24

Journal Homepage: http://journal.richt.ir/mbp/
P. ISSN: 2645-5048 & E. ISSN: 2645-5706
Motaleat-eBastanshenasi-eParseh(MBP) || Vol. 7 || No. 24 || Summer 2023 ||

Study on Technology and Investigation of Damage on Iron-Bronze Bimetallic Sword Excavated from Tol-E Talesh Region

Bakhshandehfard, H. R.[1]; Mohammadi, S.[2]; Bakhshandehfard, H.[3]

Type of Article: **Research**
Pp: 79-96
Received: 2023/02/15; Accepted: 2023/04/27
https://dx.doi.org/10.66224/PJAS.7.24.79

Abstract

The artifact studied in this paper is a bimetallic sword made of bronze handle and an iron blade, which was excavated from the Tol ancient cemetery, located in Talash city, Gilan province, in 2001 by Mohammad Reza Khaltabari. This research aims to study the technology and pathology of the mentioned object by conducting comparative and archeological studies using the library method, conducting technological studies using the laboratory methods of radiography, metallography, and microstructural observations using a scanning electron microscope (SEM-EDS). The phase analysis of corrosion products was done by X-ray diffraction (XRD), as well as knowing the manufacturing method and identifying the types of damage and corrosion. The result shows that this work belongs to the Iron Age. Also, the tests performed on the two parts of the handle and the blade showed that the material of the iron blade is iron-carbon alloy. The amount of carbon in different parts of the body of blade is not the same and the handle is made of bronze alloy with casting and hammering techniques. It also has a galvanic corrosion effect.

Keywords: Bimetallic Sword, Iron Age, Galvanic corrosion, Iron, Bronze, Conservation and Restoration, Tol- e Talesh.

1. Associate Professor, Department of Restoration of Historical and Cultural Objects, Faculty of Conservation and Restoration, Isfahan Art University, Isfahan, Iran (Corresponding Author).
Email: hr.bakhshan@aui.ac.ir
2. M.A. student in restoration of historical and cultural objects, Department of Restoration of Historical and Cultural Objects, Faculty of Conservation and Restoration, Isfahan Art University, Isfahan, Iran.
3. Bachelor of Pure Chemistry student, Faculty of Chemistry, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

***Motaleat-e Bastanshenasi-e Parseh* (MBP)**

Parseh Journal of Archaeological Studies
Journal of Archeology Department of Archeology Research Institute, Cultural Heritage and Tourism Research Institute (RICHT), Tehran, Iran

Publisher: *Cultural Heritage and Tourism Research Institute (RICHT).*
Copyright©2022, The Authors. This open-access article is published under the terms of the ***Creative Commons****.*

Citations: Bakhshandehfard, H. R.; Mohammadi, S. & Bakhshandehfard, H., (2023). "Study on Technology and Investigation of Damage on Iron-Bronze Bimetallic Sword Excavated from Tol-E Talesh Region". *Parseh Journal of Archaeological Studies,* 7(24): 79-96. (https://dx.doi.org/10.66224/PJAS.7.24.79).
Homepage of this Article: http://journal.richt.ir/mbp/browse.php?a_id=828&sid=1&slc_lang=en

Introduction

Iron and bronze objects have been found among the objects of Talash cemetery that have been excavated in recent years. Talash iron objects can be found around the 10th century BCE. In the collection of metal objects, daggers and swords are made of bimetallic iron and bronze. The production of iron- bronze bimetallic artifacts is one of the techniques of the Bronze age to the iron transitional period as this type of metal construction usually dates back to the beginning of the first millennium BCE (Iron Age II). The use of iron in the northern regions of Iran started about two hundred years later than in other regions of Iran (Talai, 2008). Regarding the manufacturing techniques, what is at least in the case of the western half of the Iranian plateau is the use of bimetallic (iron and bronze) manufacturing techniques.

With careful study and observation, many weapons were made using the combination of bronze and iron that can be identified in the form of bimetallic daggers and swords in the North, North-West, Central North and Central Zagros regions.

These objects were normally made of iron blade and bronze handle with the techniques of hammering and molding.

Considering the distribution of bimetallic objects as well as the homogeneous techniques used in them, it can be concluded that the technique of making bimetallic objects were more common in Iron Age societies. Based on technical studies iron was chosen due to its availability and cheaper means of access compared to bronze in making the blades of daggers and swords. Carburized iron or steel and not pure Iron is a preferred material for making tools and weapons due to its superior strength On the other hand, this can indicate the inability of their makers to mold iron handles.

Fig. 1: Tol- e Talesh Historical Cemetery (Google Map).

Unlike the handles, which by nature were formed only through molding, iron blades were made by hammering without the need of molding. Heat treatment of steel makes the blades stronger sword smiths discovered that by adding charcoal (carbon) during the iron smelting process, and by quenching to increase hardness, then tempering to take away the brittleness (Talai, 2008).

Introduction of the work

The object here from Tol ancient cemetery Talash city, Gilan province, in 2001 which was excavated by Mohammad Reza Khaltabari has a bronze hilt an iron blade and belongs to the Iron Age II period (early 1st millennium BC).

The head of the handle has two crescent-shaped appendages on both sides, which are known as ear pommel with a distinct pommel, a two-part split in the shape of earlobes, intersecting cuttings, a three-part hilt (pommel, grip and guard) and a blade with a 90-degree angle called ear pommel. The blade of the sword is thin and long and made of iron, which has undergone severe oxidation over time, so that the metal core has corroded and lost its strength (Khalatbari, 2013).

The dominant color of this object in some parts of the bronze handle is dark and light greenish-blue, and in limited light green spots on it, When copper reacts with oxygen, it oxidizes and generates a greenish-blue layer that protects the metal from further corrosion. and in the part of the blade, it is dark brown with ocher yellow and white spots. The object has considerable weight for its size, which indicates a metal core, especially in the intact part of the handle.

Fig. 2: Image of the object during excavation (Khalatbari, 2013).

Fig. 3: The back and top of the object and the side view of the object from both sides. (Original images: Soraya Mohammadi).

