

УДК 739(55):7.025:543.42:620.18

DOI <https://doi.org/10.32782/uad.2026.2.4>**Біскулова Світлана Олександрівна,**

кандидатка хімічних наук,

доцентка кафедри мистецтвознавчої експертизи

Національної академії керівних кадрів культури і мистецтв,

провідна наукова співробітниця

Бюро науково-технічної експертизи «АРТ-ЛАБ»

ORCID ID: 0000-0003-3437-6113

sabiskulova@gmail.com

**ІЧ-СПЕКТРОСКОПІЯ З ФУР'Є-ПЕРЕТВОРЕННЯМ
У ДОСЛІДЖЕННІ ХУДОЖНЬОГО МЕТАЛУ ІРАНУ:
АНАЛІТИЧНІ МОЖЛИВОСТІ МЕТОДУ**

Метою дослідження є встановлення аналітичних можливостей інфрачервоної спектроскопії з Фур'є-перетворенням (FTIR) у вивченні художнього металу як складової декоративно-ужиткового мистецтва. Особливу увагу зосереджено на ідентифікації поверхневих шарів металевих виробів, які містять важливу інформацію про технологію виготовлення, особливості декорування та подальшу історію побутування пам'яток. Об'єктом дослідження стали вироби іранської тореутики XIII–XIV ст. з колекції Національного музею мистецтв імені Богдана та Варвари Ханенків. Предметом дослідження є використання аналітичного методу FTIR спектроскопії для ідентифікації як неорганічних продуктів корозії, так і органічного чорного матеріалу інкрустації. Методологія дослідження ґрунтується на застосуванні синтезу, аналізу, узагальнення, індукції та дедукції як теоретичних методів пізнання разом з використанням мультианалітичного підходу, що поєднує інфрачервону спектроскопію з Фур'є-перетворенням, оптичну мікроскопію та рентгенофлуоресцентний аналіз (РФА). Використання мікроскопії дозволило визначити морфологічні особливості поверхні, тоді як РФА забезпечив встановлення елементного складу металевих сплавів. У результаті дослідження методом FTIR спектроскопії встановлено, що корозійні шари латунних виробів представлені складними сумішами карбонатів, сульфатів та оксидів міді, зокрема малахітом і азурином, що підтверджується характерними смугами поглинання в інфрачервоних спектрах. Виявлено відсутність хлоридної корозії, що свідчить про сприятливі умови зберігання музейних предметів. Особливу увагу приділено дослідженню чорних інкрустаційних матеріалів, які ідентифіковано як органічні бітумно-смоляні композиції з мінеральними домішками, зокрема кальцитом і каоліном. Наукова новизна дослідження полягає у можливості застосуванні методу FTIR спектроскопії для аналізу поверхневих шарів виробів художнього металу з музейної колекції, що раніше не було системно реалізовано в українській мистецтвознавчій та технологічній практиці. Доведено, що FTIR спектроскопія є ефективним інструментом для аналізу багатокомпонентної структури поверхневих шарів художнього металу, дозволяючи отримати цінну інформацію про технології виготовлення та матеріальний склад виробів. Отримані результати мають важливе значення для атрибуції пам'яток, реконструкції традицій середньовічної металообробки та розробки науково обґрунтованих підходів до їх консервації та реставрації.

Ключові слова: інфрачервона спектроскопія з Фур'є-перетворенням, оптична мікроскопія, металопластика, декоративне мистецтво, мистецька спадщина.

Biskulova Svitlana. FTIR SPECTROSCOPY IN THE STUDY OF ARTISTIC METAL OF IRAN: ANALYTICAL CAPABILITIES OF THE METHOD

The aim of this study is to determine the analytical capabilities of Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) in the study of artistic metalwork as a component of decorative and applied arts. Particular attention is focused on identifying the surface layers of metal artefacts, which contain important information about manufacturing techniques, decorative features and the subsequent history of the artefacts' use. The objects of study are Iranian toreutic artefacts from the 13th–14th centuries from the collection of the Bohdan and Varvara Khanenko National Museum of Arts. The subject of the study is the use of the analytical method of FTIR spectroscopy to identify both inorganic corrosion products and organic black inlay material. The research methodology is based on the application of synthesis, analysis, generalisation, induction and deduction as theoretical methods of cognition, combined with a multi-analytical approach that integrates Fourier transform infrared spectroscopy, optical microscopy and X-ray

fluorescence analysis (XRF). The use of microscopy enabled the determination of the morphological features of the surface, whilst XRF allowed the elemental composition of the metal alloys to be established. As a result of the FTIR spectroscopy analysis, it was established that the corrosion layers on the brass artefacts consist of complex mixtures of carbonates, sulphates and copper oxides, in particular malachite and azurite, as confirmed by characteristic absorption bands in the infrared spectra. The absence of chloride corrosion was detected, indicating favourable storage conditions for the museum objects. Particular attention was paid to the study of black inlay materials, which were identified as organic bitumen-resin compositions with mineral impurities, notably calcite and kaolin. The scientific novelty of the study lies in the possibility of applying the FTIR spectroscopy method to analyse the surface layers of artistic metalwork from the museum collection, which had not previously been systematically implemented in Ukrainian art history and technological practice. It has been demonstrated that FTIR spectroscopy is an effective tool for analysing the multi-component structure of the surface layers of artistic metalwork, providing valuable information on the manufacturing techniques and material composition of the artefacts. The results obtained are of great significance for the attribution of artefacts, the reconstruction of medieval metalworking traditions, and the development of scientifically sound approaches to their conservation and restoration.

