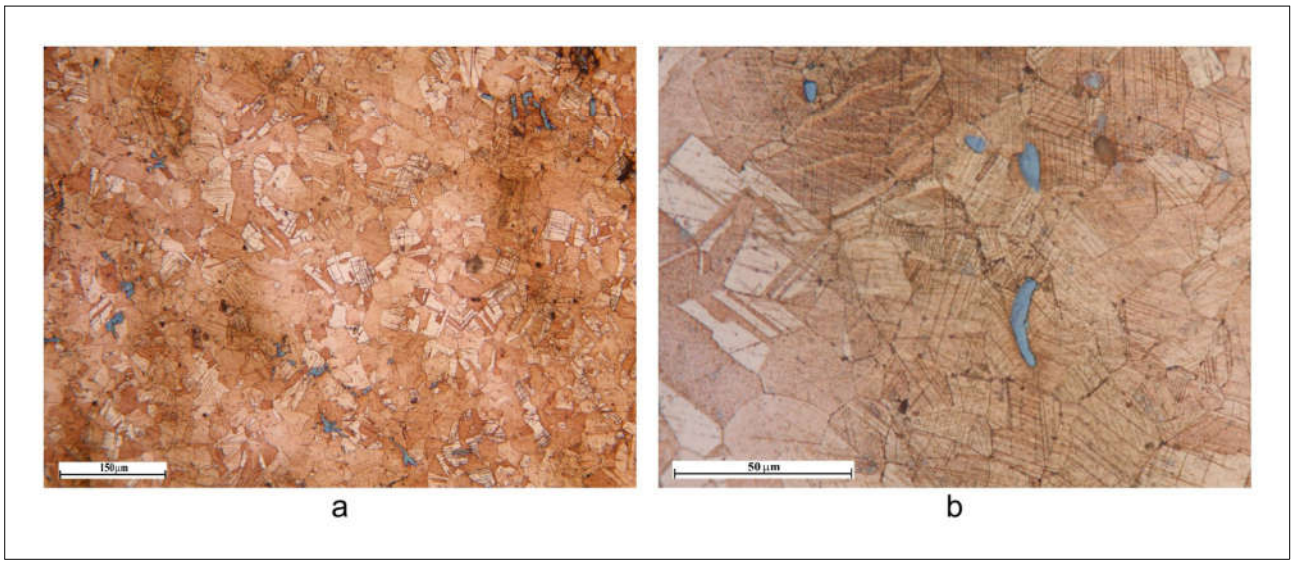

Рис. 3. Поселение Токсанбай. Микроструктура бронзы: *a* — полиэдрические равноосные зерна, *b* — формирование дислокационной сетки в отожженных ректисталлизованных зернах (увеличение: a — ×200; b — ×1000).

Fig. 3. Toksanbay settlement. Microstructure of bronze: *a* — polyhedral equiaxed grains, *b* — formation of a dislocation network in annealed recrystallized grains (Magnification: a — ×200; b — ×1000).

Таким образом, образец № 1 изготовлен из низколегированной бронзы и был получен путем обработки давлением в горячем состоянии при 750—600°С (ковкой и вырезкой) и затем подвергнут кратковременному отжигу при 450—500°С. В процессе эксплуатации или непосредственно после отжига нож подвергся незначительной неравномерной пластической деформации при низких температурах, что вызвало локальный наклёп.

Образец № 2 — фрагмент бронзовой проколки. Поверхность проколки (рис. 4) покрыта слоем коррозионных отложений бирюзового и бурого цвета. Проколка в сечении имеет ромбическую форму. Микроструктуру исследовали в продольном и поперечном сечении. Для исследования в поперечном сечении образец разрезали в центральной части.

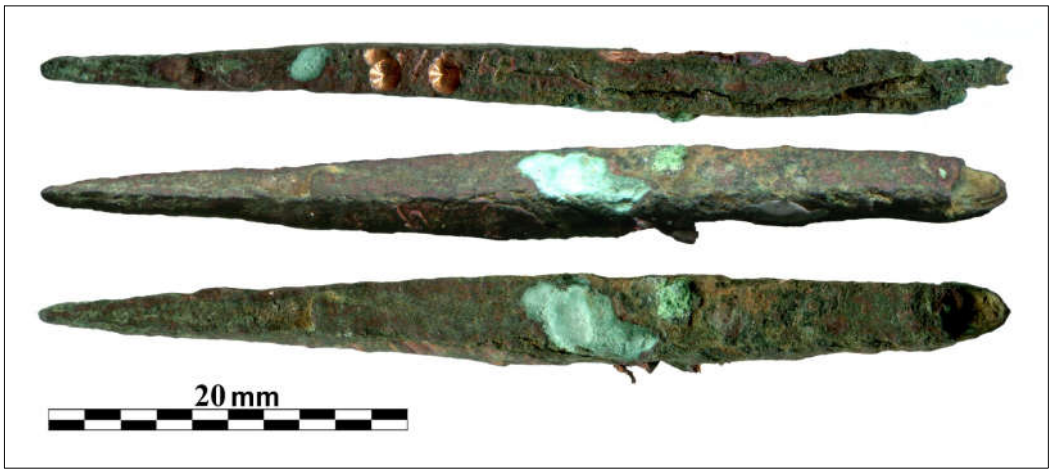

Рис. 4. Поселение Токсанбай. Фрагмент бронзовой проколки.

Fig. 4. Toksanbay settlement. Fragment of a bronze awl.

В поперечном сечении неметаллические оксидные включения распределены неоднородно и на локальных участках формируют скопления в виде сетки. В продольном сечении неметаллические включения имеют строчечное распределение. Направление строчек вдоль оси проколки, что обосновано их перераспределением в направлении пластического течения металла при обработке давлением. Форма включений — глобулярная. Размеры от 1 до 5 мкм. Глобулярная равноосная форма неметаллических включений указывает на то, что последний этап пластической деформации осуществлялся ниже температуры размягчения сульфидных неметаллических включений, что привело к их дроблению. Затем в поцессе отжига они приобрели глобулярную форму. При этом продолжительность и температура отжига были достаточно велики для изменения формы включений (рис. 5).

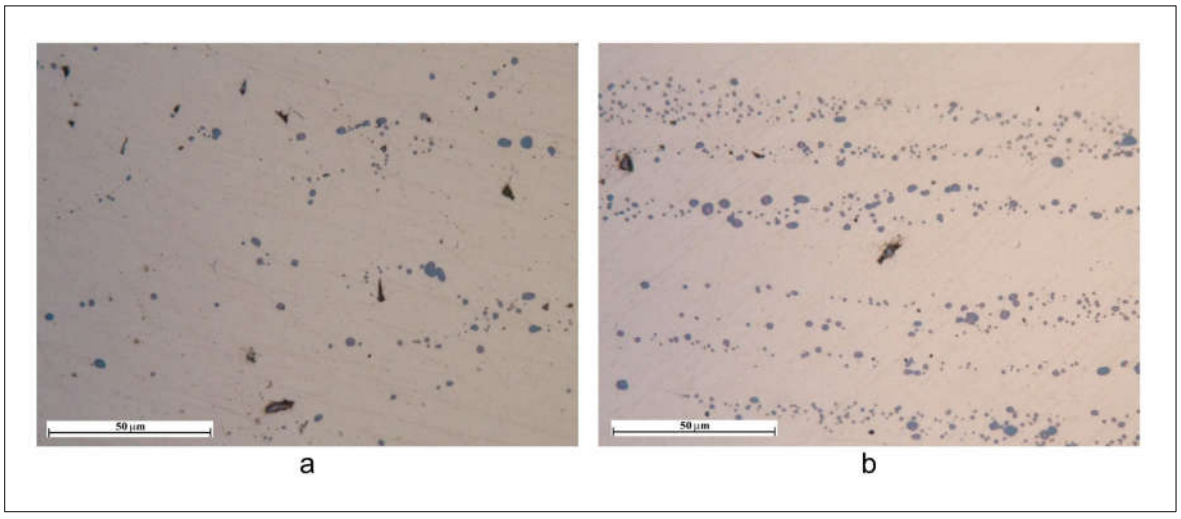

Рис. 5. Поселение Токсанбай. Неметаллические включения в структуре бронзы (увеличение ×1000): *a* — в поперечном сечении; *b* — в продольном сечении.

Fig. 5. Toksanbay settlement. Non-metallic inclusions in the bronze structure (Magnification: ×1000): *a* — transverse section; *b* — longitudinal section.

Структура бронзы однофазная. В продольном сечении структура зёрен бронзы меняется от вытянутой вблизи с остриём (рис. 6: a, b) до полиэдрической у тупого конца (рис. 6: e, f). На расстоянии 15—20 мм от острия зёрна деформированы, но в меньшей степени в сравнении с острием (рис. 6: c, d). Соотношение длины к ширине зерна вблизи к острию составляет 5:1—22:1, за 15—20 мм от острия — 2:1—5:1, и вблизи с тупым концом — 1,5:1—1:1. На стадии придания формы проколке металл подвергался существенной пластической деформации, на что указывают сильно вытянутые цепочки неметаллических включений по отношению к зеренной структуре бронзы (рис. 8).

