

УДК 616-001.45:335.5

DOI: <https://doi.org/10.22141/2224-0586.20.4.2024.1707>Хорошун Е.М.^{1,2}, Макаров В.В.^{1,2}, Негодуйко В.В.^{1,2}, Михайлов І.Ф.³, Михайлов А.І.³,
Верьовкін І.В.⁴¹Військово-медичний клінічний центр Північного регіону, м. Харків, Україна²Харківський національний медичний університет, м. Харків, Україна³Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна⁴Національний військово-медичний клінічний центр «Головний військовий клінічний госпіталь»,
м. Київ, Україна

Дослідження металевих нерентгенконтрастних сторонніх тіл вогнепального походження променевими методами

Резюме. Мета: дослідити металеві нерентгенконтрастні сторонні тіла вогнепального походження. **Матеріали та методи.** Було досліджено 5 випадків видалення сторонніх тіл м'яких тканин вогнепального походження, коли під час рентгенографії м'яких тканин кінцівок сторонні тіла не визначались, але вони були видалені під час первинної хірургічної обробки ран. Під час магнітодефекції вогнепальних ран м'яких тканин сторонні тіла не визначались. Для вивчення рентгенологічної щільності сторонні тіла були поміщені в модель з пінопласту з виконанням мультиспіральної комп'ютерної томографії (МСКТ). Для рентгеноспектрального дослідження металевих сторонніх тіл ми застосували нетрадиційні для рентгенівського аналізу довжини хвиль, що дозволило нам провести рентгенофлуоресцентні (методом рентгенофлуоресцентного аналізу (РФА)) та рентгеноструктурні дослідження. **Результати.** Рентгенологічна щільність металевих сторонніх тіл коливалась від 989 до 2123 од. за шкалою Хаусфілда. З огляду на різну товщину сторонніх тіл від 0,4 до 3,2 мм, вона у середньому становила 1700 ± 189 НУ. Пінопласт мав рентгенологічну щільність -969 НУ при розмірах моделі $200 \times 100 \times 50$ мм. При огляді зразків сторонніх тіл встановлено, що вони деформовані, мають різну товщину. З однієї сторони один зі зразків світлий та гладкий, з іншої сторони — темний та шорсткий. **Результати РФА:** склад зі світлого боку (% мас): Al — основа, Mn — 0,8, Fe — 0,3, Zn — 0,1, Cr — 0,05, Ti — 0,2. Відповідає алюмінієвому сплаву АМЦ. Темна сторона — окиснений сплав АМЦ. У спектрі темної сторони зразка виявлена лінія Вr-Ка що свідчить про участь сполук бром у процесі окиснення. З гладкої сторони зразка спектр цієї лінії не визначається. **Висновки.** Нерентгенконтрастні металеві сторонні тіла вогнепального походження є рідким явищем. Металеві сторонні тіла низької рентгенологічної щільності неферомагнітні, використання сучасного магнітного хірургічного інструменту не буде ефективним. Променева візуалізація металевих сторонніх тіл, які не визначаються при рентгенографії, можлива за допомогою мультиспіральної комп'ютерної томографії. Застосування нетрадиційної для рентгеноспектрального аналізу довжини хвилі первинного випромінювання і оригінальних рентгенооптичних схем дозволяє проводити кількісне визначення складу та структури будь-яких металевих сторонніх тіл.

Ключові слова: металеві сторонні тіла; вогнепальне поранення; нерентгенконтрастність; променеві методи

© «Медицина невідкладних станів» / «Emergency Medicine» («Medicina неотложных состояний»), 2024

© Видавець Заславський О.Ю. / Publisher Zaslavsky O.Yu., 2024

Для кореспонденції: Макаров Віталій Володимирович, доктор медичних наук, професор, завідувач кафедри хірургії № 4, Харківський національний медичний університет, пр. Науки, 4, м. Харків, 61022, Україна; e-mail: docvnmakarov@gmail.com; тел.: +380 (67) 951-83-82; лікар-хірург хірургічного відділення хірургічної клініки, Військово-медичний клінічний центр Північного регіону, вул. Культури, 5, м. Харків, 61058, Україна