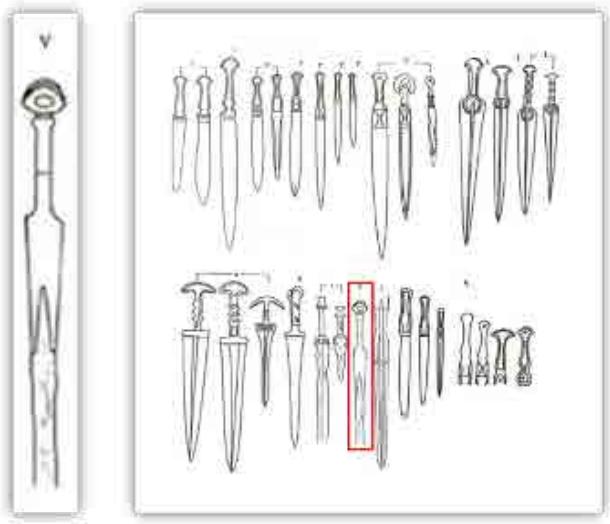

Fig. 4: Classification of small daggers, size and shape (Edvedskaya, 1982).

This metal artifact is cast in two pieces and its blade is hammered to form a sharp edge due to its military use. The blade is attached to the handle in a crescent-shaped part, and the end of the handle has an appendage in the shape of an earlobe, on which there is a linear depression on both sides, inside these depressions, there is a red-brown powdery substance which is probably the type of surface contaminated layer in the excavation environment. blade is very weak and severely corroded, so that about two-thirds of it has been corroded and lost since the time of excavation. In the studies carried out, the handle of the excavated object matched the form, size, shape and decorations of the handle in category 7 in the classification of 9 categories offered in the sources (Medvedskaya, 1982; Fahimi, 2000).

The seventh group has a special feature, which is that two types of metal are used in their construction, and the initial part of the dagger handle is shaped like an earlobe. Examples of this group were obtained in the excavations of Hasanlu IV and areas of the south of the Republic of Azerbaijan and the Caucasus. This group of daggers mostly belongs to the early 1st millennium BC (Fahimi, 2000).

Research materials and methods

Radiography: Radiography is one of the important semi-destructive methods that is used to identify internal defects, both metallic and non-metallic, and is performed based on the difference in the absorption of penetrating rays by the part under inspection (Bakhshandehfard, 2010). X-ray imaging provided important contributions to archaeology. One of the purposes for which radiography is performed is to study the metal in terms of its structure, whether it has a metal core or not (Scott, 1992) X-rays are used in radiography, and in this method, three issues should be considered. A) The material and type of the object b) The amount of potential difference (in kilovolts) c) The amount of current in milliampere per second or minute.

Non-destructive X-radiography was used in the X-radiography laboratory in Dr. Al-Hayar Esadi center located in Rasht city, with a potential difference of 70 kV and a current intensity of 10 mA and irradiating time for 2 min and from 0.5 m distance.

Metallography: Metallography is one of the most useful ways to investigate the microstructures of historical metals, which is done by examining the polished section of the metal sample with an optical microscope (Scott, 2002). Metallography is the examination and study of the cross section of metals and alloys. The purpose of metallographic study is to determine the internal structure and examine it in terms of grain size, grain boundary or distribution of grains and phases that make up the metal. In addition, structural characteristics, some types of effects of mechanical work, detection of small defects, non-metallic particles, small cracks, and in some cases determination of chemical elements of alloys can also be included among the goals of metallographic studies (Scott, 1992). The purpose of chemical etching is to reveal the different phases that make up the sample. Sometimes, chemical etching is used to show structural inconsistencies, image constituent phases, surface defects, etc. (Scott, 2002). The microstructure was studied by a polarization microscope model BK-POL/ BK-POLR (equipped with Canon Camera EOS KISS X4 CCD) and was conducted at the Isfahan Art University Laboratory to obtain information on microstructure as well the identification of existing structures, possible damage and decorations.

Scanning Electron Microscope: Nowadays, there are various methods for analyzing metal compounds, and the scanning electron microscope (SEM) is one of these methods. A scanning electron microscope is a type of electron microscope capable of photographing surfaces with a magnification of 10 to 500,000 times with a resolution of less than 1 to 20 nm (depending on the sample) [8]. In this research, field emission scanning electron microscope (FE-SEM) made by TE-SCAN Company, model MIRA3 was carried out in the SEM laboratory of Razi Applied Science Foundation, Tehran.

X-Ray diffraction: X-ray diffraction (XRD) is a non-destructive method with several applications and provides comprehensive information about the chemical composition and crystal structure of natural and industrial materials. Each crystal has its own unique X-ray pattern, which is used as a fingerprint to determine its identity. The most widespread use of XRD is in the identification of crystalline compounds based on their diffraction patterns. The device used in this test was Bruker model D8ADVANCE made in Germany by Razi Metallurgy Research Center.

Results and discussion

Radiography: X-ray radiography has been used in many cases because of its potential to visualize the internal and invisible parts of an object and provide information in a completely non-invasive manner. The object studied in this article was subjected to X-rays by the X-ray machine at Dr. Al-Hayar Esadi radiography located in Rasht city with a potential difference of 70 kV and a current of 10 mA.

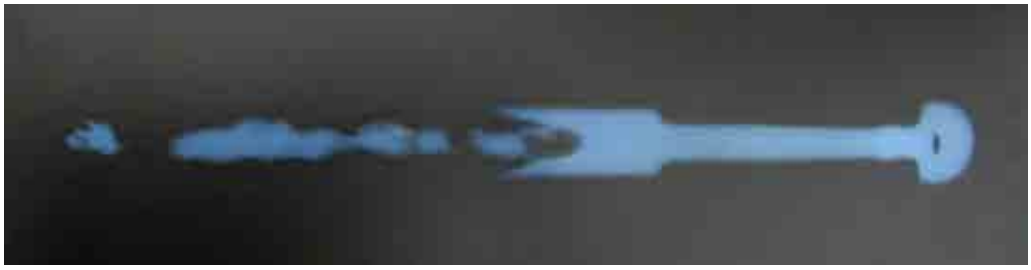

Fig. 5: The radiographic image of the object, with a potential difference of 100 kV and a current intensity of 50 mA (Original images: Soraya Mohammadi).

According to radiography observations, due to the high thickness and density and presence of the metal core, it is completely absorbed by the bronze handle, and due to the non-destruction of this part, the handle is completely light in color, but on the contrary, in the blade, due to corrosion and severe damage, only that part of the blade which has a metal core that has absorbed the rays and other parts are seen in light color, and this issue is seen in dark gray, light and black colors due to low density and increased corrosion. The separation line of the blade can be seen in the photo due to the loss of the metal core.

Metallography: According to metallographic examination, the dendritic structure of the bronze bundle is clearly visible. This structure indicates that the handle is made by casting and no other work has been done on it.