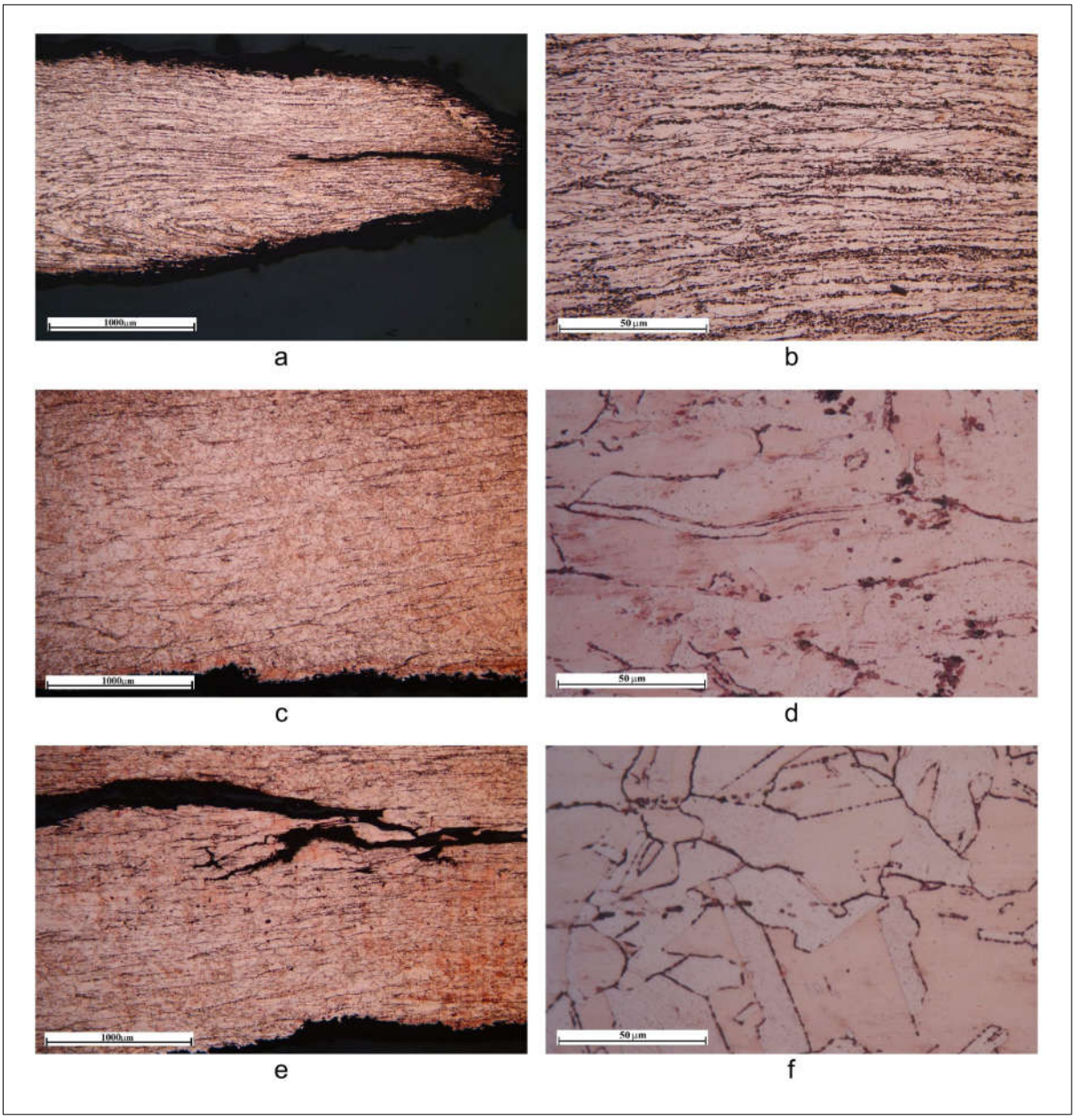

Рис. 6. Поселение Токсанбай. Макро- и микроструктура бронзовой проколки в продольном сечении (увеличение: a, c, e — ×50; b, d, f — ×1000): *a, b* — острие; *c, d* — на удалении 15—20 мм от острия; *e, f* — тупой конец.

Fig. 6. Toksanbay settlement. Macro- and microstructure of a bronze awl in longitudinal section (Magnification: a, c, e — ×50; b, d, f — ×1000): *a, b* — tip; *c, d* — 15—20 mm from the tip; *e, f* — blunt end.

В поперечном сечении зёрна имеют равноосную полиэдрическую форму (рис. 7). Размер зёрен 10—25 мкм.

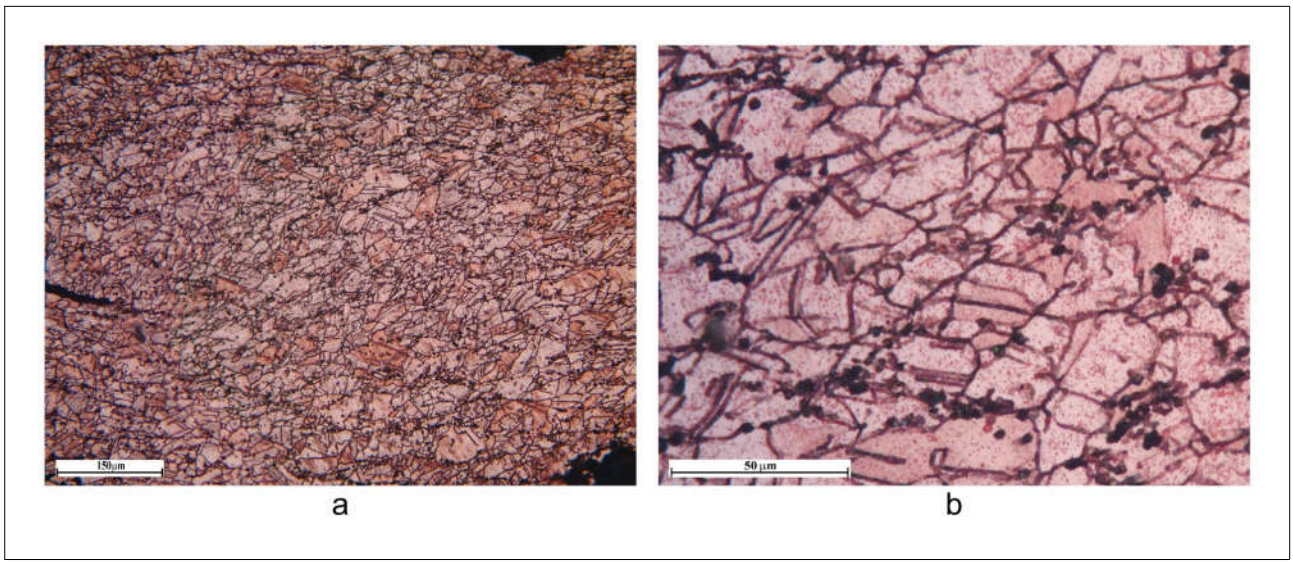

Рис. 7. Поселение Токсанбай. Микроструктура бронзовой проколки в поперечном сечении (увеличение: a — ×200; b — ×1000).

Fig. 7. Toksanbay settlement. Microstructure of a bronze awl in transverse section (Magnification: a — ×200; b — ×1000).

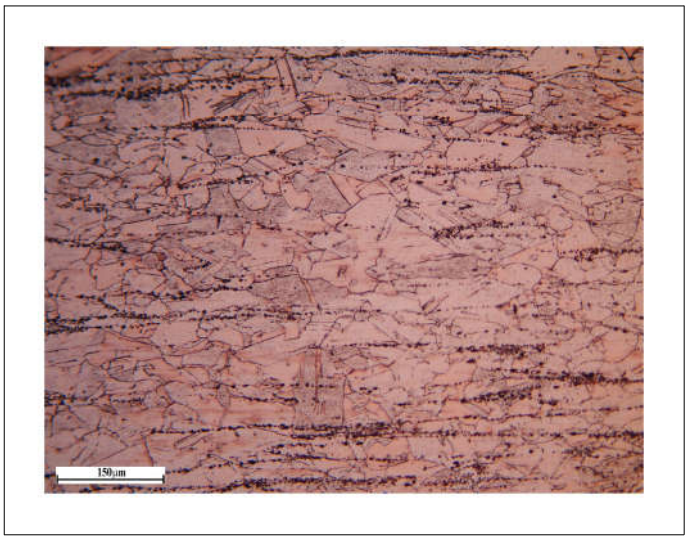

Рис. 8. Поселение Токсанбай. Распределение неметаллических включений в структуре бронзы в продольном сечении (увеличение ×200).

Fig. 8. Toksanbay settlement. Distribution of non-metallic inclusions in the bronze structure in longitudinal section (magnification: ×200).

Таким образом, анализ макро- и микроструктуры свидетельствует о том, что последний этап ковки осуществлялся при температуре ниже температуры размягчения сульфидных неметаллических включений. После придания окончательной формы, проколка была

подвергнута отжигу при 450—500°С. После этой операции кончик изделия вновь был подвергнут ковке в холодном состоянии, при этом тупой конец не деформировался. Не исключено, что после отжига проколка использовалась, а затем — вновь заострена ковкой.

Образец № 3 — фрагмент лезвия бронзового ножа, происходит с западного склона останца (рис. 9).

Поверхность лезвия покрыта слоем патины (толщиной 0,1—0,2 мм) с рыхлой структурой. Микроструктуру исследовали в продольном и поперечном сечении. Места исследования выделены красным цветом (рис. 9). Неметаллические включения представлены сульфидами и оксидами (рис. 10). В поперечном сечении сульфидные включения имеют вытянутую форму, в продольном — равноосную. В продольном сечении размер включений достигает 20 мкм. Поверхность сульфидных включений округлая, это указывает на то, что обработка давлением ножа осуществлялась при температуре выше температуры размягчения сульфидных включений. Наиболее вероятно при 750—600°С.

Структура бронзы однофазная. В поперечном сечении зёрна имеют полиэдрическую структуру. Зёрна вытянуты в направлении пластического течения металла, т.е. вдоль плоскости лезвия (рис. 11—12). Соотношение длины к ширине зёрен вблизи с остриём составляет 1,5:1—2,5:1, за 10 мм от острия — 1,3:1—2:1, в наиболее толстой части лезвия — 2:1—3,5:1. Это указывает на то, что на финальном этапе обработки широкая часть подвергалась большей пластической деформации. Однако плотность дислокаций в зёрнах вблизи у острия указывает на более существенный наклёп. Вблизи острия размер зёрен более дисперсный в сравнении с другими участками.



Рис. 9. Поселение Токсанбай. Фрагмент лезвия бронзового ножа.

Fig. 9. Toksanbay settlement. Fragment of the bronze knife blade.

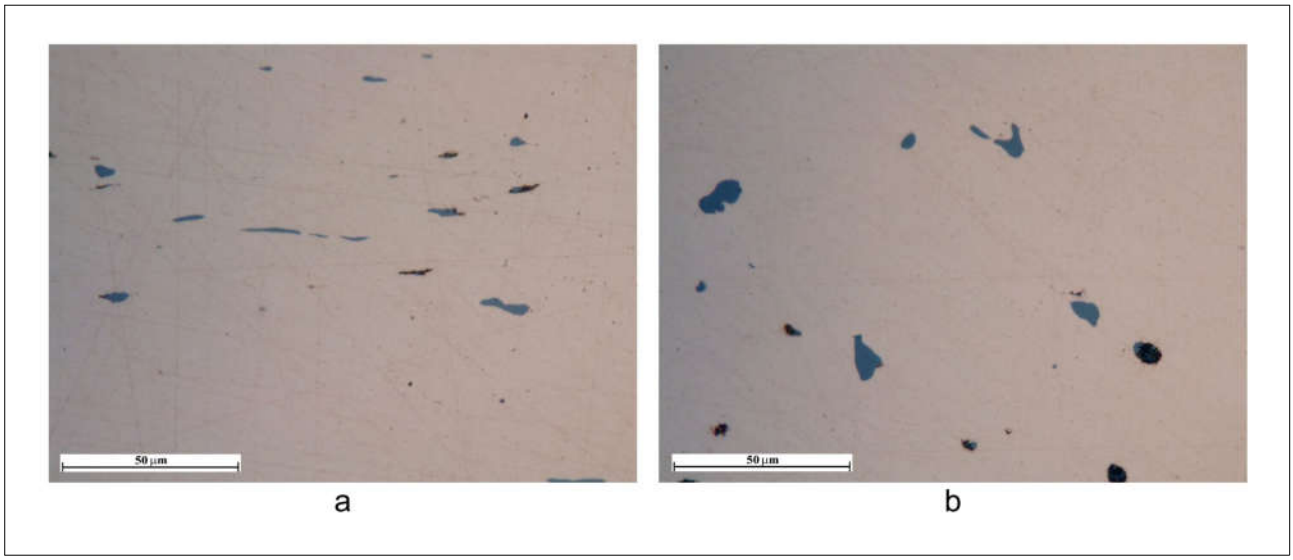

Рис. 10. Поселение Токсанбай. Неметаллические включения в структуре бронзы (увеличение ×1000): *a* — в поперечном сечении; *b* — в продольном сечении.