Key words: *Fourier transform infrared spectroscopy, microscopy, metalwork, applied art, cultural heritage.*

Вступ. Художній метал становить важливу складову декоративно-ужиткового мистецтва та охоплює широкий спектр виробів із металів і металевих сплавів, створених із застосуванням різноманітних технологій художньої обробки – карбування, гравіювання, інкрустації, чорніння, золочення та інших. Подібні об'єкти мають складну матеріальну структуру, оскільки поряд із металевою основою вони часто містять декоративні покриття, інкрустаційні матеріали та поверхневі корозійні утворення, що формуються у процесі експлуатації та тривалого зберігання. Технологічні дослідження цих компонентів має важливе значення для реконструкції технологій виготовлення, атрибуції та збереження пам'яток художнього металу. Традиційні мистецтвознавчі та технологічні дослідження металевих виробів переважно зосереджуються на аналізі металевої основи та художньо-стилістичних особливостей предметів. Водночас значна частина інформації про технологію виготовлення та подальшу історію побутування виробу міститься у поверхневих шарах – продуктах корозії, декоративних покриттях та органічних матеріалах інкрустації. Ідентифікація таких компонентів потребує застосування сучасних інструментальних методів аналізу, серед них особливе місце посідає інфрачервона спектроскопія з Фур'є-перетворенням (FTIR), яка дозволяє визначати склад органічних матеріалів та неорганічних сполук на поверхні металопластики. В англійській літературі використання методу FTIR

спектроскопії для дослідження художнього металу дають уявлення про можливості методу щодо вирішення конкретних задач у межах дослідницьких проєктів та відображено в роботах П. Креддока (P. Craddock) [1], Е. Атіла, В. Чейза і П. Джетта (E. Atil, W. T. Chase & P. Jett.) [2], М. Понтінга (M. Ponting) [3], Р. Ворда (R. Ward) [4], Д. Скотта (D. Scott) [5; 6], А. Г. Карідаса (A. G. Karydas) [7], С. Ла Ніс (S. La iese) [8; 9; 10], Е. Кателлі (E. Catelli) [11], Дж. Ді Карло (G. Di Carlo) [12], А. Стоха (A. Stoch) [13], С. Хуррама (S. Khurram) [14].

У працях українських науковців можливості і результати використання технологічних досліджень металопластики, зокрема методу FTIR спектроскопії, висвітлено недостатньо [15; 16], що обумовлює необхідність в глибшому вивченні цієї теми.

Метою даної роботи є оцінка аналітичних можливостей інфрачервоної спектроскопії у дослідженні художнього металу, для ідентифікації корозійних сполук і органічних матеріалів інкрустації. У представленій роботі використано комплексний підхід, що поєднує FTIR спектроскопію та мікроскопічний аналіз з урахуванням отриманих раніше даних про склад металевого сплаву музейних предметів методом рентгенофлуоресцентного аналізу (РФА) [16; 15]. Застосування цих методів дозволяє отримати більш повну інформацію про матеріальний склад і технологічні особливості виробів художнього металу, зокрема пам'яток іранської торетики, які відзначаються високим рівнем

обробки металу та складністю декоративних технологій. Для таких предметів характерне поєднання різних прийомів оздоблення (гравіювання, карбування та інкрустації металом або органічними матеріалами), що створює багатошарову структуру поверхні виробу. Вивчення технологічних особливостей цих пам'яток має важливе значення для розуміння традицій середньовічного металургійного ремесла Ірану, а також для їх атрибуції та збереження. У цьому контексті застосування одного з сучасних аналітичних методів, зокрема інфрачервої спектроскопії з Фур'є-перетворенням, дозволяє ідентифікувати матеріали інкрустації та корозійні продукти і відкриває нові можливості використання методу для збереження предметів мистецтва у музеях України.

Матеріали та методи. Предметом дослідження обрано вироби художнього металу – іранської торевики періоду XIII–XIV ст. з колекції Національного музею мистецтв імені Богдана та Варвари Ханенків (в подальшому Музей Ханенків). Основним аналітичним методом для дослідження поверхневих корозійних шарів металопластики та інкрустації чорним органічним матеріалом обраний метод FTIR спектроскопії. Здійснене дослідження проб природних патин і чорного органічного матеріалу інкрустацій з використанням FTIR спектрометра Vertex 70 (Bruker, Німеччина), оснащеного приставкою порушеного повного внутрішнього відбиття з алмазним вікном (attenuated total reflectance-fourier transform infrared spectroscopy, ATR-FTIR). Реєстрація та обробка спектрів здійснювалася за допомогою програмного забезпечення OPUS 6.5. Вимірювання здійснювалося в діапазоні довжини хвиль 400–4500 cm^{-1} з точністю 0,5 cm^{-1} за роздільної здатності 4 cm^{-1} .

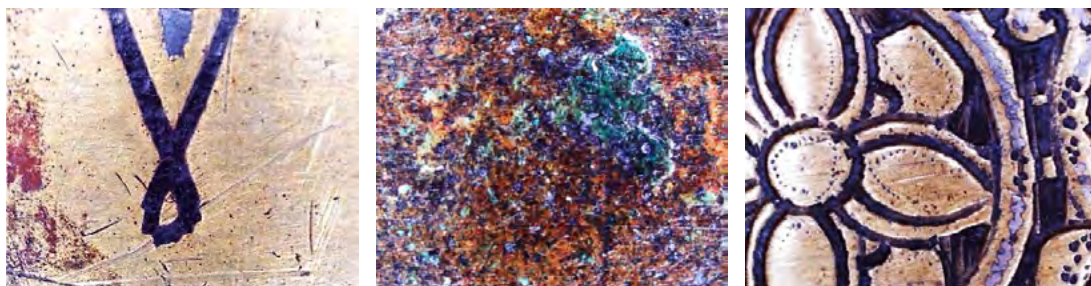
Для уточнення місць відбору проб для проведення аналізу поверхня художнього металу вивчена методом мікроскопії з використанням стереоскопічного мікроскопу МБС-10 з можливістю збільшення зображення до 100 разів та цифрової мікроскопії за допомогою USB-мікроскопу Sigeta Expert 5.0Mpx зі збільшенням зображення від 19-ти до 300 разів.

