

12

Чувствительность обнаружения микрообъектов при радиографии толстых стальных объектов с использованием нового источника микрофокусного тормозного излучения на основе бетатрона

© М.М. Рычков, В.В. Каплин, В.А. Смолянский

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия
E-mail: rychkov@tpu.ru

Поступило в Редакцию 7 апреля 2023 г.

В окончательной редакции 12 августа 2023 г.

Принято к публикации 18 августа 2023 г.

Показана возможность и оценена чувствительность обнаружения микрообъектов при радиографии толстых стальных объектов при использовании микрофокусного ($13\ \mu\text{m}$) тормозного излучения нового источника, созданного на основе бетатрона с энергией электронов $18\ \text{MeV}$. Продемонстрированы контраст изображений и разрешение пары тонких ($48\ \mu\text{m}$) проволок прибора Duplex IQI, что является основой определения чувствительности обнаружения микрообъектов.

Ключевые слова: бетатрон, пучок электронов, тормозное излучение, радиография.

DOI: 10.61011/PJTF.2023.19.56273.19583

Для рентгенографии и томографии крупногабаритных стальных изделий в качестве источников жесткого тормозного излучения, генерируемого ускоренными электронами мегаэлектронвольтовых энергий в толстых и широких внутренних мишенях, широко используются бетатроны с субмиллиметровым фокусом, например малогабаритная модель SIB-7 с энергией электронов $E_e = 7\ \text{MeV}$ и размером фокуса $\Delta F = 0.3\ \text{mm}$. Также широко используются высокоэнергетические рентгеновские трубки, например модель MXR-451HP/11 [1] с $E_e = 450\ \text{keV}$ и $\Delta F = 0.4\ \text{mm}$. Однако в широком применении отсутствуют рентгеновские трубки с энергией электронов в мегаэлектронвольтовой области, что ограничивает толщину исследуемых изделий.

Для радиографии и томографии высокого разрешения деталей крупногабаритных объектов необходимы источники жесткого тормозного излучения с микрофокальным (менее $0.1\ \text{mm}$) пятном. В работах [2,3] были представлены первые эксперименты с новым микрофокусным источником на основе бетатрона В-18 ($E_e = 18\ \text{MeV}$) с узкими кремниевыми (ширина 50 и $8\ \mu\text{m}$) и танталовой (ширина $13\ \mu\text{m}$) мишенями внутри. Увеличенные изображения проволоочной микроструктуры прибора Duplex IQI [4] и стальных пластин были получены с помощью этих мишеней, ширина которых примерно в 30 , 187 (Si) и 115 раз (Ta) меньше диаметра ($1.4\ \text{mm}$) электронного пучка. Поэтому наблюдался высокий контраст изображений пар тонких проволок прибора Duplex IQI, который используется для определения качества изображений и размера фокального пятна [5]. Также обсуждалось участие фазового контраста в формировании изображений краев пластиковых и стальных пластин при использовании Si-мишеней бетатрона В-18 [3]. В случае полихроматического тормозного излучения фазовый контраст края возможен за счет преломления излучения на крае-

вой поверхности [6]. Отметим, что идея использования внутренней мишени размером меньше диаметра пучка циклического ускорителя для уменьшения фокусного пятна тормозного излучения была впервые предложена в работах [7,8].

В [9] была показана способность источника микрофокусного тормозного излучения на основе бетатрона В-18 обнаруживать плоские микроразоры и микровключения в толстых стальных изделиях. Увеличенные изображения зазоров шириной $10\ \mu\text{m}$ между стальными блоками и танталовой фольги толщиной $13\ \mu\text{m}$, которые были помещены за стальными барьерами толщиной 40 и $55\ \text{mm}$, показали высокую чувствительность их визуализации.