Fig. 10. Toksanbay settlement. Non-metallic inclusions in the bronze structure (Magnification: ×1000): *a* — transverse section; *b* — longitudinal section.

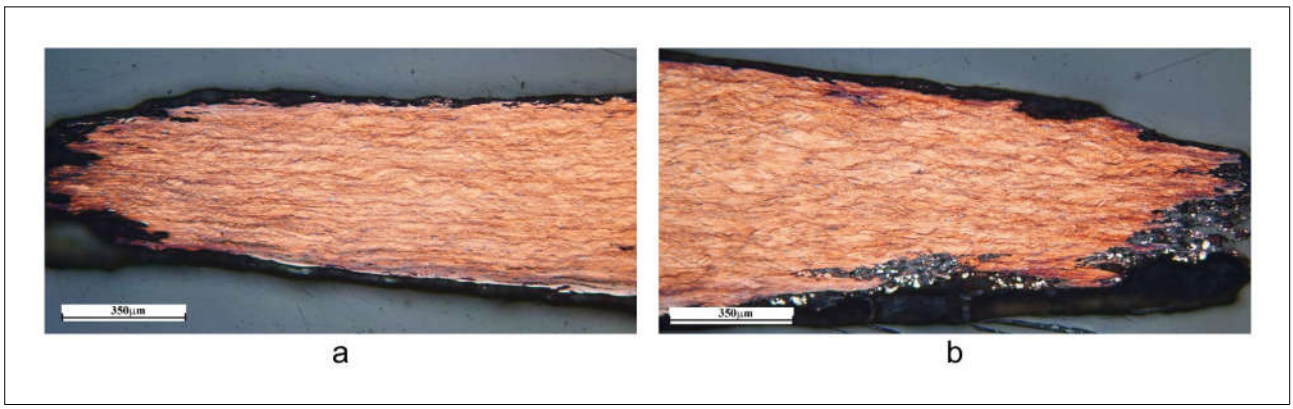

Рис. 11. Поселение Токсанбай. Микроструктура лезвий у острия (увеличение ×100).

Fig. 11. Toksanbay settlement. Microstructure of the knife blade near the tip (Magnification ×100).

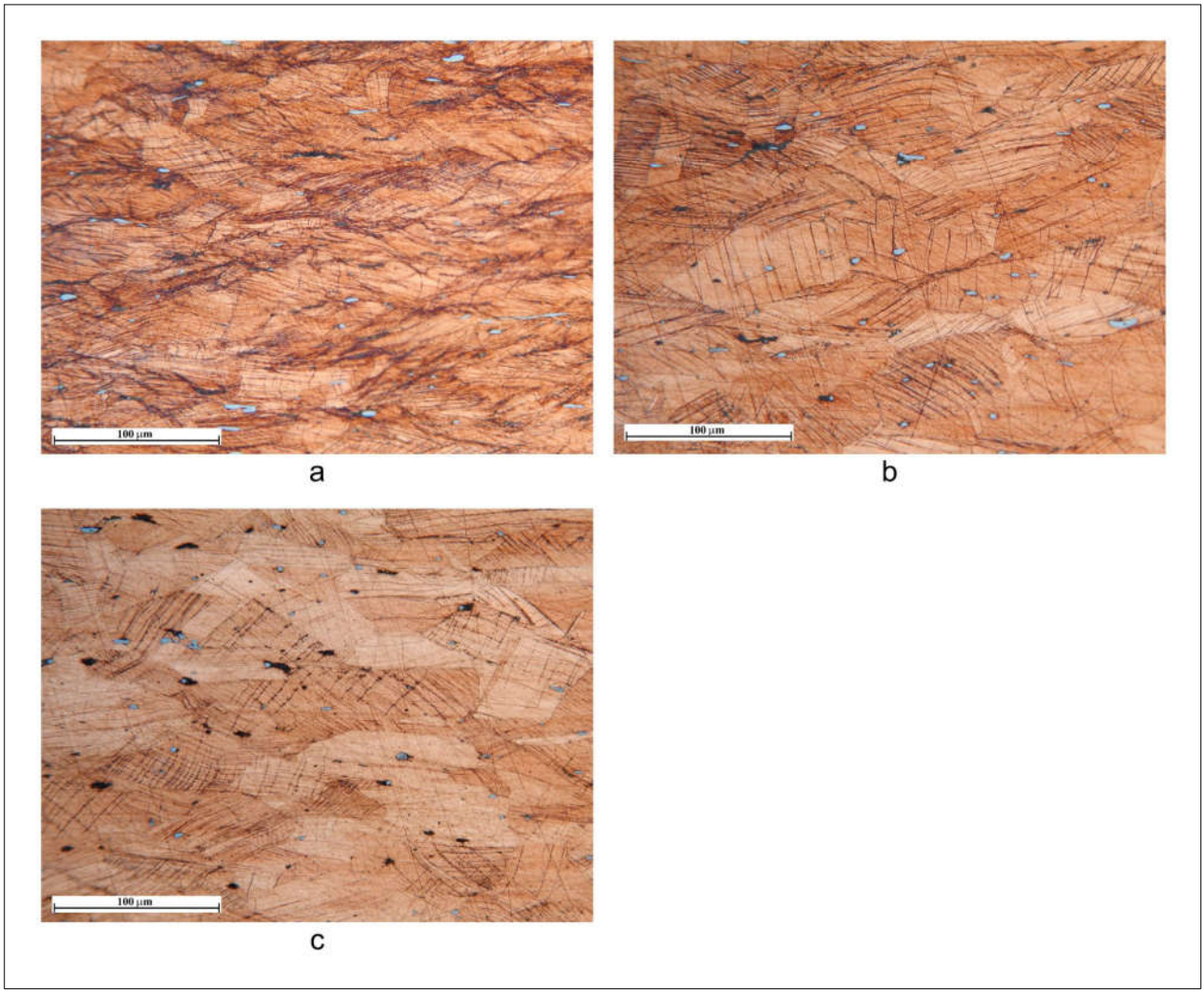

Рис. 12. Поселение Токсанбай. Деформация зерен и дислокационная структура в поперечном сечении (увеличение ×500): *a* — острие; *b* — за 10 мм у острия; *c* — в центре лезвия.

Fig. 12. Toksanbay settlement. Grain deformation and dislocation structure in transverse section (Magnification: ×500): *a* — tip; *b* — 10 mm from the tip; *c* — central part of the blade.

В продольном сечении зёрна имеют полиэдрическую форму, близкую к равноосной (рис. 13), при этом они имеют высокую плотность дислокаций, что свидетельствует о поверхностном наклёпе, которого достигли путём ковки при низкой температуре.

Таким образом, лезвие бронзового ножа выполнено из низколегированной бронзы. После придания формы лезвию при 750—600°С, оно было подвергнуто отжигу при 450—500°С, за ним последовала финальная обработка давлением при комнатной температуре. Наиболее вероятно в процессе эксплуатации ножа остриё выправлялось пластической деформацией, что вызвало его наклёп.

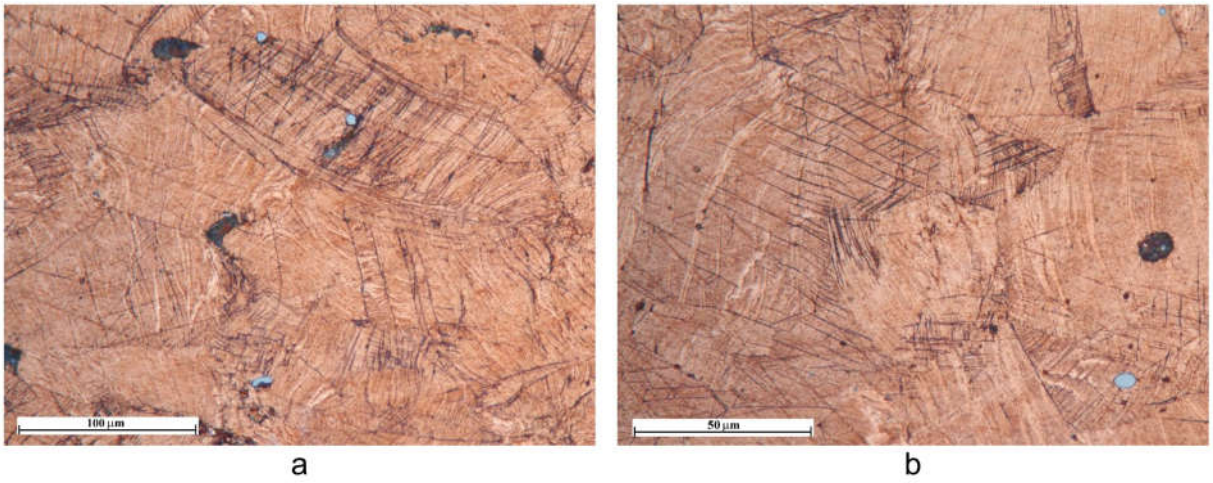

Рис. 13. Поселение Токсанбай. Деформация зерен и дислокационная структура в продольном сечении (увеличение: a — ×500; b — ×1000).

Fig. 13. Toksanbay settlement. Grain deformation and dislocation structure in longitudinal section (Magnification: a — ×500; b — ×1000).

Образец № 4 — проколка, происходит с северо-западного склона останца (рис. 14).

Проколка покрыта толстым слоем коррозионных отложений с рыхлой трещиноватой структурой. Исследование структуры проводили в продольном и поперечном сечении. В структуре бронзы выявлены преимущественно сульфидные неметаллические включения. В направлении течения металла, т.е. вдоль оси изделия, сульфидные неметаллические включения сильно вытянуты (рис. 15: b). В поперечном сечении они имеют равноосную глобулярную структуру (рис. 15: a). Оксидные неметаллические включения представлены единичными дисперсными частицами в структуре металла. Вблизи с коррозионным слоем по границам зёрен бронзы развилась межкристаллитная коррозия.



Рис. 14. Поселение Токсанбай. Бронзовая проколка.

Fig. 14. Toksanbay settlement. Bronze awl.

Структура бронзы однофазная, в продольном сечении образована равноосными зёрнами полиэдрической формы (рис. 16). Размер зёрен до 200 мкм. Сульфидные включения пересекают границы зёрен, что указывает на то, что в процессе изготовления проколки металл подвергался существенной пластической деформации в горячем состоянии (750—

600°C). После придания формы проколка подвергалась отжигу при 450—500°C. Признаков последующей пластической деформации не выявлено.