Also, in the microscopic observations, it is clear that this phenomenon is called fractal in the end part of the handle. This phenomenon is possible in objects made by a casting method (Scott, 2005).

After mounting a small piece of blade and etching it, the following results were obtained. According to the images, the metal core is in light color and the inclusions and corrosion are seen in black to light gray color. Inclusions are seen as small and almost uniform dots in the metal core. The slag streaks are visible as dark bands. The amount of carbon is more in darker areas and less in lighter areas. Corrosion deposits and iron oxides can be seen in the boundary areas and grain boundaries. According to the etched image of the blade sample by the scanning electron microscope (refer to the scanning electron microscope section), its granulation structure indicates the hammering process.

The microstructure of the blade examined in this study shows that it is wrought and annealed steel, which was formed during the hardening and it is the result of quenching in alloys such as iron and carbon, where the material is dramatically hardened by quenching because of the formation of new phase, martensite. A number of morphological features of pearlite and needle-shaped martensitic were revealed through microscopic study using deeply etched specimen. Martensite is formed in carbon steels by the rapid cooling (quenching) of the austenite form of iron at such a high rate that carbon atoms do not have time to diffuse out of the crystal structure in large enough quantities to form cementite (Fe3C). It can be said is a kind of steel, made in small crucibles. This cast steel was widely used for the manufacture of sword blades and other quality products.

Fig. 6: Specific dendritic structure in the outer part of the end of the handle (Original images: Soraya Mohammadi).

Fig. 7: (A)- Dendritic structure, copper corrosion in cored dendrites and inclusions with 200 x magnification – (B) - Dendritic structure and copper corrosion in cored dendrites, with 100 x magnification (Original images: Soraya Mohammadi).

Crucible steel is one of the earliest forms of liquid steel in ancient history. Crucible steel takes an intermediate position between bloomery or wrought iron (low carbon content, soft metal, and high melting point) and cast iron (high carbon content, brittle metal, and low melting point). The conducted studies prove that crucible steel was indeed used within Sasanian Iran (Craddock, 1995).

Scanning Electron Microscope: Moreover, In order to observe the microstructure the iron blade scanning electron microscope dispersive spectroscopy (EDS) was performed on it, in addition to semi- quantitative analysis for the local determination of chemical elements in sample. The image in SEM is gathered point by point (14 points) during the scanning. EDS spectra were collected from a different location on specimen that were structurally different and different microstructure components were identified.

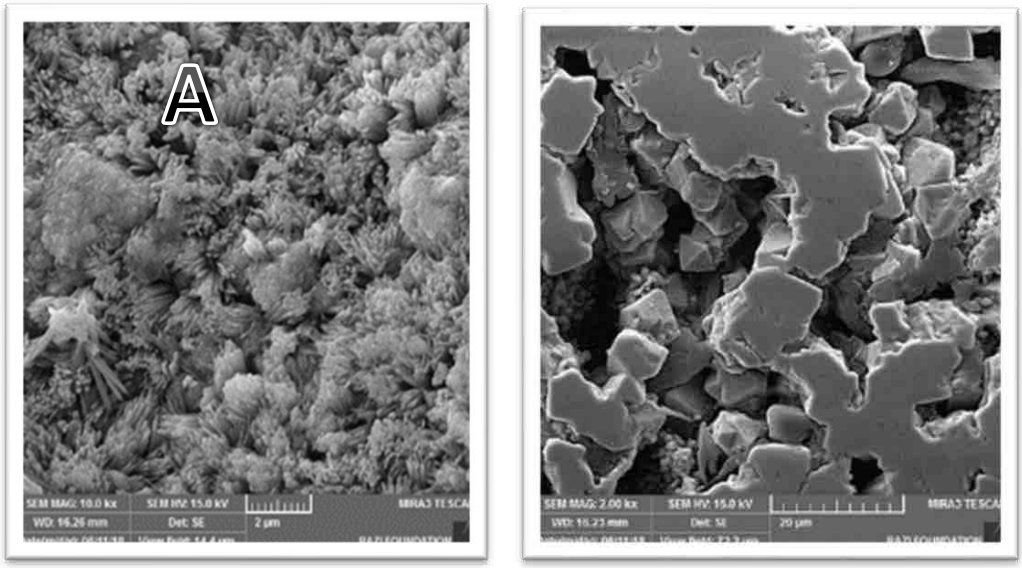

Fig. 8 . A Chemical etching image by SEM with 500 x magnification and 50 micrometers resolution, in SE mode - Original images: Soraya Mohammadi .B- Chemical etching image by SEM with 10000 x magnification and 2 micrometers resolution, in SE mode (Original images: Soraya Mohammadi).

In general, the more accurate the calculation of the concentration of the individual elements, iron, carbon, and oxygen, the materials containing the heavier elements are scattered, more BSE electrons they have, and therefore therefore, they appear brighter. Due to the higher concentration of the component, it revealed a bright component. Brighter areas in the image contain a higher percentage of iron and indicate the presence of a metallic core. Where the gray areas are dark, the percentage of carbon is higher at that point. Also, the presence of carbon indicates the structure of the iron-carbon alloy in the body. It consists of iron oxides. The results reveal the internal structure of the artifact and structural discontinuities that lead to corrosion.

In these places, the presence of iron oxide corrosion can be seen, and a significant amount of phosphorus and calcium can be seen. Phosphorus is found as an impurity in most iron deposits, or its presence causes the production of hard and brittle iron. Most historical crucible steel artefacts are plain hypereutectic carbon steels, often containing phosphorus as an additional alloying element. While the higher-than-expected amount of phosphorus is probably due to the ancient exposure of decaying organic matter and

deposition and enrichment of phosphorus on corroding iron artifacts as iron phosphate. Its presence is probably due to the presence of the object in the burial environment; calcium has entered the sediments and corrosion of the object through soil and moisture. The amount of aluminum, silicon, potassium and sodium elements which can be in the form of impurities in the alloy or elements in the soil and surface sediments is also significant.