Елементний склад мідних сплавів, інкрустацій золотом і сріблом встановлено методом рентгенофлуоресцентного спектрального аналізу (РФА, X-ray fluorescence (XRF) analysis) на приладі ElvaX-ART (Elvatech Ltd., Україна), обладнаному SSD-детектором та анодною рентгенівською трубкою (W) за напруги генератора 35,0 кВ та струмі 50 мкА; використання, можливості та обмеження методу при дослідженні художнього металу (іранської торевики) обговорено в роботі [16], основні підходи щодо дослідження викладені у статті [15]. Спектри обробляли автоматично за допомогою програмного забезпечення ElvaX 2.9. Аналіз ІЧ-спектрів природних патин проводився з використанням порівняльно-аналітичного методу зі спектрами штучних патин, отриманих в лабораторних умовах, результати яких обговорені в статті Дж. Ді Карло (G. Di Carlo) [12].

Результати. Метод оптичної мікроскопії є неруйнівним методом вивчення художнього металу з мідних сплавів. Аналіз поверхні об'єктів з використанням стереоскопічного бінокулярного та цифрового мікроскопів [17, с. 25–28] дозволяє відрізнити оригінальний об'єкт від імітації давніх технологій (литво, кування, карбування), встановити техніки декорування поверхні (різьблення, гравіювання, таушування, філігрань), оздоблення кольоровими металами, нанесення покриття [2, с. 38–39, 16, с. 16–17; 4, с. 240], а також для дослідження складу корозійних шарів.

На макрофотографіях (іл. 1–3, а, б, в) представлено фрагменти поверхні виробів з художнього металу коричневого і зеленого або синьо-зеленого кольорів природної патини мідних сполук трьох предметів з колекції музею Ханенків (Інв. №№ 153 БВ, 156 БВ, 159 БВ, за вхідними даними музею).

За допомогою мікроскопічного методу відмічено на окремих ділянках внутрішньої поверхні предметів наявність природної патини коричневого і синьо-зеленого кольору (іл. 1–3, а), імовірно, основного карбонату міді [18, с. 104]. Наявність природної патини виконує захисну функцію, запобігаючи подальшій корозії металевому сплаву.



а

б

в

Іл. 1. Макрофотографії фрагментів чаші зі знаками зодіаку (Інв. № 153 БВ) (збільшення x 50): а – чорна, зелена та коричнева патина на внутрішній поверхні; б – різблення, коричнева патина і чорний органічний матеріал; в – чорний органічний матеріал та сріблення зі втратами на зовнішній поверхні.

Фото: О. Андріанова, БНТЕ «АРТ-ЛАБ»



а

б

в

Іл. 2. Макрофотографії фрагментів тазу для вмивання (Інв. № 156 БВ) (збільшення x 50): а – зелена, чорна та коричнева патина; б, в – коричнева патина і чорний органічний матеріал на зовнішній поверхні.

Фото: О. Андріанова, БНТЕ «АРТ-ЛАБ»



а

б

в

Іл. 3. Макрофотографії фрагментів чаші (для вина) зі знаками Зодіаку (Інв. № 159 БВ) (збільшення x 50): а – зелена та коричнева патина на внутрішній поверхні; б, в – чорний органічний матеріал, в – сріблення зі втратами на зовнішній поверхні. Фото: О. Андріанова, БНТЕ «АРТ-ЛАБ»

Відомо [12], що природна патина утворюється в результаті тривалого впливу на поверхню міді кисню, вологи, вуглекислого газу, сірчаних і хлоридних сполук, через що з часом формується щільний захисний шар, до складу якого входять: по-перше, оксиди міді, по-друге, основні карбонати міді ($Cu_2CO_3(OH)_2$) – у чистому повітрі;

сульфати – у промислових районах із наявністю сірчистих газів; хлориди – у морських і прибережних зонах. Предмети іранської металопластики з Музею Ханенків зберігалися довгий час в умовах музею з контрольованою температурою і вологістю, тому мають на поверхні мінімальну кількість вкраплень патини (знайдена на внутрішній

поверхні чаш і тазу для омовіння в результаті побутування, *іл. 1–3, а*).

Метод ІЧ-спектроскопії з Фур'є-перетворенням застосовується при дослідженні творів мистецтва з металів та сплавів обмежено і використовується переважно для встановлення природи патин (природні або штучні) та продуктів корозії у поверхневому шарі виробу [19, с. 1511; 11; 12; 13], виявлення декоративних покриттів органічної природи (лаки, зокрема шелак [20] і смола уруші [21, с. 251] та захисних покриттів, нанесених при консервації предметів мистецтва [17, с. 44; 11; 22, с. 185–188]. У низці сучасних наукових публікацій наведені можливості використання методу ATR-FTIR спектроскопії для встановлення складу органічних матеріалів, використаних при декорванні іранської металопластики [16, с. 23–24; 2, с. 40; 11]. У роботі [15] обговорено деякі обмеження методу, серед яких необхідність відбору проб для аналізу (під мікроскопом), можлива наявність поверхневих забруднень внаслідок побутування або покриттів, нанесених при проведенні реставраційно-консерваційних заходів, та використання бібліотек ІЧ-спектрів еталонних сполук. Перевагою методу є його можливість як експрес-вивчення об'єкту дослідження.