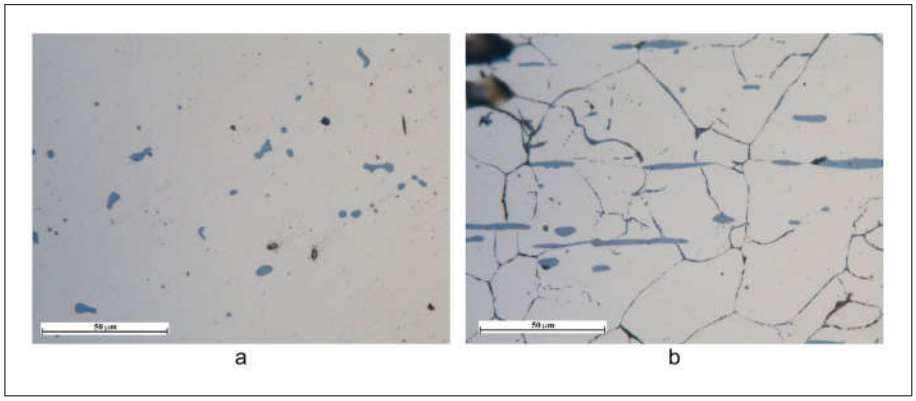

Рис. 15. Поселение Токсанбай. Неметаллические включения в структуре бронзы (увеличение ×1000): *a* — в поперечном сечении; *b* — в продольном сечении.

Fig. 15. Toksanbay settlement. Non-metallic inclusions in the bronze structure (Magnification: ×1000): *a* — transverse section; *b* — longitudinal section.

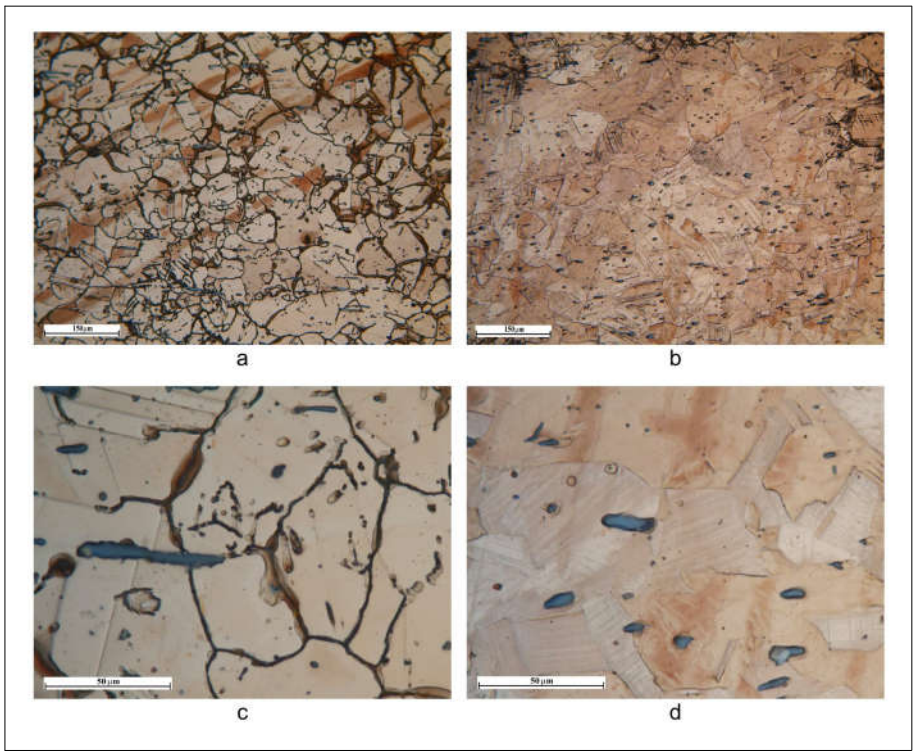

Рис. 16. Поселение Токсанбай. Микроструктура бронзовой проколки в продольном сечении (увеличение: a, b — ×200; c, d — ×1000): *a, c* — по периметру участок с межкристаллитной коррозией; *b, d* — в центральной части проколки.

Fig. 16. Toksanbay settlement. Microstructure of a bronze awl in longitudinal section (Magnification: a, b — ×200; c, d — ×1000): *a, c* — peripheral zone showing intergranular corrosion; *b, d* — central part of the awl.

Образец № 5 — бронзовая проколка, происходит с поверхности северо-западного склона. Поверхность проколки (рис. 17) преимущественно покрыта тонким слоем патины бурого цвета, на локальных участках развилась более интенсивная коррозия с формированием слоя бирюзового цвета с рыхлой структурой. Исследование микроструктуры проводилось в продольном и поперечном сечении. В структуре образца обнаружены поры типичной для деформированного состояния полиэдрической формы (рис. 18: a). Выявлены дисперсные оксидные и сульфидные включения. Сульфидные включения имеют форму, вытянутую вдоль оси проколки (рис. 18: b). При этом они пересекают границы зёрен бронзы (рис. 18: b). В поперечном сечении они имеют округлую равноосную форму. Оксидные включения имеют недеформированную форму, что указывает на то, что их температура плавления выше температуры, при которой происходила пластическая деформация.

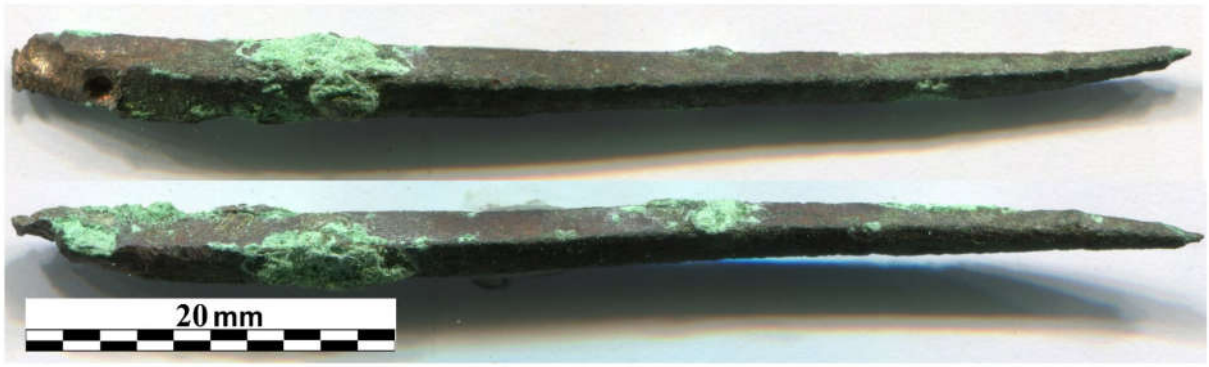

Рис. 17. Поселение Токсанбай. Бронзовая проколка.

Fig. 17. Toksanbay settlement. Bronze awl.

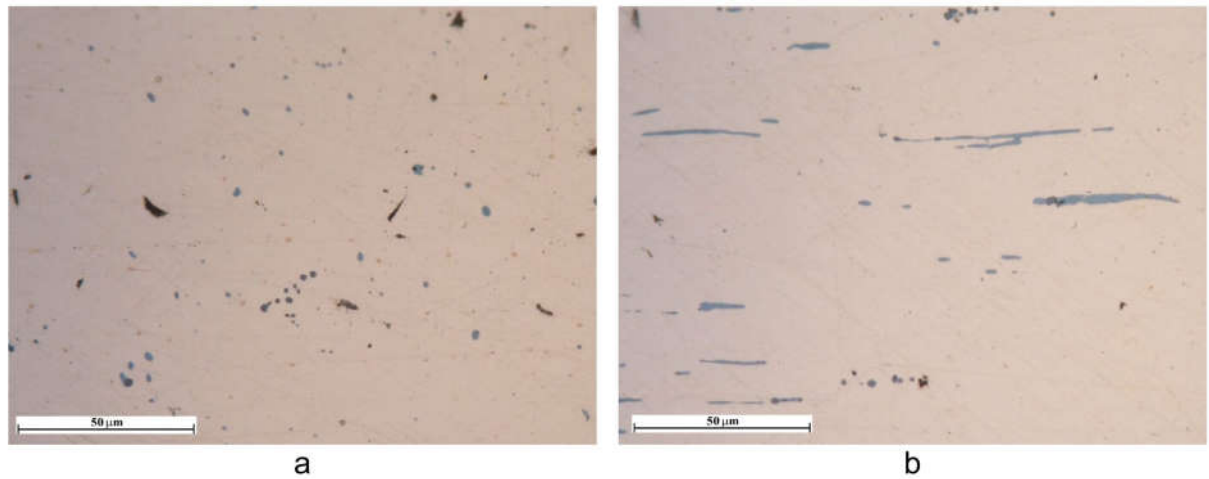

Рис. 18. Поселение Токсанбай. Неметаллические включения в структуре бронзы (увеличение ×1000): *a* — в поперечном сечении; *b* — в продольном сечении.

Fig. 18. Toksanbay settlement. Non-metallic inclusions in the bronze structure (Magnification: ×1000): *a* — transverse section; *b* — longitudinal section.

Структура бронзы однофазная. По всей длине изделия в продольном сечении структура образована зёрнами равноосной полиэдрической формы (рис. 19). Аналогичная форма зёрен и в поперечном сечении (рис. 20). Размер зёрен составляет 5—60 мкм. Макроструктура проколки по всей длине сохранила следы пластического течения металла, что проявляется в виде полосчатой структуры (рис. 18: a, c, e). Это свидетельствует о том, что ковку проводили в разогретом до 750—600°C состоянии, затем заготовку кратковременно отжигали при 450—500°C. После охлаждения полученная проколка не подвергалась обработке давлением.