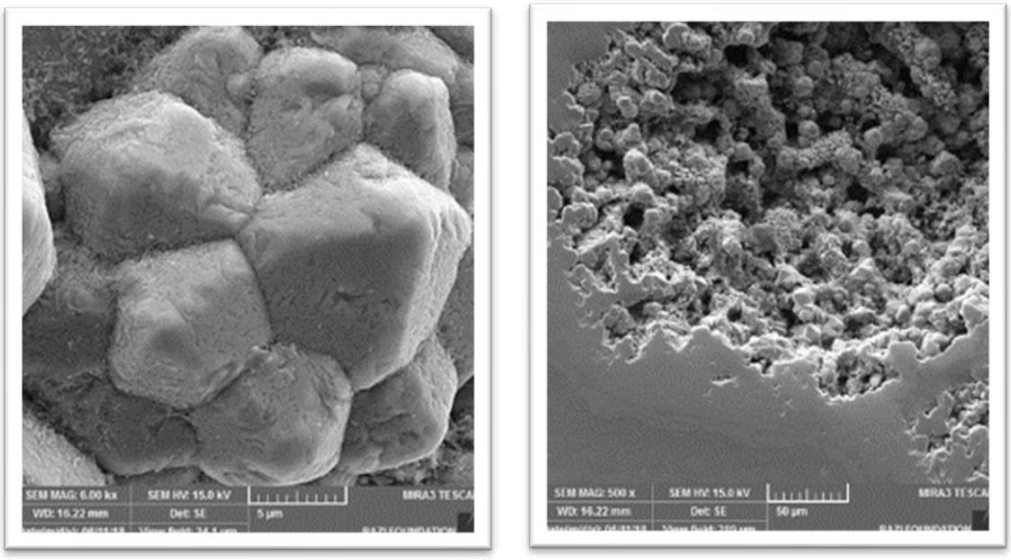

Fig. 9: A- Chemical etching by SEM with 6000 times magnification and resolution of 5 micrometers, in SE mode of ferrite mass - Original images: Soraya Mohammadi B- Chemical etching image by SEM with 2000 times magnification and resolution of 20 micrometers, in SE mode (Original images: Soraya Mohammadi).

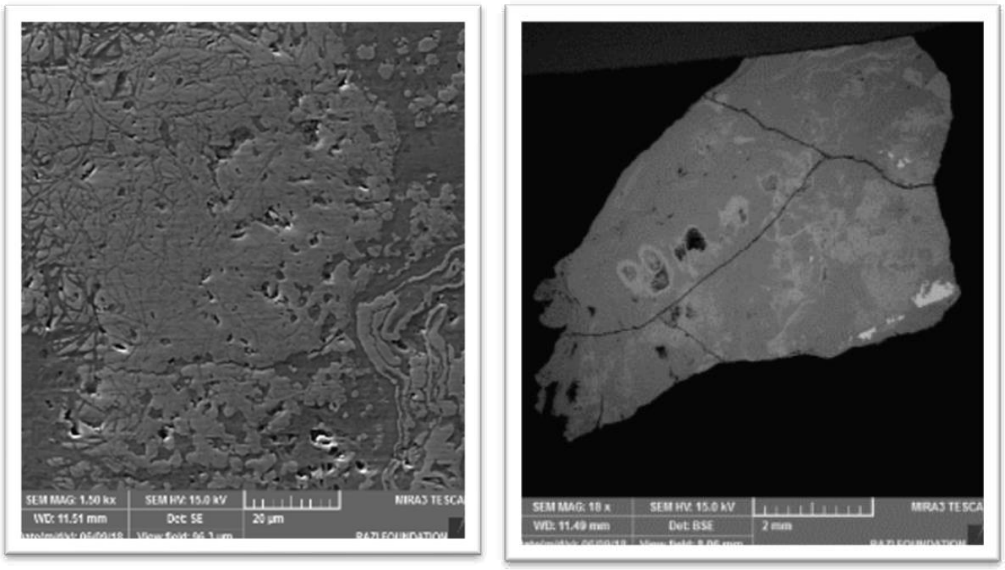

Fig. 10: A Fig. 13- SEM of an iron sample, with 18 times magnification and 2 mm resolution in BSE mode - Original images: Soraya Mohammadi B- SEM of an iron sample, with 1500 times magnification and 20 µm resolution in SE mode (Original images: Soraya Mohammadi).

X-Ray diffraction

First, the sediments and corrosion of the iron blade and the bronze handle were sampled separately, and in order to analyze the phase of the corrosion by X-ray, they were tested by the mentioned method. The qualitative diagram of phase analysis of iron blade is as follows:

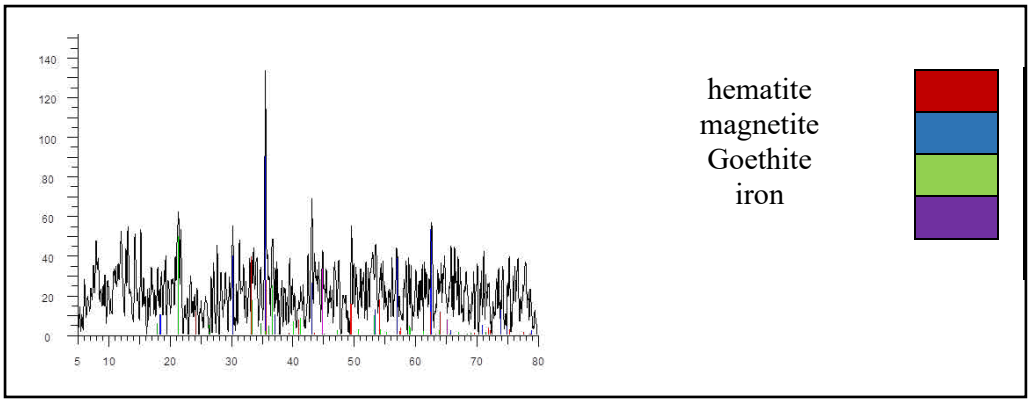

Fig. 11: Qualitative diagram of phase analysis of iron blade corrosion samples (Original images: Soraya Mohammadi).

In the results of the phase analysis of iron blades, hematite, goethite, magnetite and iron, and in the results obtained in the bronze category, basic copper carbonate (azurite) were observed. Therefore, it can be said that the patina layer, which is blue in color, is made of azurite. The presence of magnetite is probably due to the deposition of powdery particles of the blade on the handle. Also, the presence of quartz is probably related to the soil deposits on the surface of the historical work.