В настоящей работе представлены увеличенные изображения прибора Duplex IQI при использовании микрофокусного жесткого тормозного излучения, генерируемого $18\ \text{MeV}$ -электронами в Ta-мишени ($13\ \mu\text{m}$) бетатрона. Изображения Duplex IQI были получены при радиографии другого толстого составного объекта, который был основным объектом исследования и состоял из четырех или пяти толстых стальных пластин. Пары тонких проволок прибора Duplex IQI, размещенного над составным объектом, использовались в качестве модели микрообъектов, присутствие которых не предполагалось при исследовании толстого составного объекта. Изображения Duplex IQI и основного объекта исследования, которые были помещены перед дополнительной толстой стальной пластиной толщиной $20\ \text{mm}$, позволили оценить чувствительность визуализации микрообъектов в таких сложных условиях, когда экспозиционная доза облучения, необходимая для исследования основного толстого объекта, была слишком большой для визуализации микрообъектов. В радиографии чувствительность метода определяется отношением толщины микрообъекта к тол-

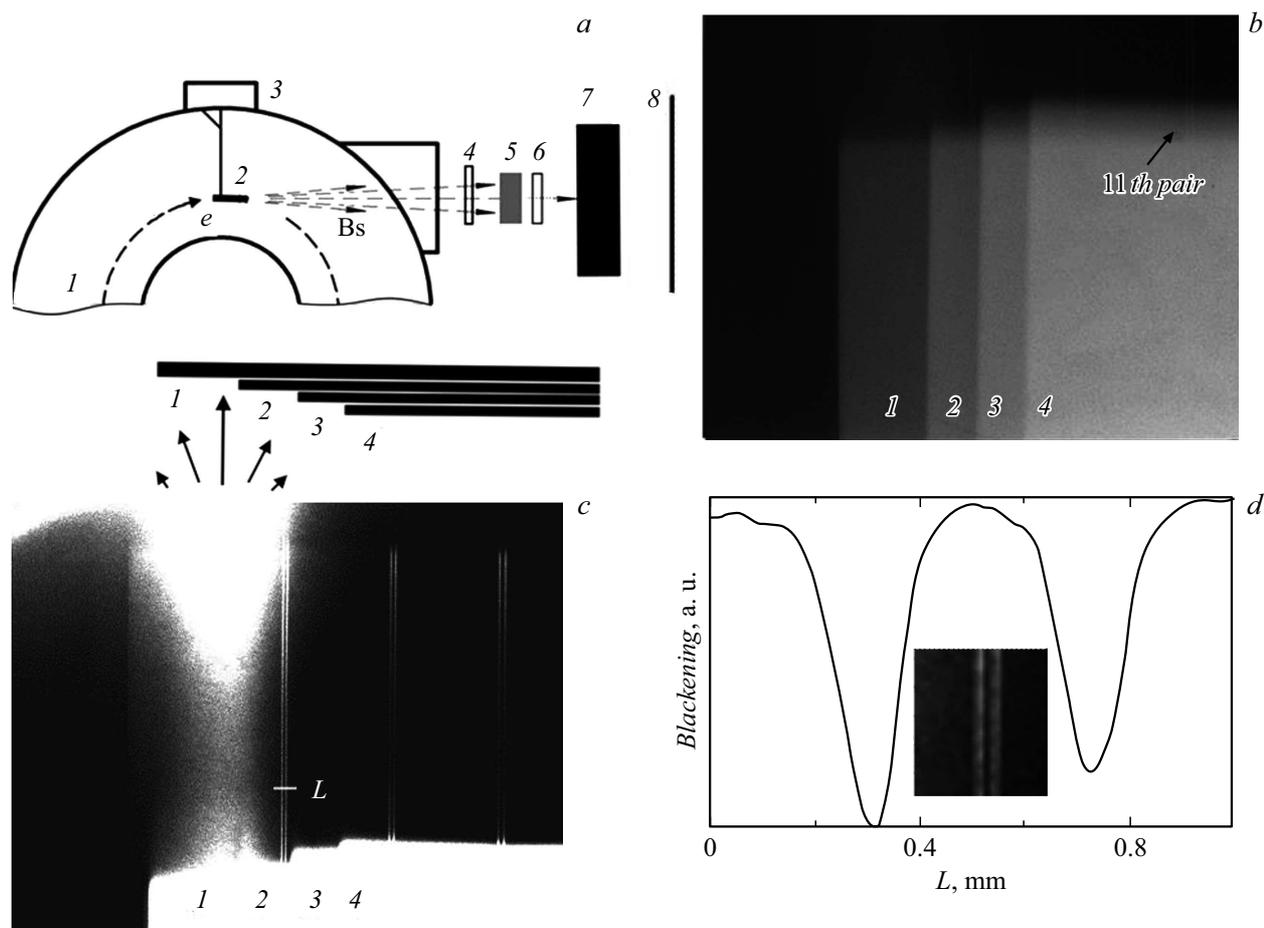


Рис. 1. *a* — схема эксперимента. 1 — камера бетатрона, 2 — мишень, 3 — гониометр, 4 — Duplex IQI, 5 — объект для рентгенографии, 6 — стальная пластина толщиной 15 мм, 7 — стальная пластина толщиной 20 мм, 8 — рентгеновская пленка; *b* — фрагмент радиографического снимка составного образца с Duplex IQI, который помещен сверху; *c* — другой фрагмент снимка составного образца с Duplex IQI, улучшенный регулированием „яркость–контраст“; *d* — денситограмма изображения 13-й пары проволок Duplex IQI. На вставке — увеличенная часть изображения 13-й пары проволок.

штине преграды, при которой изображение микрообъекта еще визуализируется на снимке. Видимость микрообъекта на снимке определяется контрастностью и степенью размытости изображения микрообъекта, которая обусловлена размером источника излучения. При увеличении размера источника контрастность изображения уменьшается из-за увеличения размытости изображения, что уменьшает чувствительность метода.