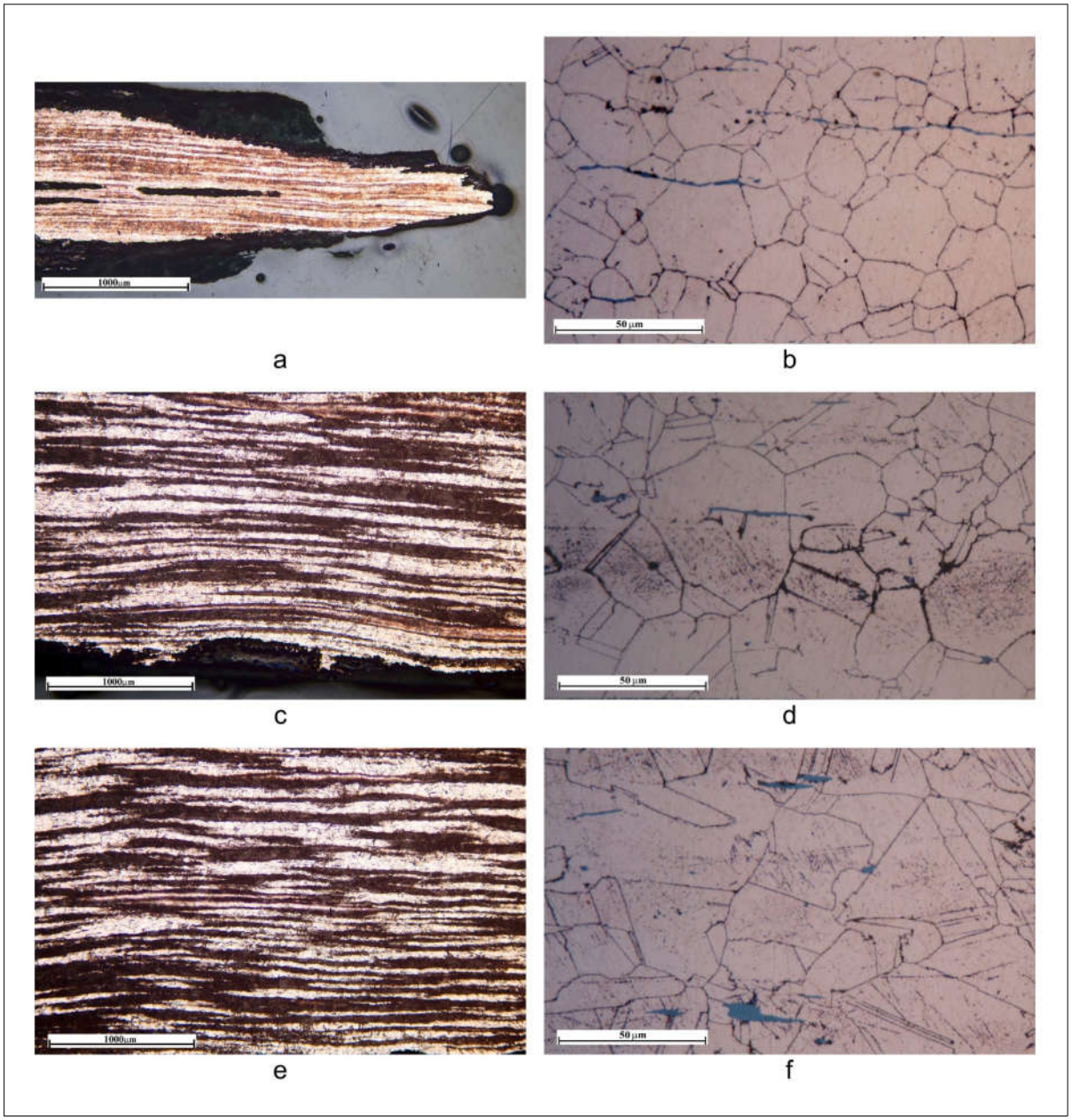

Рис. 19. Поселение Токсанбай. Макро- и микроструктура бронзовой проколки в продольном сечении (увеличение: a, c, e — ×50; b, d, f — ×1000): *a, b* — острие; *c, d* — на удалении 15—20 мм от острия; *e, f* — тупой конец.

Fig. 19. Toksanbay settlement. Macro- and microstructure of a bronze awl in longitudinal section (Magnification: a, c, e — ×50; b, d, f — ×1000): *a, b* — tip; *c, d* — 15—20 mm from the tip; *e, f* — blunt end.

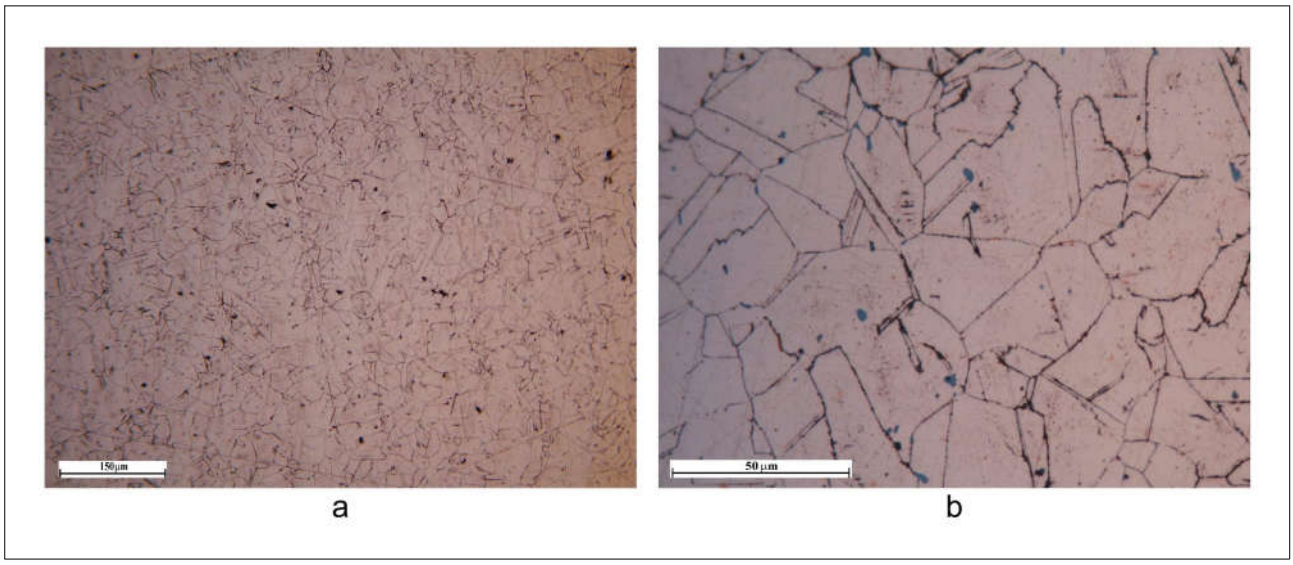

Рис. 20. Поселение Токсанбай. Микрострутктура бронзовой проколки в поперечном сечении (увеличение: a — ×200; b — ×1000).

Fig. 20. Toksanbay settlement. Microstructure of a bronze awl in transverse section (Magnification: a — ×200; b — ×1000).

Таким образом, проколка изготовлена из низколегированной бронзы путём ковки в подогретом до 750—600°С. После финального кратковременного отжига при 450—500°С она не подвергалась обработке давлением.

Образец № 6 — бронзовая проколка, происходит из кв. Г7-100-110, уровень горелого слоя. Поверхность проколки (рис. 21) покрыта тонким слоем патины буро-зелёного цвета, на локальных участках образовался широкий коррозионный слой с рыхлой структурой. Вдоль оси проколки на поверхности выявляются глубокие трещины, форма которых указывает на их образование на стадии изготовления. Структура исследовалась в продольном и поперечном сечениях.



Рис. 21. Поселение Токсанбай. Бронзовая проколка.

Fig. 21. Toksanbay settlement. Bronze awl.

В структуре преимущественно выявлены сульфидные неметаллические включения, единичные оксидные включения и поры. Сульфидные включения сильно вытянуты вдоль оси проколки (рис. 22: b). В поперечном сечении они имеют полиэдрическую равноосную форму (рис. 22: a). Вытянутая форма с округлыми краями сульфидов указывает на то, что в процессе обработки давлением они находились в пластичном состоянии, при этом на единичных включениях выявляются продольные трещины (рис. 22: b), это указывает на то, что при более низкой температуре они находятся в хрупком состоянии. Оксидные включения в продольном и поперечном сечениях имеют близкие размеры, что указывает на то, что в процессе обработки давлением они не деформировались.

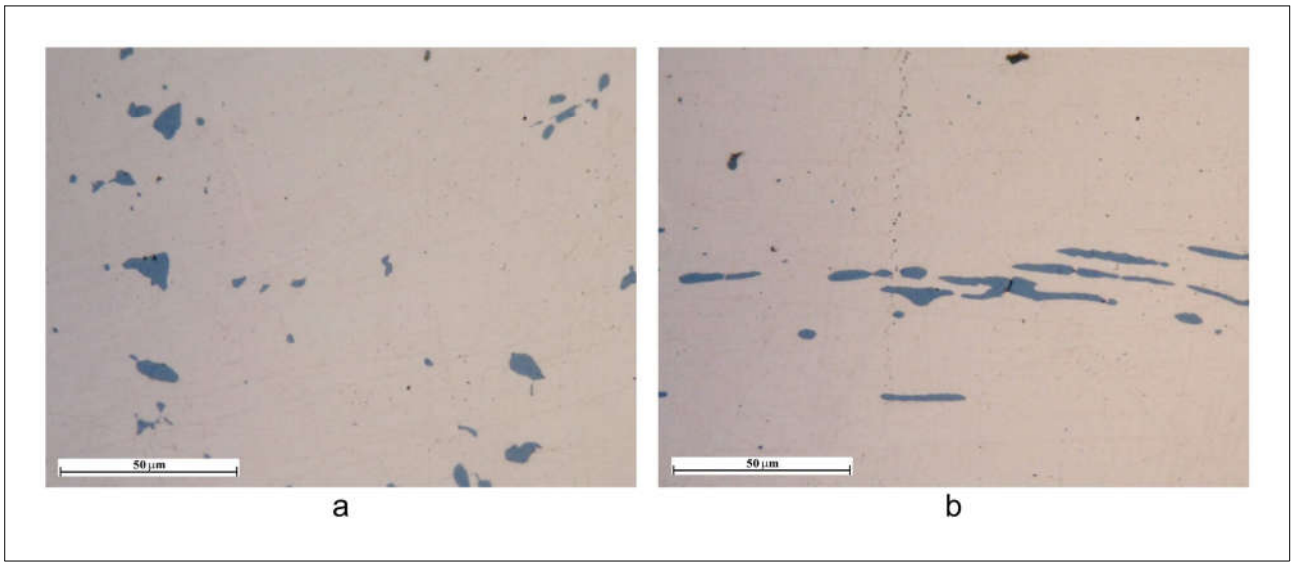

Рис. 22. Поселение Токсанбай. Неметаллические включения в структуре бронзы (увеличение ×1000): *a* — в поперечном сечении; *b* — в продольном сечении.

Fig. 22. Toksanbay settlement. Non-metallic inclusions in the bronze structure (Magnification: ×1000): *a* — transverse section; *b* — longitudinal section.

Структура бронзы однофазная. В продольном сечении на всех участках имеет однородное мелкозернистое строение (рис. 23). В продольном и поперечном сечении микроструктура близка и представляет собой фрагменты раздробленных зёрен без чётких границ (рис. 23—24). В то же время, в структуре не выявлены дислокации. Это указывает на то, что после интенсивной пластической деформации проколка подвергалась низкотемпературному отжигу (<450°C), в результате которого внутренние дефекты металла были устранены, однако рекристаллизация не начала развиваться.