For correspondence: V.V. Makarov, MD, DSc, PhD, Professor, Head of the Department of Surgery No 4, Kharkiv National Medical University, Nauky Ave., 4, Kharkiv, 61022, Ukraine; e-mail: docvnmakarov@gmail.com; phone: +380 (67) 951-83-82; Surgeon at the Surgical department of the Surgical clinic, Military Medical Clinical Center of the Northern Region, Kultury st., 5, Kharkiv, 61058, Ukraine

Full list of authors information is available at the end of the article.

Вступ

Не всі сторонні тіла вогнепального походження потребують видалення, що зумовлено особливостями взаємодії стороннього тіла з оточуючими тканинами. Показання та протипоказання до видалення сторонніх тіл вогнепального походження надані у відомих монографіях [2, 5]. Променеві методи досліджень дозволяють у більшості випадків визначитися з локалізацією та розмірами сторонніх тіл [1].

Склад металу стороннього тіла визначає наявність феромагнітних властивостей. Магнітних властивостей не мають свинець, латунь, дюралій та алюміній. За нашими даними, металеві магнітні сторонні тіла вогнепального походження становили $96,4 \pm 0,5 \%$, немагнітні — $3,6 \pm 0,5 \%$ [2, 5].

Дослідження металевих нерентгенконтрастних сторонніх тіл вогнепального походження становить клінічний інтерес, що спонукало нас надати цей матеріал.

Мета: дослідити металеві нерентгенконтрастні сторонні тіла вогнепального походження.

Матеріали та методи

Було досліджено 5 випадків видалення сторонніх тіл м'яких тканин вогнепального походження, коли під час рентгенографії м'яких тканин кінцівок сторонні тіла не

визначались, але вони були видалені під час первинної хірургічної обробки ран за допомогою загальнохірургічного інструменту. Під час магнітодетекції вогнепальних ран м'яких тканин сторонні тіла не визначались.

Для вивчення рентгенологічної щільності сторонніх тіла були поміщені в модель з пінопласту з виконанням мультиспіральної комп'ютерної томографії (МСКТ) на апараті Revolution EVO з кроком томографа 0,5 мм, 2021.

Для рентгеноспектрального дослідження металевих сторонніх тіл ми застосували нетрадиційні для рентгівського аналізу довжини хвиль, що дозволило нам провести рентгенофлуоресцентні (методом рентгенофлуоресцентного аналізу (РФА)) та рентгеноструктурні дослідження. Методологія докладно описана у роботах [7, 8].

Сторонні тіла та пінопластова модель надані на рис. 1.

Результати

Дані МСКТ металевих сторонніх тіл у пінопластовій моделі показані на рис. 2.

Рентгенологічна щільність металевих сторонніх тіл коливалась від 989 до 2123 од. за шкалою Хаусфільда