Проби патин синьо-зеленого або зеленого, коричневого або червоно-коричневого кольорів відібрані з восьми предметів для дослідження методом ATR-FTIR спектроскопії. Склад латуні предметів з Музею Ханнеків варіювався в діапазоні Cu 70–75%, Zn 18–24%, Pb 0.6–1%, Sn \approx 0.5%, Ni, Fe \approx 0.1%. Мідно-цинкові (Cu-Zn) сплави з незначними добавками свинцю (Pb) та олова (Sn) широко використовувалися в середньовічній іранської металообробці. Поверхневі шари корозії на цих предметах зазвичай складаються зі складних сумішей карбонатів, сульфатів та оксидів міді, які можна ефективно ідентифікувати за допомогою ІЧ-спектроскопії з перетворенням Фур'є [12].

У спектрах корозійних шарів мідних сплавів присутні характерні смуги поглинання в області 1500–1400 cm^{-1} , які відповідають валентним коливанням карбонат-іонів

і свідчать про присутність карбонатних мінералів міді, таких як малахіт ($\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$) або азурит ($\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$). В ІЧ-спектрі спостерігаються смуги 1590, 1420, 875, 750, 722 cm^{-1} для малахіту, які спричинені антисиметричними валентними коливаннями карбоксильної групи CO_3^{2-} [23]. Для азуриту характерні смуги поглинання 1490–1420, 950, 460 cm^{-1} .

У FTIR спектрі зеленої патини смуги в діапазоні 1100–1000 cm^{-1} пов'язані з коливаннями сульфат-іонів і можуть вказувати на формування таких корозійних продуктів, як брошантит ($\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6$) або антлерит ($\text{Cu}_3\text{SO}_4(\text{OH})_4$): наявність смуг поглинання в області 1100–1000 (декілька смуг), 990, 620 cm^{-1} свідчить про можливість утворення сульфатних сполук при корозії латунних сплавів. На першій стадії корозії спостерігається утворення оксидів міді (червоного куприту Cu_2O і домішки чорного тенориту CuO) [22], що підтверджується наявністю смуг в області 600–520, 420 cm^{-1} в ІЧ-спектрі.

При дослідженні художнього металу з Музею Ханнеків не відмічено наявності хлоридної корозії, яка зазвичай проявляється під впливом морської води та повітря: в ІЧ-спектрі не спостерігаються характерні смуги гідросилоридів міді (атакаміт, паратакаміт), які супроводжуються широкими смугами валентних коливань O–H у діапазоні близько 3400 cm^{-1} , також атакаміт зазвичай легко ідентифікується за наявністю інфрачервоних піків приблизно при 950 та 890 cm^{-1} [12, с. 123].

Крім того, для латунних сплавів можливе формування продуктів корозії цинку (вміст цинку в досліджених латунних предметах складає близько 20%), зокрема гідрозинкиту або оксиду цинку, які проявляються у спектрах смугами карбонатних коливань та Zn–O зв'язків у низькочастотній області спектра (у нашому випадку спостерігається сильне поглинання від 500 cm^{-1}).

У деяких випадках FTIR спектроскопія також дозволяє виявити органічні речовини на поверхні історичних металів, включаючи воски, масла або бітумні покриття. Такі матеріали можуть утворювати металеві

карбоксилати (metal soaps) у результаті реакції органічних кислот з поверхнею мідних сплавів [22, с. 185; 24, с. 7-9]. Можна припустити, що карбоксилати міді і цинку ($Zn(RCOO)_2$ і $Cu(RCOO)_2$) можуть утворюватися на поверхні латуні, про що свідчить наявність інтенсивних смуг поглинання 1590, 1542, 1468–1420 cm^{-1} .

Підсумовуючи, можна підкреслити, що дослідження корозійних шарів на поверхні виробів з латуні за допомогою методу ATR-FTIR спектроскопії є одним з найефективніших методів встановлення продуктів корозії та в подальшому ця інформація може бути використана при консерваційно-реставраційних заходах музейних експонатів.

При дослідженні предметів ісламської тореветики XIII-XIV ст. з колекції Музею Ханенків було досліджено методом ATR-FTIR чорні органічні сполуки декоративного оздоблення іранської тореветики. Встановлено (на прикладі трьох вивчених предметів (Інв. №№ 153 БВ, 156 БВ, 159 БВ) [16]), що в якості матеріалу для чорніння використано органічний вуглеводневий матеріал – бітум із смолою, який має у своєму складі поєднання органічної і неорганічної складових. Відомо [2, с. 40; 8, с. 38], що чорний органічний матеріал інкрустації описується як бітум, дьоготь або смола.

Здійснені у Британському музеї Р. Вордом і С. Ла Ніс дослідження показали [4], що, бітум, або асфальт, є темним залишком сирової нафти, яка має адгезивні та водонепроникні властивості, тому може використовуватися як чорний матеріал для декору художнього металу у країнах Близького Сходу, зокрема Ірану (Фарс) [25]. Смола або дьоготь, отримані в результаті дистиляції м'яких деревних смол, чорні, як бітуми, і використовувалися як взаємозамінні з бітумом для багатьох цілей у цих країнах. Отримані науковцями В. Чейзом і П. Джеттом результати досліджень предметів з художнього металу Ірану свідчать про те [2, с. 8], що в ісламському Середньовіччі використовувався ряд чорних органічних матеріалів, часто у поєднанні з різними неорганічними наповнювачами для ґрунтів, такими як кварц і кальцит [2, с. 40].

Автори Р. Ворд та ін. припустили [4, с. 241], що гаряча та рідка чорна інкрустація була нанесена на ґрунт у заглиблення рисунку з нерівною поверхнею для забезпечення зчеплення (іл. 1–3, б, в).