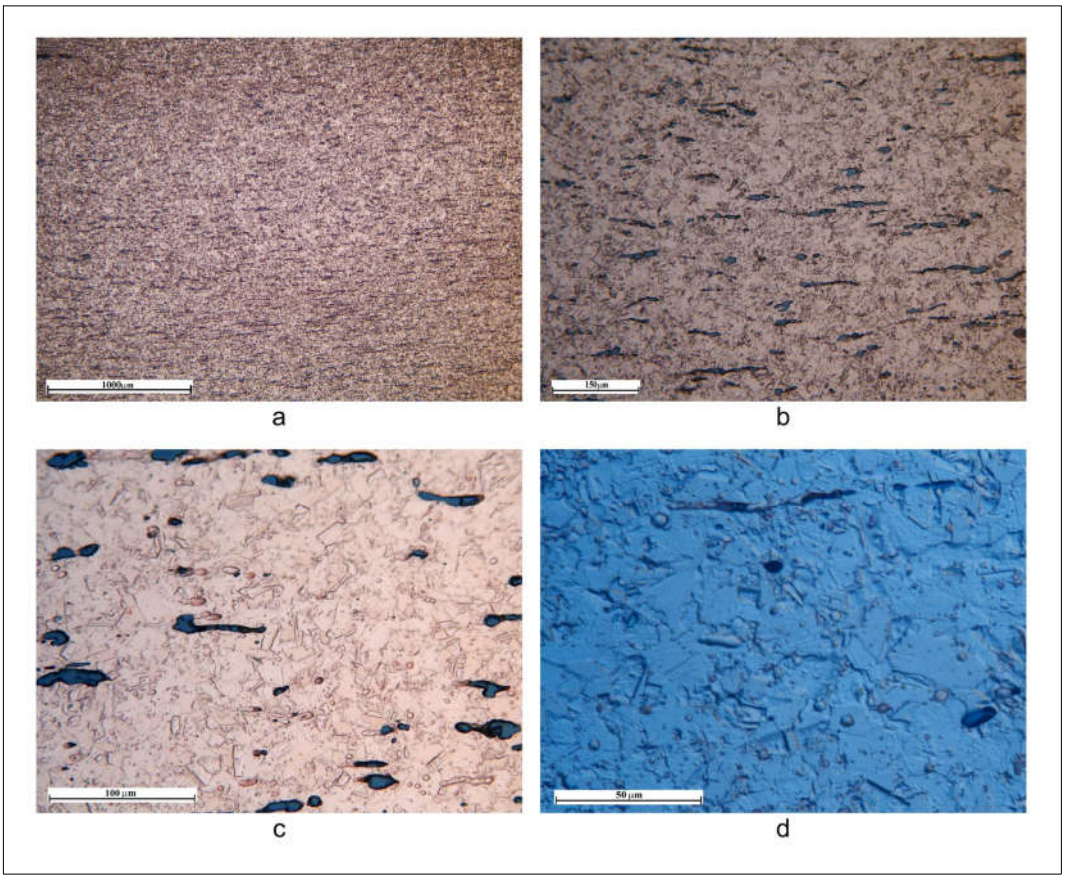

Рис. 23. Поселение Токсанбай. Макро- и микроструктура бронзовой проколки в продольном сечении (увеличение: a — ×50 , b — ×200; c — ×500, d — ×1000).

Fig. 23. Toksanbay settlement. Macro- and microstructure of a bronze awl longitudinal section (Magnification: a — ×50; b — ×200; c — ×500; d — ×1000).

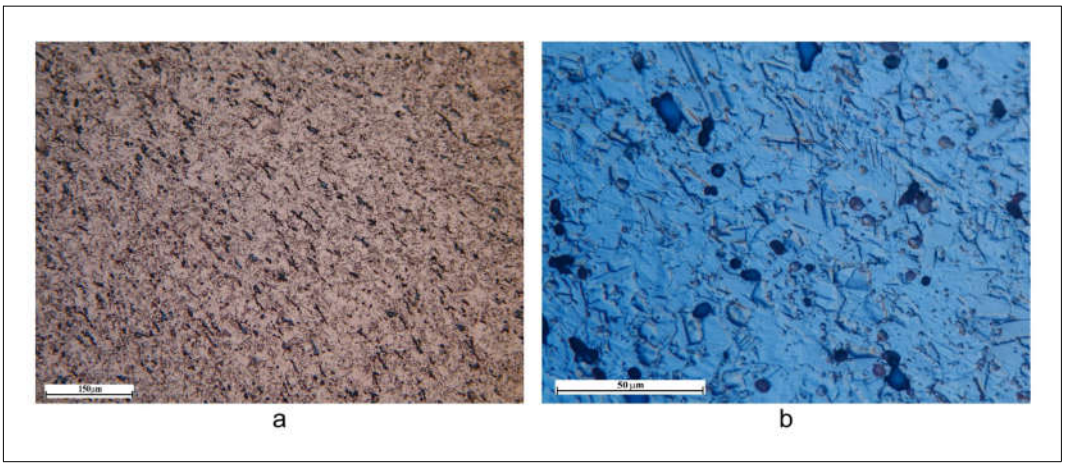

Рис. 24. Поселение Токсанбай. Микроструктура предмета в поперечном сечении (увеличение: a — ×200; b — ×1000).

Fig. 24. Toksanbay settlement. Microstructure of the object in transverse section (Magnification: a — ×200; b — ×1000).

Таким образом, проколка изготовлена из низколегированной однофазной бронзы путём чередования пластической деформации в горячем состоянии (при 750—600°С) и промежуточным отжигом при 450—500°С. На последнем этапе изготовления проколка была подвергнута интенсивной пластической деформации при низкой температуре и затем отжигу при температурах ниже 450°С, что привело к формированию мелкозернистой структуры.

Образец № 7 — бронзовая проколка, обнаружена на северо-западном склоне останца (рис. 25). Поверхность проколки покрыта тонким слоем патины буро-бирюзового цвета. Форма предмета четырёхгранная, в сечении ромбическая. Микроструктуру проколки исследовали в продольном и поперечном сечениях. В структуре выявлены поры, единичные оксидные неметаллические включения (рис. 26). Поры имеют полиэдрическую, характерную для деформированного металла, форму. Оксидные включения в продольном и поперечном сечении имеют близкие размеры, что указывает на то, что температура пластической деформации была ниже точки размягчения этих включений.



Рис. 25. Поселение Токсанбай. Бронзовая проколка.

Fig. 25. Toksanbay settlement. Bronze awl.

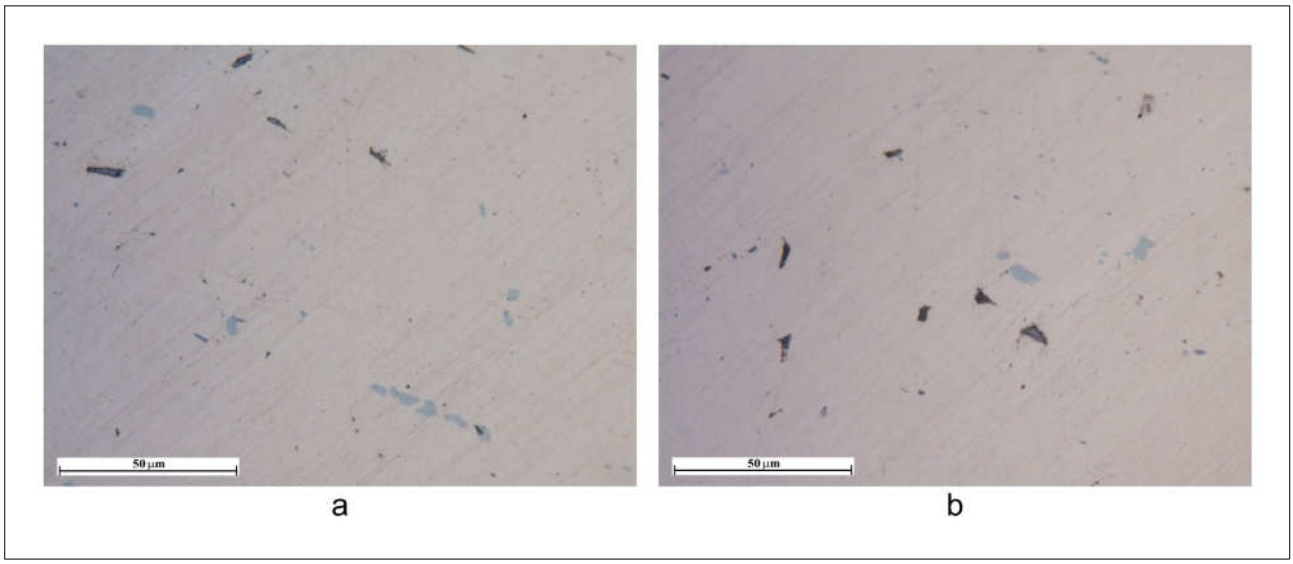

Рис. 26. Поселение Токсанбай. Неметаллические включения в структуре бронзы (увеличение ×1000): *a* — в поперечном сечении; *b* — в продольном сечении.

Fig. 26. Toksanbay settlement. Non-metallicinclusionsinthebronzestructure (Magnification: ×1000): *a* — transverse section; *b* — longitudinal section.

Кончик проколки имеет продольные трещины (рис. 27: a), что может свидетельствовать о его поломке в процессе эксплуатации. У поверхности наблюдается межкристаллитная коррозия (рис. 27: e).

Структура бронзы однофазная, возможно присутствуют малые количества второй фазы — светло-серые включения (рис. 26). В продольном сечении структура неоднородная по форме зерна. У острия и на удалении от него в 15—20 мм структура образована фрагментированными зёрнами (рис. 27: b, d). Примерно от центра образца (рис. 28) и до тупого конца структура образована равноосными крупными зёрнами полиэдрической формы (до 180 мкм). В структуре отдельных зёрен выявляются двойники. Это свидетельствует, что после придания формы изделию путём горячей ковки (при 750—600°C) она была подвергнута отжигу при 450—550°C. Затем непосредственно после отжига, или более вероятно при эксплуатации, кончик проколки, на удалении до 20 мм от острия, был подвергнут пластической деформации в холодном или слегка подогретом состоянии. При этом после ковки предмет был незначительно подогрет (<450°C), что привело к устранению дислокаций.

Таким образом, проколка изготовлена из низколегированной однофазной бронзы путем пластической деформации в горячем состоянии при температуре 750—600°C, и отжигов при 450—550°C. После изготовления орудия, очевидно для заострения кончика, затупившегося в процессе использования, половина проколки была подвергнута ковке при низкой температуре и последующему нагреву при температуре ниже 450°C, что привело к формированию мелкозернистой структуры.

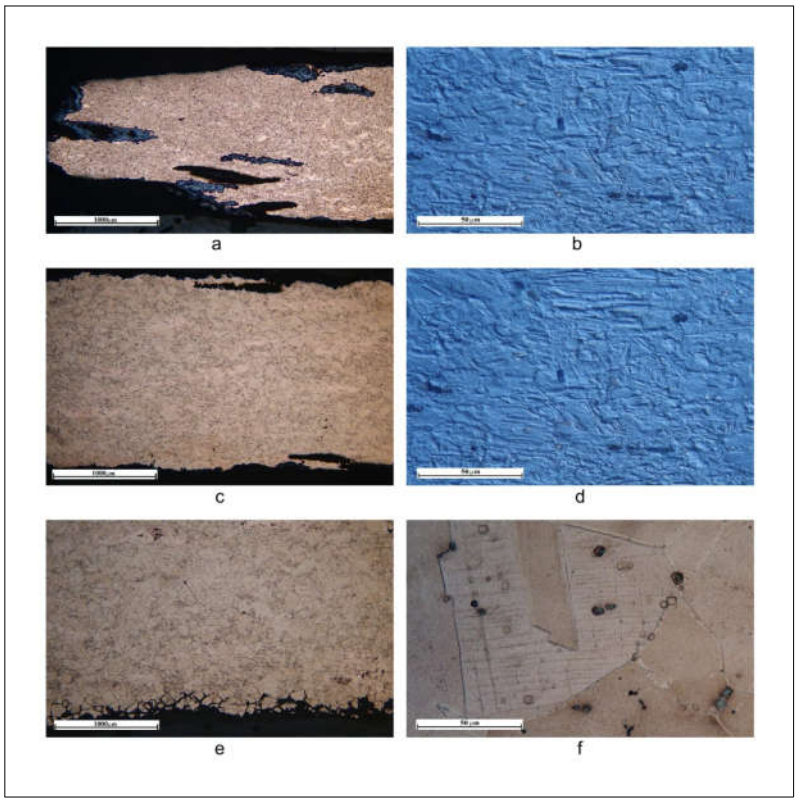

Рис. 27. Поселение Токсанбай. Макро- и микроструктура бронзовой проколки в продольном сечении (увеличение: a, c, e — ×50; b, d, f — ×1000): *a, b* — острие; *c, d* — на удалении 15—20 мм от острия; *e, f* — тупой конец.