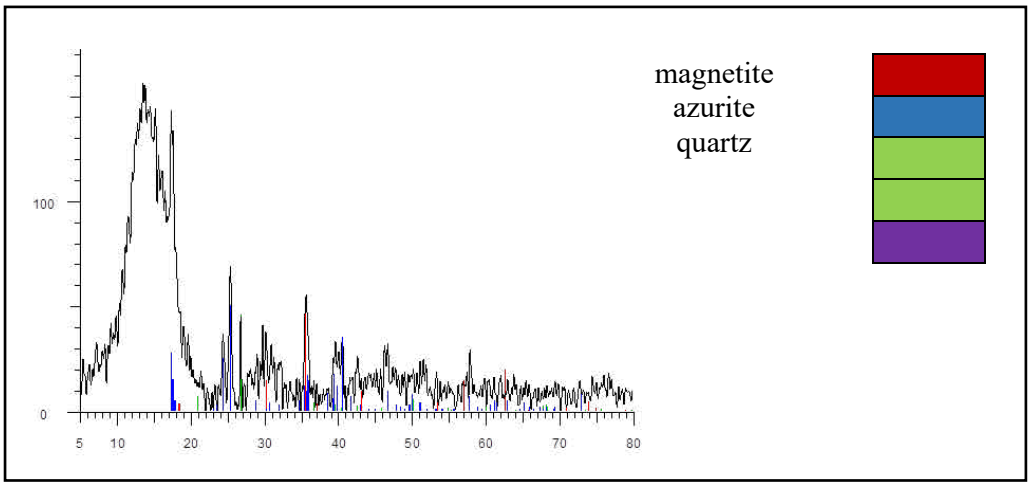

Fig. 12: Qualitative diagram of the phase analysis of corrosion samples of the bronze handle (Original images: Soraya Mohammadi).

Identify the type of corrosion

Observations in this work show that severe galvanic corrosion has occurred in the burial place due to the presence of two metals copper and iron and the presence of

moisture. When two metals with different potentials, such as iron (-0.44) and copper (+0.34) are connected, a galvanic cell is formed. A cell in which the energy source is a chemical potential difference is called a galvanic cell. So the corrosion that happens in this cell is galvanic corrosion or "bimetallic". This corrosion is natural. It is completely electrochemical and the driving force for establishing current and as a result corrosion is the potential difference that exists between two metals. The tendency of a metal to galvanic corrosion in the environment in which the metal or alloy is placed is determined in the galvanic series table. The galvanic series is a list of metals and alloys in which the metals are arranged based on their relative potentials in a specific environment. In the galvanic series, the metal corrodes when it can be connected to another metal that has more Cathodic protection. The further the position of the metal in the table is from the second metal, the higher the corrosion rate will be. For this reason, the iron blade is corroded to offer the bronze handle cathodic protection. When two non-homogeneous metals that are in electrical contact with each other are exposed to a conductive or corrosive solution, the potential difference between the anode and cathode causes an electron flow between them. When these two metals are not in electrical contact with each other, the metal with lower corrosion resistance becomes the anode and the more resistant metal (in terms of corrosion) becomes the cathode. Galvanic series relationships are useful as a guide to the selection of metals for bonding, help select metals least likely to galvanic interactions, or indicate the need or degree of shielding that should be applied to reduce expected potential interactions. In general, the further apart the materials are in the galvanic series, the greater the risk of galvanic corrosion, which must be avoided by design.

Fig. 13: Cathodic protection at the junction of the bronze handle to the iron blade (Original images: Soraya Mohammadi).

When these two metals are not in electrical contact with each other, the metal with lower corrosion resistance becomes the anode and the more resistant metal (in terms of corrosion) becomes the cathode. Usually, the cathode metal is not corroded in this type of corrosion, or the corrosion rate is very low. The characteristic of establishing an electric current between the dissimilar metals has caused this type of corrosion to be called "galvanic corrosion" or "bimetallic". Galvanic corrosion is usually more in places near the joints. Increasing the distance decreases the attacks. This corrosion is completely electrochemical in nature, and the driving force for the establishment of current is the result of the potential difference between the two metals. Increasing the distance decreases the attacks. One of the obvious examples of this type of corrosion is severe rusting of iron in objects that are made of a combination of iron and copper parts. In this case, copper remains cathodized and healthy, while iron, anodized, is severely corroded (Bakhshandehfard, 2010).

Conclusion

1- This sword belongs to the historical period of the Second Iron Age, which is made of a bronze handle and an iron blade, which was excavated in the cemetery of Tol- e Talesh.

2- According to laboratory studies and metallographic investigations in the way of making and pathology of the structure, it was observed that the handle of the object was cast in mold. Also, its iron blade is heated and hammered. These two metals are connected in the crescent-shaped part of the handle. Metallographic analysis is done based on the assumption that the microstructure is observed and it shows the dendritic structure (casting) in the bronze handle and hammering in the iron blade of iron-carbon alloy. In addition to that, slag impurities were also observed, which are related to the primary ore in the preparation of the alloy.

3- The chemical examination of the corrosion of a bronze handle was identified as basic copper carbonate and in the iron blade as iron oxides.

4- Radiographic studies showed that the bronze handle is healthy and has a metal core, but severe corrosion. It was seen in the iron blade. In corroded parts, which have a lower density than the metal core, X-rays pass through and are gray in color.

5- The structural, mineralogical, and compositional features of this artifact were determined by scanning electron microscopy. In the elemental analysis by SEM scanning electron microscope of the sample prepared from the iron blade, 14 different points were examined, and almost all of these points had a significant high level of oxygen, iron and a low level of carbon.

6- Quantitative and qualitative chemical phase identification of the complex and multi-layered corrosion products formed on the handle, performed on the bronze handle, showed basic copper carbonate and quartz compounds, and also in the iron

blade, iron oxide corrosion products (hematite, magnetite), goethite (oxide hydroxide) were identified.

Reference

- Bakhshandehfard, H. R., (2010). *Investigation of historical metal works in restoration.* Isfahan: Isfahan Art University. (Persian)

- Craddock: T., (1995). *Early Metal Mining and Production* (363 p.). Washington DC: Smithsonian Institution Press.

- Fahimi, H., (2000). *Iron Age culture in the southwestern shores of the Caspian Sea from an archaeological perspective.* Tehran: Samira.

- Khalatbari, M., (2013). *Archaeological excavations in Talesh ancient sites, Tol Gilan.* General Directorate of Cultural Heritage of Gilan Province in cooperation with the Institute of Archeology.

- Medvedskaya, I. N., (1982). *Iran: Iron I Age.* I.B.A.R. Published by: British Archaeological Reports Oxford Ltd.

- Scott, D. A., (1992). *Metallography and Microstructure of Ancient and Historic Metals.* Oxford University Press.

- Scott. D. A, (2002). *Copper and Bronze in Art.* santa monica, Getty.

- Scott. D., (2005). "Fractal Forms and the Deterioration of Artefacts". *Studies in conservation*: 179-189.