На рис. 1, *a* приведена схема эксперимента. Танталовая мишень толщиной $t = 13 \mu\text{m}$, высотой $H = 10 \text{ mm}$ и длиной вдоль пучка электронов $T = 2.5 \text{ mm}$ помещалась на гониометре внутри камеры бетатрона на радиусе, меньшем радиуса орбиты ускоряемых электронов, и ориентировалась вдоль направления пучка электронов. Дополнительное магнитное поле, создаваемое обмоткой сброса в конце режима ускорения, уменьшало радиус орбиты электронов, и они попадали на мишень. Генерированное излучение выходило через окно камеры и падало на исследуемый образец, расположенный во внешнем гониометре на расстоянии $L_1 = 48 \text{ cm}$ от ми-

шени. Рентгеновская пленка устанавливалась на расстоянии $L_2 = 114 \text{ cm}$ от мишени. Коэффициент увеличения изображения объекта составлял $M = L_2/L_1 = 2.37$. Прибор Duplex IQI располагался на расстоянии $L_1 = 38 \text{ cm}$ ($M = 3$) выше составного объекта. Снимки обрабатывались на сканере для последующего анализа.

Объект для исследования краевых изображений состоял из пластины толщиной 10 мм и трех стальных пластин толщиной 5 мм, края которых были сдвинуты относительно друг друга (1–4 на рис. 1, *a*; внизу). Duplex IQI использовался для моделирования присутствия микрообъектов (пары тонких проволок), наличие которых не предполагалось при проведении радиографии основного объекта.

На рис. 1, *b* представлен фрагмент увеличенного изображения составного объекта ($M = 2.37$) и Duplex IQI ($M = 3$). Изображение Duplex IQI, расположенное над изображением составного объекта, практически неразлично из-за слишком высокой экспозиционной дозы излучения, которая была необходима для получения

качественного изображения толстого (25 mm) исследуемого объекта. На рис. 1, *c* представлен другой фрагмент изображения, улучшенный регулированием „яркость–контраст“. Поэтому пары проволок видны, а изображение составного объекта излишне светлое и края пластин не наблюдаются.