Fig. 27. Toksanbay settlement. Macro- and microstructure of a bronze awl in longitudinal section (Magnification: a, c, e — ×50; b, d, f — ×1000): *a, b* — tip; *c, d* — 15—20 mm from the tip; *e, f* — blunt end.

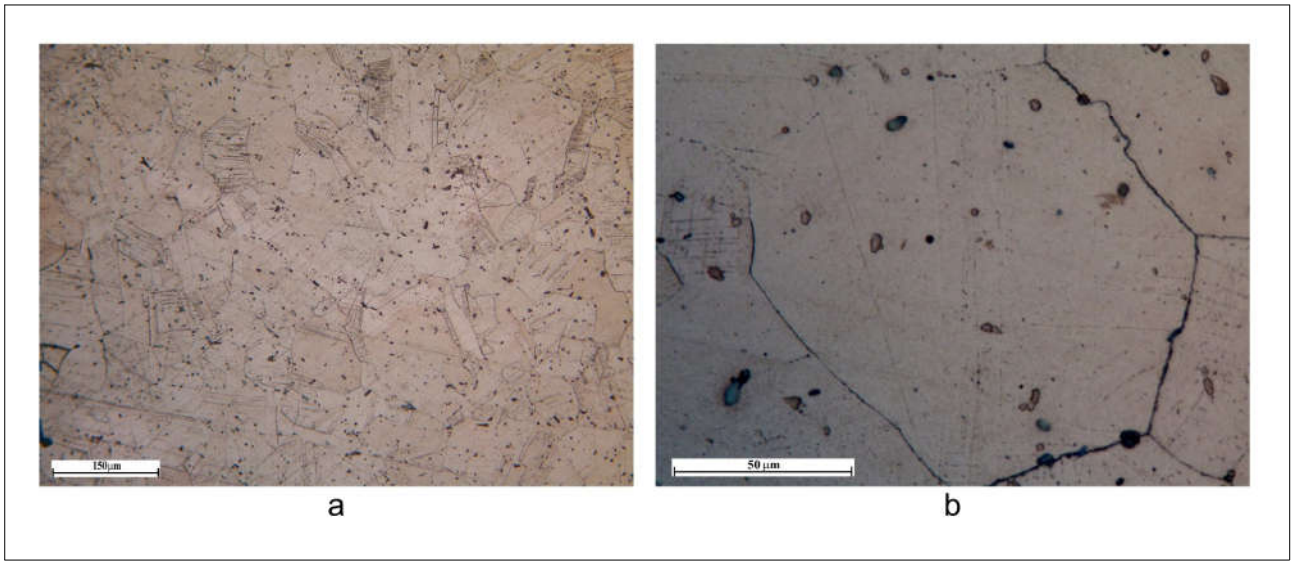

Рис. 28. Поселение Токсанбай. Микроструктура бронзовой проколки в поперечном сечении (увеличение: a — ×200; b — ×1000).

Fig. 28. Toksanbay settlement. Microstructure of a bronze awl in transverse section (Magnification: a — ×200; b — ×1000).

Заключение

Подводя итоги, можно говорить о том, что все образцы изготовлены из низколегированной однофазной бронзы, загрязнённой неметаллическими включениями, преимущественно сульфидными и оксидными. Присутствие в структуре бронзы большого количества сульфидных неметаллических включений указывает на применение смешанных оксидных и сульфидных руд при выплавке меди (Rostoker et al. 1989; Rostoker, Dvorak 1991; Ankushev et al. 2021). Оксидные неметаллические включения представлены как оксидами меди, так и силикатами (тугоплавкими минералами), что свидетельствует о том, что медь выплавлялась в небольших объёмах и в процессе плавки поверхность расплава не полноценно защищалась флюсом из древесного угля. Впрочем, аналогичное загрязнение расплава наблюдается в медных и бронзовых артефактах, найденных в других регионах (Ankushev et al. 2021; Habibzadeh et al. 2025; Oudbashi, Davami 2014; Oudbashi et al. 2016; Oudbashi, Hessari 2017; Oudbashi, Hasanpour 2018).

Для всех образцов характерна полиэдрическая форма зёрен, иногда с признаками равноосности или вытянутости вдоль оси деформации. Температура горячей обработки давлением (ковки) во всех случаях находится в диапазоне 750—600°C, а отжига — 450—500 (550)°C. Основная технология изготовления орудий — ковка в горячем состоянии, затем кратковременный отжиг и в ряде случаев — дополнительная ковка при низкой температуре (наклёп). Изделия подвергались пластической деформации, о чём свидетельствуют вытянутые зёрна и следы течения металла. Сделанные на основании анализа формы неметаллических включений выводы об обработке давлением в горячем состоянии указывают на отличие технологии получения исследованных бронзовых артефактов от технологии обработки давлением в холодном состоянии с последующим отжигом, описанной в работах (Dungworth 2013; Scott, Schwab 2019).

Почти во всех изделиях фиксируются признаки повторной обработки давлением, что наиболее вероятно происходило в процессе эксплуатации исследованных артефактов (выправление, повторное заострение). Вся серия предметов демонстрирует устоявшуюся технологическую традицию обработки низколегированных бронз на финальном этапе

производства, включавшую чередование ковки и отжига для улучшения пластичности и устранения дефектов.

Говорить о том, что все эти предметы изготовлены на поселении или часть из них была принесена извне, пока не представляется возможным, так как описанная технология типична для развитых металлургических центров позднего бронзового века Урало-Казахстанского региона, Южной Сибири и частично Поволжья.

Литература

Берсенева и др. 2019: Берсенева Н.А., Кайзер Э., Мыльникова Л.Н. 2019. Пространство не только для живых: человеческие останки на поселениях бронзового века в Евразии. *Уральский исторический вестник* 4 (65), 133—138.

Епимахов А.В., Молчанов И.В. 2013. Свидетельства металлопроизводства бронзового века укрепленного поселения Каменный Амбар: каменные плавильные чаши. *Вестник археологии, антропологии и этнографии* 1 (20), 4—9.

Ержанова и др. 2025: Ержанова А.Е., Горащук И.В., Чотбаев А.Е. «Охота — война»: каменные наконечники стрел поселения Талдысай (Центральный Казахстан). *Археология Казахстана (Қазақстан археологиясы)* 3 (28), 338—358.

Ержанова А., Лошакова Т. 2022. Утюжки поселений эпохи бронзы северо-восточного Прикаспия. *Вестник КазНУ. Сер. историч.* 3 (106), 227—235.

Каргалы 2002: *Каргалы*. Т. II. *Горный — поселение эпохи поздней бронзы: Топография, литология, стратиграфия: Производственно-бытовые и сакральные сооружения: Относительная и абсолютная хронология.* Москва: Языки славянской культуры.

Каргалы. 2005: *Каргалы*. Т. IV. *Некрополи на Каргалах; население Каргалов: палеоантропологические исследования.* Москва: Языки славянской культуры.

Лошакова Т.Н. 2019. О работе международной конференции «Пространство не только для жизни…». *Археология Казахстана (Қазақстан археологиясы)* 2 (4), 125—128.

Лошакова Т.Н. 2020. История изучения памятников эпохи бронзы северо-восточного Прикаспия. *Археология Казахстана (Қазақстан археологиясы)* 4 (10), 47—69.

Лошакова Т.Н. 2022. Погребения на поселениях эпохи бронзы Северо-Восточного Прикаспия. *Археология Казахстана (Қазақстан археологиясы)* 4 (18), 73—83.

Лошакова Т.Н., Усачук А.Н. 2023. Коллекция костяных изделий поселения Токсанбай (Северо-Восточный Прикаспий). *Археология Казахстана (Қазақстан археологиясы)* 2 (20), 166—185.

Самашев и др. 2001: Самашев З., Ермолаева А.С., Лошакова Т.Н. 2001. Североустюртский очаг культуры эпохи палеометалла. Проблемы, поиски и раскопки. В: Колев Ю.И. и др. (ред). *Бронзовый век восточной Европы: характеристика культур, хронология и периодизация.* Материалы международной научной конференции. Самара: ООО «НТЦ», 347—352.

Самашев и др. 2004: Самашев З.С., Ермолаева А.С., Лошакова Т.Н. 2004. Поселение эпохи палеометалла Северо-Восточного Прикаспия. В: Сдыков М.Н. и др. (ред.). *Вопросы истории и археологии Западного Казахстана.* Вып. 3. Уральск: ЗКОЦИА, 125—153.

Самашев и др. 2007: Самашев З., Ермолаева А.С., Лошакова Т.Н. 2007. Костяные псалии с поселения Токсанбай. К вопросу о комплексе колесничих населения Устюрта в эпоху бронзы. В: Сдыков М.Н. и др. (ред.). *Вопросы истории и археологии Западного Казахстана*. Вып. 1. Уральск: ЗКОЦИА, 87—102.

Талдысай 2020: Ж. Курманкулов (отв. ред.). *Талдысай — поселение древних металлургов позднебронзового века в Улытауской степи:* коллективная монография. Алматы: ИА, 2020.

Черных Е.Н. 2007. *Каргалы*. Т. V. *Каргалы: феномен и парадоксы развития; Каргалы в системе металлургических провинций; Потаенная (сакральная) жизнь архаичных горняков и металлургов.* Москва: Языки славянской культуры.

Шевнина И.В., Лошакова Т.Н. 2017. Некоторые итоги петрографического исследования керамики с поселения Токсанбай. *Самарский научный вестник.* Т. 6 (3 (20)), 216—222.

Ankushev et al. 2021: Ankushev M., Blinov I., Alaeva I., Vinogradov N., Petrov F.N., Ankusheva P. 2021. Mineral inclusions in the Late Bronze Age metal objects of Southern Transurals. *Минералогия* 7 (4—5), 70—82.

Berseneva N. 2023. The Dead among the Living at the Bronze Age Settlements in the Southern Urals: approaches to research and classification of intramural burials. *Археология Казахстана (Қазақстан археологиясы)* 4 (22), 66—85.

Chen et al. 2023: Chen T., Wen M., Cui H., Guo J., Wang C. 2023. Hot Deformation Behavior and Processing Maps of Pure Copper during Isothermal Compression. *Materials* 16, 3939.

Dungworth D. 2013. An experimental study of some early copper smithing techniques. *Accidental and Experimental Archaeometallurgy.* London: Historical Metallurgy Society, 149—152.

Habibzadeh et al. 2025: Habibzadeh M., Oudbashi O., Naseri R., Bahadori S. 2025. Archaeometallurgical investigation on the copper-based artifacts from Lahsavareh Iron Age II—III cemetery (Southwestern Iran). *Journal of Archaeological Science: Reports* 65.