- Talaei, H., (2008). *Golden Asr Ahan Iran.* Samt Publications (Persian).

نشانی پایگاه نشریه: http://journal.richt.ir/mbp
P. ISSN: 2645-5048 & E. ISSN: 2645-5706
فصلنامهٔ علمی مطالعات باستان‌شناسی پارسه
|| شمارهٔ ۲۴ || سال هفتم || تابستان ۱۴۰۲ ||

فن شناخت و بررسی آسیب در شمشیر مفرغی - آهنی به‌دست آمده از کاوش‌های منطقهٔ تول تالش

حمیدرضا بخشنده‌فرد[I]؛ ثریا محمدی[II]؛ هومان بخشنده‌فرد[III]

نوع مقاله: پژوهشی
صص: ۹۶ - ۷۹
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۰۷
شناسهٔ دیجیتال (DOI): https://dx.doi.org/10.66224/PJAS.7.24.79

چکیده

اثر مورد مطالعه در این پژوهش، یک شمشیر با دستهٔ مفرغی و تیغهٔ آهنی است که از گورستان باستانی تول، واقع‌در شهرستان تالش استان گیلان، کشف شده است. شئ مذکور، در تاریخ ۱۳۸۱هـ.ش. در کاوش‌های علمی توسط «محمدرضا خلعتبری» به‌دست آمده است و مربوط به دورهٔ عصرآهن II (اوایل هزارهٔ اول پیش‌ازمیلاد) است. اثر مورد مطالعه دارای دوتکه، تیغهٔ آهنی و دستهٔ مفرغی است که در یک قسمت هلالی‌شکل به‌هم متصل شده‌اند. قسمت انتهای دسته، دارای فرمی به شکل لالهٔ گوش است که به «فیل گوش» معروف است. قبل از قسمت فیل گوش، یک برجستگی دیده می‌شود. این پژوهش به کمک مطالعات کتابخانه‌ای و آزمایشگاهی جهت فن‌شناسی و آسیب‌شناسی یک شمشیر با دستهٔ مفرغی و تیغهٔ آهنی، به‌دست آمده از گورستان تاریخی تول تالش، انجام شد. در این راستا با هدف مطالعهٔ فن‌شناسی و آسیب‌شناسی شئ مذکور از طریق انجام مطالعات تطبیقی و باستان‌شناسی به روش کتابخانه‌ای، انجام مطالعات فن‌شناسی به روش‌های آزمایشگاهی رادیوگرافی، متالوگرافی، مشاهدات ریزساختاری به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM-EDS) و آنالیز فازی محصولات خوردگی توسط تفرق اشعهٔ ایکس (XRD) و همچنین شناخت روش ساخت و شناسایی انواع آسیب‌ها و خوردگی‌ها انجام شد. مطالعات تطبیقی و کتابخانه‌ای تعلق این اثر را به عصر آهن نشان‌داد؛ هم‌چنین آزمایش‌های انجام شده برروی دو قسمت دسته و تیغه نشان‌داد، جنس تیغهٔ آهنی آلیاژ آهن - کربن بوده و دستهٔ اثر از آلیاژ مفرغ با تکنیک ساخت ریخته‌گری و چکش‌کاری است؛ هم‌چنین اثر دارای خوردگی گالوانیکی است.

کلیدواژگان: شمشیر مفرغی-آهنی، عصر آهن، خوردگی گالوانیکی، آهن، مرمت، حفاظت، تول تالش.

I. دانشیار گروه مرمت اشیاء تاریخی و فرهنگی، دانشکدهٔ حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران (نویسندهٔ مسئول).
Email: hr.bakhshan@aui.ac.ir
II. دانشجوی کارشناسی ارشد مرمت اشیاء تاریخی و فرهنگی، دانشکدهٔ حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران.
III. دانشجوی کارشناسی شیمی محض، دانشکدهٔ شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

ارجاع به مقاله: بخشنده‌فرد، حمیدرضا؛ محمدی، ثریا؛ و بخشنده‌فرد، هومان، (۱۴۰۲). «فن شناخت و بررسی آسیب در شمشیر مفرغی - آهنی به‌دست آمده از کاوش‌های منطقهٔ تول تالش». مطالعات باستان‌شناسی پارسه، ۷(۲۴): ۹۶-۷۹ (https://dx.doi.org/10.66224/PJAS.7.24.79).
صفحهٔ اصلی مقاله در سامانهٔ نشریه: http://journal.richt.ir/mbp/article-1-828-fa.html

ناشر: پژوهشگاه میراث‌فرهنگی و گردشگری
حق نشر متعلق به نویسنده(گان) است و نویسنده تحت مجوز Creative Commons Attribution License به مجله اجازه می‌دهد مقالهٔ چاپ شده را در سامانه به اشتراک بگذارد، منوط بر این‌که حقوق مؤلف اثر حفظ و به انتشار اولیه مقاله در این مجله اشاره شود.

مقدمه

محوطهٔ باستانی تول تالش گورستان عریض و وسیعی است که به علت رشد و گسترش روستای تول برخی قسمت‌های آن در زیر ساختمان و فضای روستا قرارگرفته است. در این گورستان چند نوع قبر یافت شده که از آن‌میان می‌توان به قبرهای کلان‌سنگی، چهارچینهٔ سنگی و حفره‌ای اشاره کرد. کاوش‌های باستان‌شناسی این گورستان در سال ۱۳۸۱هـ.ش. توسط «محمدرضا خلعتبری» با هدف شناخت تاریخ گذشته شروع شده و این محوطهٔ باستانی به‌عنوان یکی از گنجینه‌های تاریخی در فهرست آثار ملی ثبت شده است. در بررسی‌های باستانی‌شناسی بیش از ۶۰ قبر بررسی شده‌اند که از آن‌ها اطلاعات جالبی به‌دست آمده است. درمیان اشیاء مفرغی گورستان تول، تنها یک عدد شمشیر به‌دست آمد که با توجه به مجموعهٔ آثار مکشوف از منطقهٔ مذکور با نسبتی حدود ۰/۷ درصد برخوردار می‌باشد. شمشیر مزبور قبضه‌ای مفرغی دارد که احتمالاً پیرامون آن را چوب و یا استخوان دربر می‌گرفته، ولی با گذشت زمان پوسیده و از بین رفته است. سر دسته از دو سو دارای دو زائدهٔ هلالی‌شکل است که به «فیل‌گوش» معروف است. تیغهٔ شمشیر باریک و بلند و از جنس آهن است که در طول زمان دچار اکسیداسیون شدیدی شده، به‌طوری‌که مغز فلزی خورده شده و استحکام خود را ازدست داده است. رنگ غالب این شئ در قسمت دستهٔ مفرغی به رنگ آبی تیره و روشن و در نقاطی محدود به‌صورت پراکنده سبز روشن و تیره و در قسمت تیغهٔ آهنی قهوه‌ای تیره با نقاطی به رنگ زرد اُخرایی و سفید است. شئ با توجه به اندازه‌اش دارای وزن قابل‌توجهی است که نشان‌دهندهٔ مغز فلزی، به‌خصوص در قسمت باقی‌ماندهٔ دسته است. شئ به‌صورت دو تکه ریخته‌گری شده است و تیغهٔ آن به‌دلیل کاربرد جنگ‌افزاری، چکش‌کاری شده تا لبهٔ تیز آن شکل بگیرد. تیغه در یک قسمت هلالی‌شکل به دسته متصل شده و انتهای دسته دارای زائده‌ای به‌شکل لالهٔ گوش است که برروی آن در هر دو طرف یک فرورفتگی خطی است که درون این فرورفتگی‌ها، مادهٔ پودری به رنگ قرمز قهوه‌ای وجود دارد که از نوع رسوبات سطحی در محل کاوش است. تیغهٔ آهنی آن بسیار سست و دارای خوردگی شدید است، به‌طوری‌که حدود دو-سوم آن از زمان کاوش تا به امروز، دچار خوردگی شده و از بین رفته است.