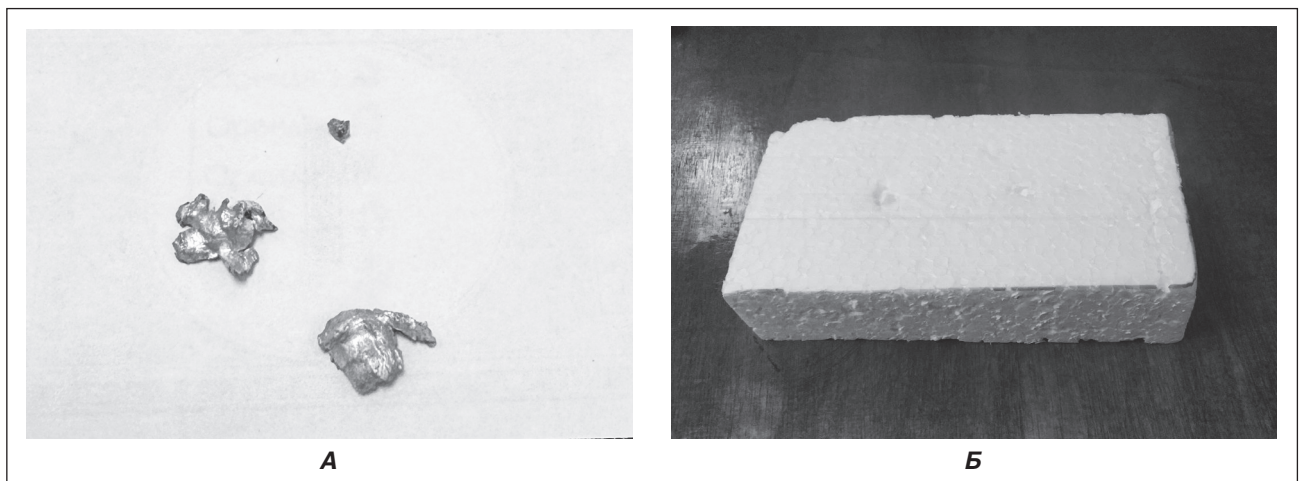


Рисунок 1. Нерентгенконтрастні металеві сторонні тіла: А — зовнішній вигляд сторонніх тіл; Б — сторонні тіла, занурені в пінопластову модель

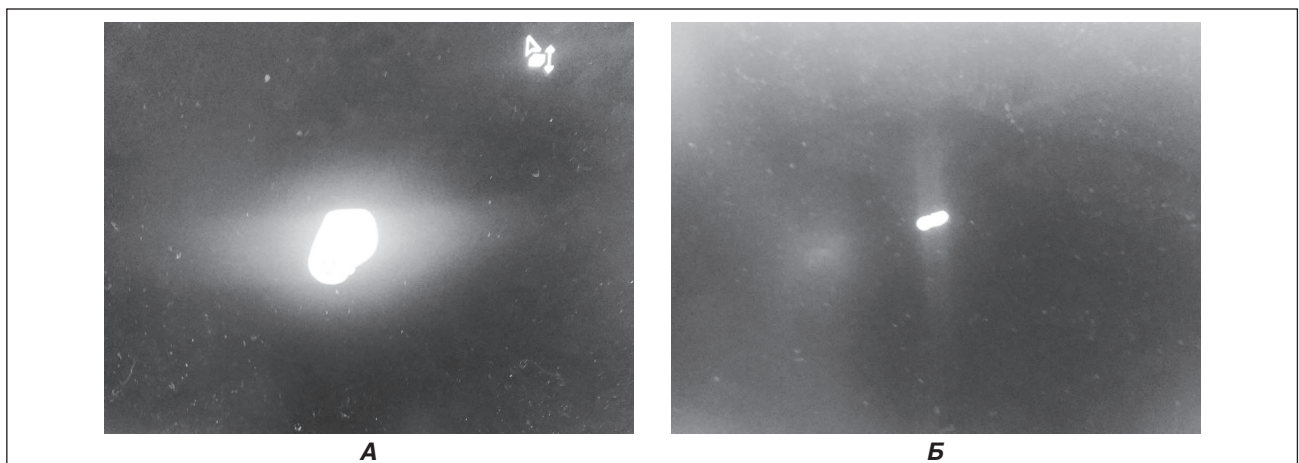


Рисунок 2. МСКТ металевих сторонніх тіл у пінопластовій моделі: А — два сторонні тіла моделі; Б — одно стороннє тіло моделі

(НУ). З огляду на різну товщину сторонніх тіл від 0,4 до 3,2 мм, вона у середньому становила 1700 ± 189 НУ. Пінопласт мав рентгенологічну щільність –969 НУ при розмірах моделі $200 \times 100 \times 50$ мм.

При огляді зразків сторонніх тіл встановлено, що вони деформовані, мають різну товщину. З однієї сторони один зі зразків світлий та гладкий, з іншої сторони — темний та шорсткий.