Показано, що із дев'яти кованих предметів тореветики XIII-XIV ст. з Музею Ханенків в п'яти пробах чорного матеріалу виробів виявлено бітум зі смолою, в інших 4-х предметах мікроскопічно і за допомогою ATR-FTIR встановлено наявність воску (зі смолою), імовірно, використаних задля консервації поверхні від корозії під час реставраційних заходів. Слід відмітити, що Р. Ворд [4, с. 241] спостерігали м'яку чорну воскову інкрустацію на предметах з колекції Британського музею, якою пізніше заповнювали пази, в яких колись була срібна інкрустація. Втрати срібної або золотої інкрустації та заповнення чорним матеріалом відмічалося в даному дослідженні і представлено на макрофотографіях (іл. 1, в; іл. 2, в), але остаточних даних про заповнення восковою мастикою втрат срібної інкрустації немає.

Для встановлення складу бітуму з предметів Музею Ханенків відібрано проби для аналізу (під мікроскопом). Проведений порівняльний аналіз FTIR спектрів чорного органічного матеріалу з FTIR спектром стандартного бітуму із бази Infrared & Raman Users Group (IRUG) [26]. Характерні піки в ІЧ-спектрах, віднесення їх до певних коливань груп, а також інтерпретація представлено в таблиці 1. Аналіз смуг поглинання музейних зразків №№ 153 БВ, 156 БВ, 159 БВ дає нам підставу вважати, що матеріалом інкрустації при декоруванні предметів тореветики з колекції Музею Ханенків є бітум зі смолою. Також у FTIR спектрі чорного матеріалу виявлено домішки мінеральних сполук, зокрема кальциту (карбонат кальцію) і каоліну (алюмосилікат) (табл. 1), імовірно, у складі ґрунту, нанесеному на поверхню гравірованого виробу для кращого зчеплення бітуму з поверхнею металу. Слід відзначити, що дослідження [4, с. 242] за допомогою газової хроматографії-мас-спектрометрії (ГХ-МС) чорної інкрустації зразків ісламських металевих виробів з Британського

музею показали складний характер інкрустацій. Так, перська скринька XIV ст. з колекції музею має сліди обох органічних матеріалів, як бітуму, так і хвойної смоли, що збігається з проведеними дослідженнями трьох експонатів з Музею Ханенків.

При проведенні досліджень предметів з колекції Музею Ханенків методом FTIR спектроскопії виявлено смуги поглинання чорного органічного матеріалу, які відповідають вуглеводним сполукам і смолі (IRUG бітум) та неорганічним сполукам – карбонату кальцію/кальциту та алюмосилікату/каоліну (порівняння з еталонами з власної бази БНТЕ «АРТ-ЛАБ») (табл. 1). Так, ІЧ-спектр бітуму характеризується набором смуг поглинання, що відповідають коливанням функціональних груп, типових для складної суміші вуглеводневих та кисневмісних компонентів. У високохвильовій області спектра при 2957–2852 cm^{-1} фіксуються інтенсивні смуги валентних коливань С–Н аліфатичних груп CH_2 і CH_3 , що свідчить про значну частку насичених вуглеводневих ланцюгів у структурі бітуму і смоли. У середній області спектра спостерігаються

смуги при 1735–1695 cm^{-1} , які відповідають валентним коливанням карбонільних груп С=О (кетонів, карбонових кислот, естерів), що характерно для окиснених компонентів бітуму і смоли. Широке поглинання середньої інтенсивності при 1650–1600 cm^{-1} пов'язано з валентними коливаннями С=C ароматичних структур, характерних для смолистих та асфальтенових фракцій. В області 1586–1455 cm^{-1} проявляються скелетні коливання ароматичних кілець і деформаційні коливання аліфатичних груп CH_2 та CH_3 бітуму і смолистих фракцій. Смуга при 1377 cm^{-1} відповідає деформаційним коливанням метильних груп. В області спектра 1164–1032 cm^{-1} спостерігаються смуги валентних коливань полярних зв'язків С–О та можливих S=O груп, що можуть бути пов'язані з наявністю ефірних, естерних або сульфоксидних структур бітуму (табл. 1).

Смуги 1417 інт. широка, 874 ср. інт., 716 cm^{-1} відповідають валентним коливанням карбонільної групи $\nu(\text{CO}_3^{2-})$, які присутні в бітумі як мінеральній домішці бітуму і відсутні в еталоні бітуму IRUG (табл. 1). Наявність низки смуг поглинання

Таблиця 1

Характерні смуги FTIR спектроскопії бітуму з художнього металу Музею Ханенків у порівнянні зі стандартним бітумом (IRUG)

Тип смуги поглинання	Бітум, предмети музею (cm^{-1})	IRUG бітум, еталон (cm^{-1})	Віднесення коливань	Інтерпретація
Аліфатичні С–Н	2957 м. інт., 2920, 2852	2951 пл., 2922, 2870, 2855	$\nu(\text{C-H}) \text{CH}_2, \text{CH}_3$	Вуглеводневі ланцюги аліфатичних фракцій бітуму та смоли
Карбонільні С=О	1735 ср. інт., 1723 пл., 1716, 1695	1734 пл., 1716 пл., 1698 пл.	$\nu(\text{C=O})$	Окислені органічні групи, смоли, частково бітум
Ароматичні С=C	1651, 1645, 1622, 1615	1648 м. інт., 1600 широка	$\nu(\text{C=C})$	Ароматичні скелетні коливання смоли/асфальтенів
Скелетні та деформаційні CH_2/CH_3	1586, 1558, 1540, 1462, 1455, 1377	1578 пл., 1560 пл., 1542 м. інт., 1506 м. інт., 1455 інт., 1374, 1364 пл.	$\delta(\text{CH}_2, \text{CH}_3)$	Деформації аліфатичних та ароматичних структур
Валентні груп С–О / S=O / естери	1164, 728 пл.	1168 пл., 1032 пл.	$\nu(\text{C-O}), \nu(\text{S=O})$	Полярні групи бітуму та смоли, підтвердження органічного походження
Карбонат кальцію (CaCO_3 / крейда)	1417 інт. широка, 874 ср. інт., 716	–	$\nu(\text{CO}_3^{2-})$	Мінеральний наповнювач мастики
Алюмосилікати/каолін	1015 інт. широка, 600 ср. інт., 522, 460–427, 427 інт.	–	Si–O, Al–O	Білий наповнювач, стабілізатор мастики, додає щільність і колір

(1015 інт. широка, 600 ср. інт., 522, 460–427, 427 інт. см⁻¹) пов'язана з коливаннями груп Si-O, Al-O у складі алюмосилікату/каоліну як білого наповнювача, стабілізатора мастики, який додає щільність і колір (відсутній в стандартному бітумі IRUG, табл. 1).