این پژوهش با هدف مطالعهٔ فن‌شناسی و آسیب‌شناسی شئ مذکور از طریق انجام مطالعات تطبیقی و باستان‌شناسی به روش کتابخانه‌ای، انجام مطالعات فن‌شناسی به روش‌های آزمایشگاهی رادیوگرافی، متالوگرافی، مشاهدات ریزساختاری به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM-EDS) وآنالیز فازی محصولات خوردگی توسط پراش اشعهٔ ایکس (XRD) و هم‌چنین شناخت روش ساخت و شناسایی انواع آسیب‌ها و خوردگی‌ها انجام شد.

پرسش‌ها و فرضیات پژوهش: پرسش‌های پژوهش شامل ترکیبات عنصری، نوع آلیاژ و روش‌های ساخت شئ مذکور دقیقاً چگونه است؟ ماهیت پاتین شئ و نوع محصولات خوردگی و نوع آسیب‌ها و خوردگی‌ها در آن چیست؟ نقش ترکیبات آلیاژ در تشکیل آن چه اطلاعاتی راجع‌به ماهیت پاتین اشیاء مورد مطالعه به ما می‌دهد؟ مورفولوژی و نوع محصولات خوردگی تشکیل شده بر آن چگونه است؟

روش پژوهش: روش تحقیق ازنظر هدف کاربردی و ازنظر روش، کتابخانه‌ای، توصیفی، آزمایشگاهی و دستگاهی است. شئ مورد مطالعهٔ جنگ‌افزاری است که به شمشیر فیل‌گوش معروف است و دارای تیغهٔ آهنی و دستهٔ مفرغی است. با توجه به مطالعات انجام‌شده برروی، فرم و اندازهٔ آن جز هفتمین دسته از تقسیم‌بندی نُه‌گانهٔ انواع جنگ‌افزارهاست، که متعلق به دورهٔ تاریخی عصر آهن اوایل هزارهٔ اول پیش‌ازمیلاد است. شئ دارای تزئینات ساده است. برروی سطح دستهٔ مفرغی آن رسوبات و خوردگی‌های سطحی و پاتین به رنگ سبزآبی مشاهده شد. تیغهٔ آهنی آن نیز دارای رسوبات سطحی، خوردگی‌هایی به رنگ زرد اُخرایی و قهوه‌ای تیره است که بسیار ناپایدار است.

در این پژوهش ابتدا مطالعات کتابخانه‌ای و سپس مطالعات فن‌شناسی به روش‌های آزمایشگاهی پرداخته شد. همراه با جمع‌آوری مطالب در رابطه با مطالعات تطبیقی و کتابخانه‌ای، مشاهدات بصری، آسیب‌شناسی و مستندنگاری و بررسی‌های آزمایشگاهی و دستگاهی که با توجه به اهداف پژوهش شامل: ریز ساختارشناسی با هدف کشف روش ساخت (میکروسکوپ نوری OM)، آنالیز (SEM-EDS، اطلاعات با ارزشی دربارهٔ ریزساختار، ماهیت فلزات و شناسایی محصولات خوردگی، آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) برای شناسایی نوع فلز و کسب اطلاعاتی درمورد فرآیند ساخت و به‌ویژه شناسایی محصولات خوردگی، رادیوگرافی برای بررسی تفاوت‌های موجود در چگالی و تراکم فلزات استفاده می‌شود. در انتها پس از دستیابی به نتایج این آزمایش‌ها و آنالیزها، نتایج جهت بررسی آسیب‌ها و شناخت چگونگی روش‌های ساخت مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند.

نتیجه‌گیری

همان‌طوری‌که ذکر شد این پژوهش به کمک مطالعات کتابخانه‌ای و آزمایشگاهی جهت فن‌شناسی و آسیب‌شناسی شمشیری با دستهٔ مفرغی و تیغهٔ آهنی، به‌دست آمده از گورستان تاریخی تول تالش، انجام‌شد که نتایج زیر حاصل شد:

- مطالعات باستان‌شناسی و تطبیق اثر با نمونه‌های مشابه این نتیجه حاصل شد که شئ مذکور، متعلق به دورهٔ تاریخی عصر آهن II است.
- با توجه به ساختار مشاهده شده در متالوگرافی دسته و تیغه و فرم قرینهٔ دسته، این نتیجه حاصل شد که دستهٔ شئ به‌صورت قالب دو کفه‌ای ریخته‌گری درجا شده است. هم‌چنین تیغهٔ آهنی آن حرارت داده و چکش‌کاری شده است. این دو فلز در قسمت هلالی‌شکل دسته به‌هم متصل شده‌اند. ساختار فلزی مشاهده شده در مطالعهٔ متالوگرافی دو فلز، دال‌بر ریخته‌گری (ساختار دندریتی) در آلیاژ مفرغ و چکش‌کاری در آلیاژ آهن-کربن است. ناخالصی‌های آخال دیده شد که مربوط به سنگ معدن اولیهٔ در تهیهٔ آلیاژ است.
- به‌همین دلیل تیغهٔ آهنی خورده شده تا دستهٔ مفرغی حفاظت کاتدی گردد. هنگامی‌که دو فلز غیرهم‌جنس که در تماس الکتریکی با یک‌دیگر هستند، در معرض یک محلول هادی و یا خورنده قرار بگیرند، اختلاف پتانسیل بین آند و کاتد، باعث برقراری جریان الکترون بین آن ها می‌شود. زمانی‌که این دو فلز در تماس الکتریکی با یک‌دیگر نباشند، فلزی که مقاومت خوردگی کمتری دارد، آند شده و فلز مقاوم‌تر (از نظر خوردگی) کاتد می‌شود. معمولاً فلز کاتدی یا کاتد در این نوع خوردگی، یا اصلاً خورده نمی‌شود و یا میزان خوردگی در آن بسیار کم است. ویژگی برقراری جریان الکتریکی بین فلزات غیرهم‌جنس باعث شده است که این نوع خوردگی، «خوردگی گالوانی» یا «دو فلزی» نامیده شود. این خوردگی ماهیت کاملاً الکتروشیمیایی داشته و نیروی محرک برقراری جریان و در نتیجه خوردگی، اختلاف پتانسیلی است که بین دو فلز وجود دارد. خوردگی گالوانیکی معمولاً در نقاط نزدیک به محل اتصال‌ها بیشتر است. افزایش فاصلهٔ موجب کاهش حملات می‌شود. از نمونه‌های بارز این نوع خوردگی، زنگ‌زدگی شدید آهن در اشیائی است که به‌صورت ترکیبی از قطعات آهن و مس ساخته شده‌اند. در این حالت، مس، کاتدشده و سالم باقی می‌ماند و در مقابل آن، آهن، آند شده، به‌شدت خورده می‌شود.
- رسوبات و خوردگی های دسته به‌صورت کربنات بازی مس و در دسته بهضصورت اکسیدهای آهن شناسایی شدند. نوع خوردگی در شئ موردنظر، به‌علت وجود دو نوع فلز (مس و آهن) و به‌علت وجود رطوبت، در مکان اولیهٔ شی، به‌عنوان عامل تسریع بخش، خوردگی ایجاد شده، از نوع گالوانیکی است. به‌دلیل پایین بودن عدد آهن نسبت به مس، در جدول پتانسیل فلزات، آهن اکسایش شده و نقش آند را ایفا می‌کند، در مقابل مس، احیا شده و نقش کاتد را ایفا می‌کند.

• در بررسی رادیوگرافی، سالم بودن مغز فلزی دسته و خوردگی و آسیب شدید تیغهٔ آهنی مشاهده شد. قسمت‌هایی از شئ که دچار خوردگی شده است و چگالی کمتری نسبت به مغز فلزی دارد، اشعهٔ ایکس را از خود عبور داده و به‌صورت خاکستری رنگ خود را نشان‌دادند.

• در آنالیز عنصری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM از نمونهٔ تهیه شده از تیغهٔ آهنی، ۱۴ نقطه مختلف مورد بررسی قرار گرفتند که تقریباً همهٔ این نقاط دارای درصد قابل‌توجهی اکسیژن، آهن و درصد پایین‌تری کربن بودند؛ که وجودآلیاژ آهن-کربن و خوردگی‌های اکسیدی آهن را توجیه می‌کنند. در حالت کلی عناصری چون: آهن، کربن و اکسیژن با درصدهای متفاوت در این نقاط وجود داشتند؛ که قسمت‌های بسیار روشن در تصویر حاوی درصد آهن بالاتر و نشان‌دهندهٔ وجود مغز فلزی هستند. هرچه به سمت خاکستری‌های تیره می‌رویم درصد کربن بیشتری در آن نقطه مشاهده می‌شود. هم‌چنین حضور کربن نشان‌دهندهٔ ساختار آلیاژی آهن-کربن در شئ موردنظر است. وجود اکسیژن در این نقاط، حضور خوردگی‌های اکسیدی آهن را توجیه می‌کند. میزان قابل‌توجهی فسفر و کلسیم مشاهده شد. لازم به ذکر است، فسفر به‌عنوان ناخالصی در اغلب کانسارهای آهن یافت و وجود آن باعث تولید آهن سخت و شکننده می‌شود که این شکننده بودن با فرآیند برگشت‌دهی و انجام کار برروی آهن تاحدودی برطرف می‌شود. کلسیم نیز احتمالاً به‌دلیل وجود شئ در گورستان، ازطریق خاک و رطوبت وارد رسوبات و خوردگی‌های شئ شده است. عناصری چون: آلومینیوم، سیلیس، پتاسیم و سدیم نیز دارای درصد قابل‌توجهی هستند. این عناصر احتمالاً از طریق خاک وارد رسوبات سطحی و خوردگی‌های شئ شده‌اند. هم‌چنین به‌دلیل وجود سرباره در این نقطه ممکن است به‌عنوان ناخالصی در مذاب اولیه وجود داشته‌اند. چون عمدتاً آخال‌های سربارهٔ تک‌فاز شیشه‌ای هستند. درصد عناصر دیگر مقادیر ناچیزی است که می‌توانند به‌صورت ناخالصی موجود در آلیاژ یا عناصر موجود در خاک و رسوبات سطحی باشند نیز عناصر دیگری با درصد قابل چشم‌پوشی در بیشتر نقاط و در چندنقطه با درصد تقریباً بالاتری مشاهده شدند.

• در آنالیز فازی خوردگی‌ها که توسط پراش اشعهٔ ایکس انجام شد، ترکیبات کربنات بازی مس و کوارتز (که احتمالاً به‌همراه رسوبات سطحی به‌همراه نمونهٔ خوردگی بوده است) در نمونهٔ دسته و ترکیبات اکسیدی آهن و آهن در نمونهٔ تیغه، شناسایی شد. در نتایج به‌دست آمده تیغهٔ آهنی، هماتیت، ژئوتیت، مگنتیت و آهن مشاهده شد و در دستهٔ مفرغی، کربنات بازی مس (آزوریت) مشاهده شد؛ بنابراین می‌توان گفت پاتین در دستهٔ اثر غالب آبی رنگ، از جنس آزوریت است. وجود مگنتیت احتمالاً به‌دلیل وارد شدن ذرات پودری تیغه که برروی دسته نشسته‌اند، وارد نمونه شده است؛ هم‌چنین وجود کوارتز احتمالاً به‌دلیل وجود رسوبات خاکی به‌همراه نمونه است.