Результати РФА: склад зі світлого боку (% мас): А1 — основа, Mn — 0,8, Fe — 0,3, Zn — 0,1, Cr — 0,05, Ti — 0,2. Відповідає алюмінієвому сплаву АМЦ. Темна сторона — окиснений сплав АМЦ. У спектрі темної сторони зразка виявлена лінія Вг-Ка, що свідчить про участь сполук броду в процесі окиснення. З гладкої сторони зразка спектр цієї лінії не визначається. Результати РФА підтверджує дифрактограма на рис. 3.

Стандартні рентгенівські прилади, як правило, використовують рентгенівські трубки, матеріал яких, наприклад вольфрам, дає короткохвильове первинне випромінювання. Масовий коефіцієнт ослаблення випромінювання W-Ка ($\lambda = 0,211$ Å) легкими елементами (алюмінієм) становить $\mu = 0,27$ см²/г, і з цього випливає, що первинне випромінювання практично не поглинається тонким зразком, тобто не дає контрасту на зображенні.

Дійсно, рентгенівське випромінювання поглинається речовиною згідно із законом:

$$I = I_0 e^{-\mu d} \quad (1)$$

де I_0 — інтенсивність первинного випромінювання; I — інтенсивність випромінювання, що пройшло крізь матеріал; ρ — щільність матеріалу; d — його товщина.

Отже, для алюмінію $\mu = 0,27$ см²/г; $\rho = 2,7$ г/см³; $d = 0,1$ см; рівняння (1) дає значення

$$\frac{I}{I_0} \approx 0,93,$$

тобто контрастність не перевищує 7 %. Таким чином, алюміній можна вважати квазінерентгеноконтрастним металом у короткохвильовому діапазоні довжин хвиль.

Обговорення

Використання променевих методів діагностики сторонніх тіл вогнепального походження є основним [2, 4]. Випадки, коли металеве стороннє тіло не визначається рентгенографічно, але визначається візуально під час оперативного втручання, є рідкісними в практиці військового хірурга.

Спосіб попереднього визначення матеріалу та властивостей стороннього тіла [6] дозволяє визначитися зі структурою стороннього тіла та наявними або відсутніми феромагнітними властивостями. Цей спосіб може бути застосований при наявності МСКТ, інструментами якого можна визначити рентгенографічну щільність стороннього тіла. За відсутності у стороннього тіла феромагнітних властивостей сучасний хірургічний магнітний інструмент не використовують.

Рентгеноспектральний аналіз дозволяє визначити кількісний склад та структуру металевого стороннього тіла [3, 9, 10].

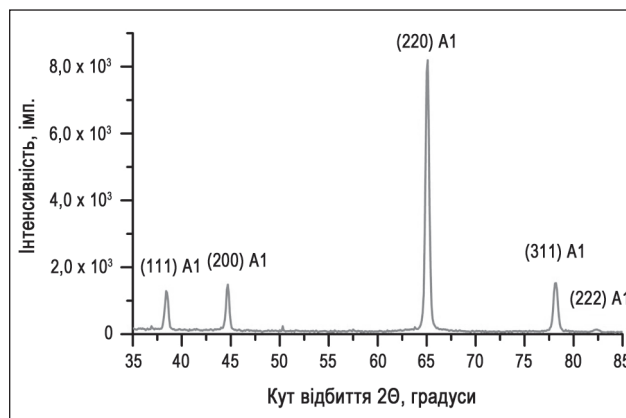


Рисунок 3. Результати рентгеноструктурного аналізу

Висновки

1. Нерентгенконтрастні металеві сторонні тіла вогнепального походження є рідким явищем.
2. Металеві сторонні тіла низької рентгенологічної щільності неферомагнітні, використання сучасного магнітного хірургічного інструменту не буде ефективним.
3. Променева візуалізація металевих сторонніх тіл, які не визначаються при рентгенографії, можлива за допомогою мультиспіральної комп'ютерної томографії.
4. Застосування нетрадиційної для рентгеноспектрального аналізу довжини хвилі первинного випромінювання і оригінальних рентгенооптичних схем дозволяє проводити кількісне визначення складу та структури будь-яких металевих сторонніх тіл.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів та власної фінансової зацікавленості при підготовці даної статті.