Koryakova et al. 2011: Koryakova L.N., Krause R., Epimakhov A.V., Sharapova S.V., Panteleyeva S.E., Berseneva N.A., Fornasier J., Kaiser E., Molchanov I.V., Chechushkov I.V. Archaeological studies of the Kamenny Ambar (Olgino) fortified settlement. *Archaeology Ethnology & Anthropology of Eurasia* 39/4, 61—74.

Loshakova T.N. 2024. Bronze Age Settlements of the North-East Caspian Region. *Qazaq Historical Review* 2 (1), 60—89.

Oudbashi O., Davami P. 2014. Metallography and microstructure interpretation of some archaeological tin bronze vessels from Iran. *Materials Characterization* 97, 74—82.

Oudbashi et al. 2016: Oudbashi O., Naseri R., Malekzadeh M. 2016. Technical studies on the Bronze Age metal artefacts from the graveyard of Deh Dumen, south-western Iran (third millennium BC). *Archaeometry* 58 (6), 947—965.

Oudbashi O., Hessari M. 2017. Iron Age tin bronze metallurgy at Marlik, Northern Iran: an analytical investigation. *Archaeological and Anthropological Sciences* 9, 233—249.

Oudbashi O., Hasanpour A. 2018. Bronze alloy production during the Iron Age of Luristan: a multianalytical study on recently discovered bronze objects. *Archaeological and Anthropological Sciences* 10, 1443—1458.

Rostoker et al. 1989: Rostoker W., Pigott V., Dvorak J. 1989. Direct reduction of copper metal by oxide—sulphide mineral interaction. *Archaeomaterials* 3, 69—87.

Rostoker W., Dvorak J. 1991. Some experiments with co-smelting to copper alloys. *Archaeomaterials* 5, 5—20.

Scott D.A., Schwab R. 2019. *Metallography in Archaeology and Art.* Cham; Heidelberg: Springer.

Yermolayeva et al. 2024: Yermolayeva A.S., Yerzhanova A.E., Dubyagina Y.V. 2024. The Taldysay Settlement: a Site of Ancient Metallurgy in the Zhezkazgan-Ulytau Mining and Metallurgical Center. *Qazaq Historical Review* 2 (1), 6—18.

Zolotorevsky et al. 2023: Zolotorevsky N.Y., Rybin V.V., Ushanova E.A., Perevezentsev V.N. 2023. Effect of deformation temperature on the microstructure and texture evolution in copper during tension. *Letters on Materials* 13 (4), 362—367.

References

Berseneva et al. 2019: Berseneva, N.A., Kaiser, E., Mylnikova, L.N. 2019. In *Uralskij istoricheskij vestnik (Ural Historical Journal)* 4 (65), 133—138 (in Russian).

Yepimakhov, A.V., Molchanov, I.V. 2013. In *Vestnik arkheologii, antropologii i etnografii (Bulletin of Archaeology, Anthropology and Ethnography)* 1 (20), 4—9 (in Russian).

Yerzhanova et al. 2025: Yerzhanova, A.E., Gorashchuk, I.V., Chotbaev, A.E. 2025. In *Kazakstan arheologiyasy (Kazakhstan Archeology)* 2 (28), 338—358 (in Russian).

Yerzhanova, A., Loshakova, T. 2022. In *Vestnik Kazahskogo natsionalnogo universiteta imeni al-Farabi. Seriya istoricheskaya (Journal of history)* 3, 227—235 (in Russian).

Kargali 2002: *Kargali. Tom II: Gornii — poselenie epokhi pozdnei bronzi: Topografiya, litologiya, stratigrafiya: Proizvodstvenno-bitovie i sakralnie sooruzheniya: Otnositelnaya i absolyutnaya khronologiya (Kargaly. Vol. II: Gorny settlement of the Late Bronze Age: Topography, lithology, stratigraphy: Industrial, domestic and sacred structures: Relative and absolute chronology).* Chernyh, Ye. (ed.). Moscow: Yaziki slavyanskoi kulturi, 2002 (in Russian).

Kargali 2005: *Kargali (Kargaly)*. Vol. IV. *Nekropoli na Kargalakh; naselenie Kargalov: paleoantropologicheskie issledovaniya (Necropolises on Kargaly; Kargal population: paleoanthropological studies).* Moscow: Yaziki slavyanskoi kulturi, 2005 (in Russian).

Loshakova, T.N. 2019. In *Kazakstan arheologiyasy (Kazakhstan Archeology)* 2 (4), 125—128 (in Russian).

Loshakova, T.N. 2020. In *Kazakstan arheologiyasy (Kazakhstan Archeology)* 4 (10), 47—69 (in Russian).

Loshakova, T.N. 2022. In *Kazakstan arheologiyasy (Kazakhstan Archeology)* 4 (18), 73—83 (in Russian).

Loshakova, T.N., Usachuk, A.N. 2023. In *Kazakstan arheologiyasy (Kazakhstan Archeology)* 2 (20), 166—185 (in Russian).

Loshakova T.N. 2024. In *Qazaq Historical Review* 2 (1), 60—89 (in English).

Samashev et al. 2001: Samashev, Z., Ermolaeva, A.S., Loshakova, T.N. 2001. In: Kolev, Yu. et al. (eds.). *Bronzovyj vek vostochnoj Evropy: harakteristika kultur, hronologiya i periodizatsiya (The Bronze Age of Eastern Europe: Cultural Characteristics, Chronology, and Periodization).* Samara: Scientific and Technical Center, 347—352 (in Russian).

Samashev et al. 2004: Samashev, Z.S., Ermolaeva, A.S., Loshakova, T.N. 2004. In: Sdykov, M.N. et al. (eds.). *Voprosy istorii i arheologii Zapadnogo Kazahstana (Issues of history and archaeology of Western Kazakhstan).* Iss. 3. Uralsk: West Kazakhstan Regional Center for History and Archaeology, 125—153 (in Russian).

Samashev et al. 2007: Samashev, Z., Ermolaeva, A.S., Loshakova, T.N. 2007. In: Sdykov, M.N. et al. (eds.). *Voprosy istorii i arheologii Zapadnogo Kazahstana (Issues of history and archaeology of Western Kazakhstan).* Iss. 1. Uralsk: West Kazakhstan Regional Center for History and Archaeology, 87—102 (in Russian).

Chernikh, Ye.N. 2007. *Kargali (Kargaly)*. Vol. V. *Kargali: fenomen i paradoksi razvitiya; Kargali v sisteme metallurgicheskikh provintsii; Potaennaya (sakralnaya) zhizn arkhaichnikh gornyakov i metallurgov . (Kargaly: the phenomenon and paradoxes of development; Kargaly in the system of metallurgical provinces; The secret (sacred) life of archaic miners and metallurgists).* Moscow: Yaziki slavyanskoi kulturi (in Russian).

Shevnina, I.V., Loshakova, T.N. 2017. In *Samarskij nauchnyj vestnik (Samara scientific Bulletin).* Vol. 6. No. 3 (20), 216—222 (in Russian).

Taldysai 2020: Kurmankulov, Zh. (ed.). 2020. *Taldysaj — poselenie drevnih metallurgov pozdnebronzovogo veka v Ulytauskoj stepi (Taldysai — Settlement of Ancient Metallurgists of the Late Bronze Age in the Ulytau Steppe*). Collective Monograph. Almaty: Margulan Institute of Archaeology.

Ankushev et al. 2021: Ankushev, M., Blinov, I., Alaeva, I., Vinogradov, N., Petrov, F.N., Ankusheva, P. 2021. In *Mineralogiya (Mineralogy)* 7 (4—5), 70—82.

Berseneva. N. 2023. The Dead among the Living at the Bronze Age Settlements in the Southern Urals: approaches to research and classification of intramural burials. *Kazakstan arheologiyasy (Kazakhstan Archeology)* 4 (22), 66—85.

Chen et al. 2023: Chen, T., Wen, M., Cui, H., Guo, J., Wang, C. 2023. Hot Deformation Behavior and Processing Maps of Pure Copper during Isothermal Compression. *Materials* 16, 3939.

Dungworth, D. 2013. An experimental study of some early copper smithing techniques. *Accidental and Experimental Archaeometallurgy.* London: Historical Metallurgy Society, 149—152.

Habibzadeh et al. 2025: Habibzadeh, M., Oudbashi, O., Naseri, R., Bahadori, S. 2025. Archaeometallurgical investigation on the copper-based artifacts from Lahsavareh Iron Age II—III cemetery (Southwestern Iran). *Journal of Archaeological Science: Reports* 65.

Koryakova et al. 2011: Koryakova, L.N., Krause, R., Epimakhov, A.V., Sharapova, S.V., Panteleyeva, S.E., Berseneva, N.A., Fornasier, J., Kaiser, E., Molchanov, I.V., Chechushkov, I.V. 2011. Archaeological studies of the Kamenny Ambar (Olgino) fortified settlement. *Archaeology Ethnology & Anthropology of Eurasia* 39/4, 61—74.

Loshakova, T.N. 2024. Bronze Age Settlements of the North-East Caspian Region. *Qazaq Historical Review* 2 (1), 60—89.

Oudbashi O., Davami P. 2014. Metallography and microstructure interpretation of some archaeological tin bronze vessels from Iran. *Materials Characterization* 97, 74—82.

Oudbashi et al. 2016: Oudbashi, O., Naseri, R., Malekzadeh, M. 2016. Technical studies on the Bronze Age metal artefacts from the graveyard of Deh Dumen, south-western Iran (third millennium BC). *Archaeometry* 58 (6), 947—965.

Oudbashi, O., Hessari, M. 2017. Iron Age tin bronze metallurgy at Marlik, Northern Iran: an analytical investigation. *Archaeological and Anthropological Sciences* 9, 233—249.

Oudbashi, O., Hasanpour, A. 2018. Bronze alloy production during the Iron Age of Luristan: a multianalytical study on recently discovered bronze objects. *Archaeological and Anthropological Sciences* 10, 1443—1458.

Rostoker et al. 1989: Rostoker, W., Pigott, V., Dvorak, J. 1989. Direct reduction of copper metal by oxide—sulphide mineral interaction. *Archaeomaterials* 3, 69—87.

Rostoker, W., Dvorak, J. 1991. Some experiments with co-smelting to copper alloys. *Archaeomaterials* 5, 5—20.

Scott, D.A., Schwab, R. 2019. *Metallography in Archaeology and Art.* Cham; Heidelberg: Springer.

Yermolayeva et al. 2024: Yermolayeva, A.S., Yerzhanova, A.E., Dubyagina, Y.V. 2024. The Taldysay Settlement: a Site of Ancient Metallurgy in the Zhezkazgan-Ulytau Mining and Metallurgical Center. *Qazaq Historical Review* 2 (1), 6—18.

Zolotorevsky et al. 2023: Zolotorevsky, N.Y., Rybin, V.V., Ushanova, E.A., Perevezentsev, V.N. 2023. Effect of deformation temperature on the microstructure and texture evolution in copper during tension. *Letters on Materials* 13 (4), 362—367.