Таким чином, аналіз ІЧ-спектрів чорного інкрустаційного матеріалу досліджуваних іранських металевих виробів з Музею Ханенків дозволив встановити склад з органічної бітумної матриці зі смолою та мінеральними добавками. Порівняльний аналіз з технічними дослідженнями ісламського металу в Британському музеї [4; 8] показав, що чорні інкрустації у латунних виробках складаються з органічних мастик природного бітуму, модифікованому рослинними смолами, що можуть містити мінеральні домішки та наповнювачі. Археологічні зразки зазвичай являють собою суміші доісторичного бітуму (менше 30% як найпоширеніший склад) з мінеральними додатками (глина, пісок, карбонат, зола, випалена цегла тощо) [25, с. 39], які додаються для ґрунтування поверхні пазів різблення, створення темного контрастного фону, стабілізації інкрустацій і регулювання технологічних властивостей мастики та відповідають технологічним практикам, наявним в металообробці країн ісламу.

Слід додати, що більш поглиблене дослідження складу чорного матеріалу інкрустації на поверхні художнього металу потребує проведення додаткового аналізу сполук за допомогою сучасних аналітичних методів [27], які можуть надати інформацію про походження матеріалів для створення художнього металу.

Наукова новизна даного дослідження полягає у можливості застосуванні методу ATR-FTIR спектроскопії для аналізу поверхневих шарів виробів художнього металу з колекції Музею Ханенків, що раніше не було системно реалізовано в українській мистецтвознавчій та технологічній практиці. Вперше здійснено ідентифікацію корозійних продуктів мідно-цинкових сплавів пам'яток іранської тореветики XIII–XIV ст. за допомогою FTIR аналізу; встановлено склад чорних

інкрустаційних матеріалів як бітумно-смоляних композицій із мінеральними наповнювачами; доведено ефективність поєднання FTIR спектроскопії з дослідженнями методами мікроскопії та РФА для комплексного вивчення багатошарової структури художнього металу. Результати розширюють методологічну базу технологічних досліджень декоративно-ужиткового мистецтва та відкривають перспективи впровадження FTIR аналізу в практику музейної атрибуції й реставрації в Україні.

Висновки. У результаті дослідження встановлено, що інфрачервона спектроскопія з Фур'є-перетворенням є ефективним аналітичним методом для вивчення поверхневих шарів художнього металу. Використання методу ATR-FTIR дозволило ідентифікувати основні продукти корозії мідно-цинкових сплавів, зокрема карбонати (малахіт, азурит), сульфати та оксиди міді, а також підтвердити відсутність хлоридної корозії у досліджених музейних предметах. Встановлено, що чорні інкрустаційні матеріали виробів іранської тореветики XIII–XIV ст. представлені складними органо-мінеральними композиціями на основі бітуму та смоли з домішками кальциту й каоліну, що відповідає технологічним традиціям ісламської металообробки. Доведено доцільність поєднання FTIR спектроскопії з методами оптичної мікроскопії та рентгенофлуоресцентного аналізу для отримання комплексної інформації про матеріальний склад і технологічні особливості пам'яток художнього металу. Перспективи подальших досліджень полягають у розширенні вибірки об'єктів, застосуванні додаткових аналітичних методів для уточнення походження органічних матеріалів, а також у впровадженні отриманих результатів у практику реставрації та збереження культурної спадщини.

Подяка. Авторка публікації висловлює вдячність за співпрацю та участь у дослідженні директорці Бюро науково-технічної експертизи «АРТ-ЛАБ» Олені Андріановій, кандидатці хімічних наук, та заступниці директора з публічних програм і комунікації, дослідниці мистецтва ісламу Музею Ханенків Ганні Рудик.

Література:

1. Craddock P. T. Scientific investigation of copies, fakes and forgeries, 2009. Oxford; Burlington, MA : Elsevier / Butterworth-Hein. 640 p. DOI: 10.4324/9780080939001
2. Atil E., Chase W. & Jett P. Islamic Metalwork in the Freer Gallery of Art / Freer Gallery of Art. Washington, D.C. : Smithsonian Institution Press, 1985. 273 p.
3. Ponting M. J. East Meets West in Post-Classical Bet She'an : The Archaeometallurgy of Culture Change. *Journal of Archaeological Science*. 1999. Vol. 26. No. 10. P. 1311–1321.
4. Ward R., La Niece S., Hook D., White R. Veneto-Saracenic metalwork: an analysis of the bowls and incense burners in the British Museum / Eds. D. Hook & D. Gaimster. Trade and discovery: the scientific study of artefacts from post-medieval Europe and beyond (Occasional Paper 109). London : British Museum press, 1995. P. 235–258.
5. Scott D. A. Metallography and microstructure in ancient and historic metals. Singapore : Getty publications, 1992. 176 p.
6. Scott D. A. Metallography and microstructure of metallic artifacts. Archaeometallurgy in global perspective: methods and syntheses. New York : Springer New York, 2014. P. 67–89.
7. Karydas A. G. Application of a portable XRF spectrometer for the non invasive analysis of museum metal artefacts. *Annali di Chimica : Journal of Analytical, Environmental and Cultural Heritage Chemistry*. 2007. Vol. 97. No. 7. P. 419–432. DOI: 10.1002/adic.200790028.
8. La Niece S. Islamic copper-based metalwork from the eastern Mediterranean: technical investigation and conservation issues. *Studies in Conservation*. 2010. Vol. 55. No. 2. P. 35–39. DOI: 10.1179/sic.2010.55.
9. La Niece S. Medieval Islamic metal technology / In Scientific research in the field of Asian art : Proceedings of the First Forbes Symposium at the Freer Gallery of Art. London : Archetype Publications, 2003. 96 p.
10. La Niece S., Ward R., Hook D., & Craddock P. Medieval Islamic Copper Alloys. / In : Scientific Research on Ancient Asian Metallurgy, London, British Museum, 2012. P. 247–254.
11. Catelli E., et. al. Characterization of outdoor bronze monument patinas: the potentialities of near-infrared spectroscopic analysis. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018. Vol. 25. P. 24379–24393. DOI: 10.1007/s11356-018-2483-3
12. Di Carlo G., et al. Artificial patina formation onto copper-based alloys: Chloride and sulphate induced corrosion processes. *Applied Surface Science*. 2017. Vol. 421. P. 120–127. DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.01.080
13. Stoch A., et. al. FTIR study of copper patinas in the urban atmosphere. *Journal of Molecular Structure*. 2001. Vol. 596. No. 1–3. P. 201–206. DOI: 10.1016/S0022-2860(01)00718-9
14. Saleem K. Examination of ancient artefacts from Europe (2200 BC-1200 AD) using material analysis techniques : Dissertation Submitted to obtain the degree of Doctor of engineering (Dr.-Ing.) : at Faculty of engineering Kiel University, Institute for material science, August 25, 2023. 117 p.
15. Біскулова С. О., Андріанова О. Б. Технологічні дослідження художнього металу: основні підходи та методи. *Вісник Львівської національної академії мистецтв*. 2026. Подано до друку
16. Біскулова С. О., Рудик Г. Б. Комплексні дослідження групи предметів Іранського художнього металу XIII–XIV століть з колекції Музею Ханенків. *Український мистецтвознавчий дискурс*. 2025. № 6. С. 12–27. doi: <https://doi.org/10.32782/uad.2025.6.2>
17. Андріанова О. Б. Технологічні дослідження в структурі мистецтвознавчої експертизи. *Український мистецтвознавчий дискурс* : кол. моногр. / За заг. ред. В. В. Карпова; НАКККІМ. Рига : Baltija Publishing, 2020. С. 20–70. URL: <https://er.nau.edu.ua/handle/NAU/45330>
18. Nørgaard H. W. Portable XRF on Prehistoric Bronze Artefacts: Limitations and Use for the Detection of Bronze Age Metal Workshops. *Open Archaeology*. 2017. Vol. 3. P. 101–122. DOI: 10.1515/oper-2017-0006
19. Adriaens A. Non-destructive analysis and testing of museum objects : An overview of 5 years of research. *Review Spectrochimica Acta*. 2005. Part B. Vol. 60. P. 1503–1516. DOI: 10.1016/j.sab.2005.10.006
20. Giachet M. T., Schröter J., Brambilla L. Characterization and Identification of Varnishes on Copper Alloys by Means of UV Imaging and FTIR. *Coatings*. 2021. Vol. 11. P. 298. <https://doi.org/10.3390/coatings11030298>
21. Lahanier C. Scientific methods applied to the study of art objects. *Microchimica Acta*. 1991. Vol. 104. No. 1. P. 245–254. DOI: 10.1007/BF01245512
22. Mohamed W. & Darweesh S. Ancient Egyptian black-patinated copper alloys. *Archaeometry*. 2012. Vol. 54. No. 1. 175–192 pp. doi: 10.1111/j.1475-4754.2011.00602.x
23. Albano M., et al. X-rays investigations for the characterization of two 17th century brass instruments from Nuremberg. *Acta IMEKO*. 2022. Vol. 11. No. 3. P. 1–7. identifier: IMEKO-ACTA-11 (2022)-03-19
24. Boyatzis S. C., Fragkos-Livanios L., Giannoulaki M. & Filopoulou A. Infrared spectroscopy reveals the reactivity of fatty acids on copper surfaces and its implications for cultural heritage objects. *Heritage Science*. 2023. Vol. 11. No. 196. 25 p. <https://doi.org/10.1186/s40494-023-01023-1>

25. Connan J. Use and trade of bitumen in antiquity and prehistory: molecular archaeology reveals secrets of past civilizations. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B.* 1999. Vol. 354. P. 33-50. doi: 10.1098/rstb.1999.0358
26. The Infrared and Raman Users Group Spectral Database : official website. URL : <http://www.irug.org/jcamp-details?id=194> (останнє звернення 15.03.2026)
27. Mohamed N. M. & Elmetwaly M. S. Scientific investigation of the 20th century bronze bell in Asyut, Egypt: insight into materials, chemical composition and preservation status. *Archaeological and Anthropological Sciences.* 2025. Vol. 17. No. 63. 20 p. <https://doi.org/10.1007/s12520-025-02167-w>

References:

1. Craddock, P. T. (2009). *Scientific investigation of copies, fakes and forgeries.* Elsevier / Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.4324/9780080939001>
2. Atil, E., Chase, W., & Jett, P. (1985). *Islamic metalwork in the Freer Gallery of Art.* Smithsonian Institution Press.
3. Ponting, M. J. (1999). East meets West in post-classical Bet She'an: The archaeometallurgy of culture change. *Journal of Archaeological Science*, 26(10), 1311–1321.
4. Ward, R., La Niece, S., Hook, D., & White, R. (1995). Veneto-Saracenic metalwork: An analysis of the bowls and incense burners in the British Museum. In D. Hook & D. Gaimster (Eds.), *Trade and discovery: The scientific study of artefacts from post-medieval Europe and beyond (Occasional Paper 109, pp. 235–258).* British Museum Press
5. Scott, D. A. (1992). *Metallography and microstructure in ancient and historic metals.* Getty Publications.
6. Scott, D. A. (2014). *Metallography and microstructure of metallic artifacts. In Archaeometallurgy in global perspective: Methods and syntheses (pp. 67–89).* Springer New York.
7. Karydas, A. G. (2007). Application of a portable XRF spectrometer for the non-invasive analysis of museum metal artefacts. *Annali di Chimica: Journal of Analytical, Environmental and Cultural Heritage Chemistry*, 97(7), 419–432. <https://doi.org/10.1002/adic.200790028>
8. La Niece, S. (2010). Islamic copper-based metalwork from the eastern Mediterranean: Technical investigation and conservation issues. *Studies in Conservation*, 55(2), 35–39. <https://doi.org/10.1179/sic.2010.55>
9. La Niece, S. (2003). Medieval Islamic metal technology. In *Scientific research in the field of Asian art: Proceedings of the First Forbes Symposium at the Freer Gallery of Art* (p. 96). Archetype Publications.
10. La Niece, S., Ward, R., Hook, D., & Craddock, P. (2012). Medieval Islamic copper alloys. In *Scientific research on ancient Asian metallurgy* (pp. 247–254). British Museum.
11. Catelli, E., et al. (2018). Characterization of outdoor bronze monument patinas: The potentialities of near-infrared spectroscopic analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 24379–24393. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2483-3>
12. Di Carlo, G., et al. (2017). Artificial patina formation onto copper-based alloys: Chloride and sulphate induced corrosion processes. *Applied Surface Science*, 421, 120–127. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.01.080>
13. Stoch, A., et al. (2001). FTIR study of copper patinas in the urban atmosphere. *Journal of Molecular Structure*, 596(1–3), 201–206. [https://doi.org/10.1016/S0022-2860\(01\)00718-9](https://doi.org/10.1016/S0022-2860(01)00718-9)
14. Saleem, K. (2023). *Examination of ancient artefacts from Europe (2200 BC–1200 AD) using material analysis techniques (Doctoral dissertation, Kiel University, Faculty of Engineering, Institute for Material Science).*
15. Biskulova, S. O., & Andrianova, O. B. (in press). Tekhnolohichni doslidzhennia khudozhnoho metalu: osnovni pidkhody ta metody. *Visnyk Lvivskoi natsionalnoi akademii mystetstv.*
16. Biskulova, S. O., & Rudyk, H. B. (2025). Kompleksni doslidzhennia hrupy predmetiv iranskoho khudozhnoho metalu XIII–XIV stolit z kolektsii Muzeiu Khanenkiv. *Ukrainskyi mystetstvoznavchyi dyskurs*, (6), 12–27. <https://doi.org/10.32782/uad.2025.6.2>
17. Andrianova, O. B. (2020). Tekhnolohichni doslidzhennia v strukturi mystetstvoznavchoi ekspertyzy. In V. V. Karpov (Ed.), *Ukrainskyi mystetstvoznavchyi dyskurs* (pp. 20–70). Baltija Publishing. <https://er.nau.edu.ua/handle/NAU/45330>
18. Nørsgaard, H. W. (2017). Portable XRF on prehistoric bronze artefacts: Limitations and use for the detection of Bronze Age metal workshops. *Open Archaeology*, 3, 101–122. <https://doi.org/10.1515/opar-2017-0006>
19. Adriaens, A. (2005). Non-destructive analysis and testing of museum objects: An overview of 5 years of research. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 60, 1503–1516. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2005.10.006>
20. Giachet, M. T., Schröter, J., & Brambilla, L. (2021). Characterization and identification of varnishes on copper alloys by means of UV imaging and FTIR. *Coatings*, 11, 298. <https://doi.org/10.3390/coatings11030298>
21. Lahanier, C. (1991). Scientific methods applied to the study of art objects. *Microchimica Acta*, 104(1), 245–254. <https://doi.org/10.1007/BF01245512>

22. Mohamed, W., & Darweesh, S. (2012). Ancient Egyptian black-patinated copper alloys. *Archaeometry*, 54(1), 175–192. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2011.00602.x>
23. Albano, M., et al. (2022). X-rays investigations for the characterization of two 17th century brass instruments from Nuremberg. *Acta IMEKO*, 11(3), 1–7.
24. Boyatzis, S. C., Fragkos Livanios, L., Giannoulaki, M., & Filopoulou, A. (2023). Infrared spectroscopy reveals the reactivity of fatty acids on copper surfaces and its implications for cultural heritage objects. *Heritage Science*, 11, 196. <https://doi.org/10.1186/s40494-023-01023-1>
25. Connan, J. (1999). Use and trade of bitumen in antiquity and prehistory: Molecular archaeology reveals secrets of past civilizations. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 354, 33–50. <https://doi.org/10.1098/rstb.1999.0358>
26. Infrared and Raman Users Group. (n.d.). Spectral database. Retrieved March 15, 2026, from <http://www.irug.org/jcamp-details?id=194>
27. Mohamed, N. M., & Elmetwaly, M. S. (2025). Scientific investigation of the 20th century bronze bell in Asyut, Egypt: Insight into materials, chemical composition and preservation status. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 17, 63. <https://doi.org/10.1007/s12520-025-02167-w>

Дата першого надходження статті до видання: 10.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 06.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)