Список літератури

1. Атлас бойової хірургічної травми (досвід антитерористичної операції/операції об'єднаних сил). Під заг. ред. В.І. Цимбалюка. Харків: Колегіум, 2021. 385 с.
2. Вогнепальні поранення м'яких тканин (досвід антитерористичної операції/операції об'єднаних сил). Під заг. ред. В.І. Цимбалюка. Харків: Колегіум, 2020. 400 с.
3. Лурін І.А., Бойко В.В., Гуменюк К.В., Замятін П.М., Хорошун Е.М., Михайлов І.Ф. та ін. Показники інтенсивності рентгенофлюоресценції вмісту капсул металевих осколків м'яких тканин у поранених із вибуховою та вогнепальною травмою. Медицина невідкладних станів. 2022. Т. 18. № 3. С. 49-56. doi: <https://doi.org/10/22141/2224-0586.18.3.2022.1491>.
4. Моделювання вогнепальних поранень. Під заг. ред. В.І. Цимбалюка. Харків, 2022. 322 с.
5. Діагностика та видалення сторонніх тіл м'яких тканин вогнепального походження (експериментально-клінічне дослідження). Автореф. дис. ... д-ра мед. наук. Харків, 2019. 44 с.
6. Патент на корисну модель № 112648 (UA). Спосіб попереднього визначення матеріалу та властивостей стороннього тіла. Михайлусов Р.М., Негодуйко В.В., Ясинський О.В. Заявлено 13.06.2016; Опубл. 26.12.2016. Бюл. № 24.

7. Mikhailov I.F., Negoduyko V.V., Mikhaylusov R.M., Mikhailov A.I., Borisova S.S. Method for measuring X-ray reflections of microelements of inorganic compounds in soft tissues. *Funct. Mater.* 2023; 30 (3): 447-452. doi: <https://doi.org/10.15407/fm30.03.447>.

8. X-ray Fluorescent Method for the Analysis of Trace Elements in Bio-Materials with Correction of the Matrix Effect. Mikhailov I.F., Mikhailov A.I., Borisova S.S., Fomina L.P. *Rev. Sci. Instrum.* 2023; 94: 124101.

9. X-ray analysis of materials by the ratio of the intensities of incoherent and coherent scattering. Mikhailov A.I. *Functional Materials.* 2020; 27(3): 628-637.

10. Light element depth distribution by the intensity ratio of incoherent and coherent scattering. Mikhailov I.F., Baturin A.A., Mikhailov A.I., Knyazev S.A. *X-Ray Spectrom.* 2019; 48(6): 604-610.

Отримано/Received 11.04.2024

Рецензовано/Revised 21.04.2024

Прийнято до друку/Accepted 30.04.2024 ■

Information about authors

E.M. Khoroshun, Hero of Ukraine, PhD, Colonel of the Medical Service, Head of the Military Medical Clinical Center of the Northern Region, Kharkiv, Ukraine; e-mail: ehoroshun@i.ua; phone: +380 (67) 692-31-20; Associate Professor at the Department of Surgery No 4, Kharkiv National Medical University, Kharkiv, Ukraine; <https://orcid.org/0000-0003-1258-1319>

V.V. Makarov, MD, DSc, PhD, Professor, Head of the Department of Surgery No 4, Kharkiv National Medical University, Kharkiv, Ukraine; e-mail: docvmmakarov@gmail.com; phone: +380 (67) 951-83-82; Surgeon at the Surgical department of the Surgical clinic, Military Medical Clinical Center of the Northern Region, Kharkiv, Ukraine; <https://orcid.org/0000-0002-4224-0294>