На рис. 1, *d* представлена денситограмма изображения 13-й пары Pt-проволок диаметром $48\ \mu\text{m}$ с промежутком между ними $50\ \mu\text{m}$, измеренная по линии L , которая показана на рис. 1, *c*. Денситограмма демонстрирует высокий контраст и очень хорошее разрешение 13-й пары проволок. Минимумы на денситограмме практически не перекрываются.

В следующем эксперименте составной объект имел толщину 40 mm, так как он был дополнен пятой стальной пластиной толщиной 15 mm. Кроме того, использовалась дополнительная стальная пластина толщиной 20 mm. Пластина располагалась за прибором Duplex IQI и составным объектом на расстоянии 100 mm и служила поглотителем двух частей излучения, которые проходили только через составной объект или только через Duplex IQI.

На рис. 2, *a* показаны верхняя и нижняя части увеличенного ($M = 3$) позитивного изображения Duplex IQI с 13–8-й парами Pt-проволок и составного объекта, полученного со стальной пластиной-поглотителем. Время экспозиции было больше, чем в первом случае, для того,

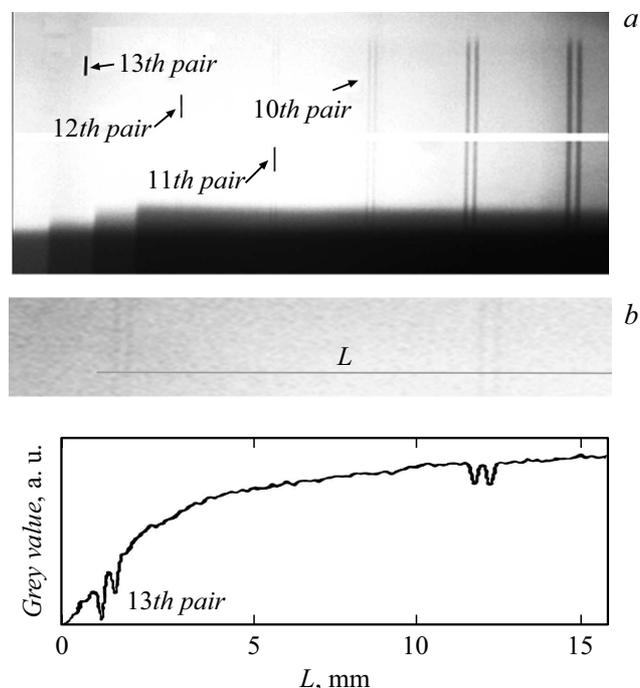


Рис. 2. *a* — верхняя и нижняя части увеличенного позитивного изображения составного объекта и Duplex IQI с 13–8-й парами Pt-проволок, полученного со стальной пластиной-поглотителем толщиной 20 mm; *b* — дополнительно увеличенный фрагмент позитивного изображения Duplex IQI с 13-й и 12-й парами Pt-проволок и денситограмма, измеренная вдоль линии L на изображении.

чтобы доза излучения была оптимальной для более толстого (40 mm) составного объекта за толстым (20 mm) барьером. Но она была избыточной для Duplex IQI. Поэтому изображения 13-й, 12-й и 11-й пар проволок не видны на этом рисунке.

На рис. 2, *b* приведен дополнительно увеличенный фрагмент позитивного изображения, показанного на рис. 2, *a*, с изображениями 13-й и 12-й пар проволок Duplex IQI. Изображение было улучшено регулированием „контраст–яркость“. Денситограмма этого изображения приведена в нижней части рис. 2, *b*. Изображения пар проволок достаточно хорошо видны и при наличии стальной пластины-поглотителя. Однако роль фонового излучения, рассеянного в исследуемом объекте и пластине-поглотителе, в формировании изображения была существенной, что понизило качество изображения Duplex IQI. Видимость 13-й пары на изображении (рис. 2, *b*) позволяет оценить чувствительность рентгенографии в этом случае. Например, при энергии фотонов $E_\gamma = 1\ \text{MeV}$ Pt-проволока диаметром $48\ \mu\text{m}$ по поглощению излучения эквивалентна стальной проволоке диаметром $149\ \mu\text{m}$. Чувствительность рентгенографии определяется отношением эквивалентной толщины проволоки к толщине пластины поглотителя и составляет около 0.75%. Однако наблюдаются достаточно высокий контраст и резкость изображения 13-й пары Pt-проволок, а также уверенно идентифицируется соответствующий этой паре двойной минимум на денситограмме. Это означает, что чувствительность метода выше, чем установленная в данном эксперименте.