V. Nehoduiko, MD, DSc, PhD, Associate Professor, Colonel of the medical service, Head of the Clinic of emergency medical care (and reception and evacuation), Military Medical Clinical Center of the Northern Region, Kharkiv, Ukraine; e-mail: vol-ramzes13@ukr.net; phone: +380 (50) 452-32-73; Professor at the Department of Surgery No. 4, Kharkiv National Medical University, Kharkiv, Ukraine; <https://orcid.org/0000-0003-4540-5207>

I.F. Mykhaylov, Doctor of physical and mathematical sciences, Senior Researcher, Chief Research Fellow at the Department of Metal and Semiconductor Physics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: m_if@ukr.net; phone: +380 (95) 100-01-81; <https://orcid.org/0000-0002-1332-5352>

A.I. Mykhaylov, Doctor of physical and mathematical sciences, Senior Researcher, Leading Research Fellow at the Department of Metal and Semiconductor Physics, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: khpi.xray@gmail.com; phone: +380 (50) 301-75-20; <https://orcid.org/0000-0001-8058-2183>

I.V. Veryovkin, Lieutenant Colonel of the Medical Service, Head of the Advanced Surgical Department, National Military Medical Clinical Center "Main Military Clinical Hospital", Kyiv, Ukraine; e-mail: inven12.08.80@gmail.com; phone: +380 (63) 647-52-31; <https://orcid.org/0009-0004-3822-4322>

Conflicts of interests. Authors declare the absence of any conflicts of interests and own financial interest that might be construed to influence the results or interpretation of the manuscript.

E.M. Khoroshun^{1,2}, V.V. Makarov^{1,2}, V.V. Nehoduiko^{1,2}, I.F. Mykhaylov³, A.I. Mykhaylov³, I.V. Veryovkin⁴

¹Military Medical Clinical Center of the Northern Region, Kharkiv, Ukraine

²Kharkiv National Medical University, Kharkiv, Ukraine

³National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

⁴National Military Medical Clinical Center "Main Military Clinical Hospital", Kyiv, Ukraine

Investigation of metal non-opaque foreign bodies of firearm origin by radiation methods

Abstract. Background. The purpose is to investigate metal non-opaque foreign bodies of firearm origin. **Materials and methods.** Five cases of removing soft tissue foreign bodies of gunshot origin were investigated, when radiography of the limb soft tissues didn't detect foreign bodies, but they were removed during the primary surgical wound debridement. X-ray of soft tissue gunshot wounds found no foreign bodies. To study radiographic density, foreign bodies were placed in a foam model with subsequent multislice computed tomography. For spectral analysis of metal foreign bodies, we used wavelengths unconventional for X-ray, which allowed to conduct X-ray fluorescence and X-ray structural studies. **Results.** Radiographic density of metal foreign bodies ranged from 989 to 2123 HU. Given the different thickness of foreign bodies, from 0.4 to 3.2 mm, the average was 1700 ± 189 HU. The foam had radiographic density of -969 HU with model dimensions of 200 100 50 mm. When examining samples of foreign bodies, it was found that they are deformed, have different thicknesses. One of the samples is light and smooth on one side, and dark and rough on the other. X-ray fluorescence

results: composition on the light side (% by mass): Al — base, Mn — 0.8, Fe — 0.3, Zn — 0.1, Cr — 0.05, Ti — 0.2, corresponding to Al-Mn alloy. The dark side is an oxidized Al-Mn alloy. In the spectrum of the dark side of the sample, the Br-K line was detected, which indicates the participation of bromine compounds in the oxidation process. From the smooth side of the sample, the spectrum of this line is not determined. **Conclusions.** Non-opaque metal foreign bodies of gunshot origin are a rare phenomenon. Metal foreign bodies with low radiographic density are non-ferromagnetic, the use of modern magnetic surgical instruments will not be effective. Visualization of metal foreign bodies, which are not determined by radiography, is possible with the help of multislice computed tomography. The use of the wavelength of primary radiation, which is unconventional for X-ray spectral analysis, and original X-ray optical schemes allows for quantitative determination of the composition and structure of any metal foreign bodies.

Keywords: metal foreign bodies; gunshot wound; non-radiopacity; radiation methods