Представленные изображения продемонстрировали высокий контраст и разрешение 13-й пары тонких ($48\ \mu\text{m}$) проволок прибора Duplex IQI при радиографии толстого основного объекта исследования из нескольких стальных пластин, когда экспозиционная доза излучения была не оптимальной для визуализации тонких проволок прибора. Также продемонстрирована высокая чувствительность обнаружения такого рода микрообъектов при радиографии крупногабаритных объектов с использованием микрофокусного тормозного излучения бетатрона, когда оба объекта помещены за толстой (20 mm) стальной преградой. Отметим, что изображения Duplex IQI, полученные с излучением малогабаритного бетатрона SIB-7 (энергия электронов 7 MeV, размер фокуса $\Delta F = 0.3\ \text{mm}$) и излучением рентгеновской трубки MXR-451HP/11 (энергия электронов 450 keV, $\Delta F = 0.4\ \text{mm}$), но при отсутствии составного объекта и толстого стального барьера, показали разрешение только 9-й пары Pt-проволок прибора Duplex IQI диаметром $130\ \mu\text{m}$, расположенных на расстоянии $260\ \mu\text{m}$ друг от друга.

Представленные результаты существенно дополняют результаты, полученные нами ранее в исследованиях формирования изображений объектов, собранных из тонких и толстых деталей, с участием эффектов поглощения и преломления излучения.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00249.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] https://www.comet-xray.cn/CometXRay/media/Content/pdf_mxr-451hp_11_de_v1.pdf
- [2] М.М. Рычков, В.В. Каплин, К.В. Сухарников, И.К. Васьковский, Письма в ЖЭТФ, **103** (11), 816 (2016). DOI: 10.7868/S0370274X16110126 [М.М. Rychkov, V.V. Kaplin, K. Sukharnikov, I.K. Vaskovskii, JETP Lett., **103** (11), 723 (2016). DOI: 10.1134/S0021364016110114].
- [3] М.М. Rychkov, V.V. Kaplin, E.I. Malikov, V.A. Smolyanskii, V. Gentsel'man, I.K. Vas'kovskii, J. Nondestruct. Eval., **37** (1), 13 (2018). DOI: 10.1007/s10921-018-0464-6
- [4] Website of the IE-NTD, Ltd [Электронный ресурс]. <http://ie-ndt.co.uk/en4625astme2002duplexiqi.html>
- [5] K. Bavendiek, U. Ewert, A. Riedo, U. Heike, U. Zscherpel, in *Proc. of the 18th World Conf. on nondestructive testing* (South African Institute for Non-Destructive Testing, 2012). http://www.ndt.net/article/wcndt2012/papers/346_wcndtfinal00346.pdf
- [6] S.V. Wilkins, T.E. Gureyev, D. Gao, A. Pogany, A. Stevenson, *Nature*, **384**, 335 (1996). DOI: 10.1038/384335a0
- [7] H. Yamada, *Jpn. Appl. Phys.*, **35** (2A), L182 (1996). DOI: 10.1143/JJAP.35.L182
- [8] V.S. Pushin, V.L. Chakhlov, Patent RU 2072643 (1997). <http://www.findpatent.ru/patent/207/2072643.html>
- [9] М.М. Rychkov, V.V. Kaplin, V.A. Smolyanskii, *J. Phys: Conf Ser.*, **1327**, 012014 (2019). DOI: 10.1088/1742-6596/1327/1/012014