

12

## Аномальный контраст и высокая резкость изображения острого края стальной пластины при радиографии с использованием микрофокусного тормозного излучения нового источника на основе 18 MeV 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 6 марта 2024 г.

В окончательной редакции 21 июня 2024 г.

Принято к публикации 4 июля 2024 г.

Приведено радиографическое изображение острого края стальной пластины толщиной 0.4 mm, демонстрирующее свойство микрофокусного тормозного излучения нового источника на основе бетатрона Б-18 с энергией электронов 18 MeV образовывать контрастное и резкое изображение острия края пластины. Аномалия в виде узкой светлой полосы вдоль позитивного изображения острия обеспечивает его контраст, который вместе с высокой резкостью изображения из-за микрофокуса источника позволяет определить положение острия с высокой точностью. Эффект светлой полосы не наблюдается при использовании излучений рентгеновских трубок с ускоряющими напряжениями 450 и 45 kV и размерами фокусов 400 и 80  $\mu\text{m}$ .

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

DOI: 10.61011/PJTF.2024.21.58950.19914

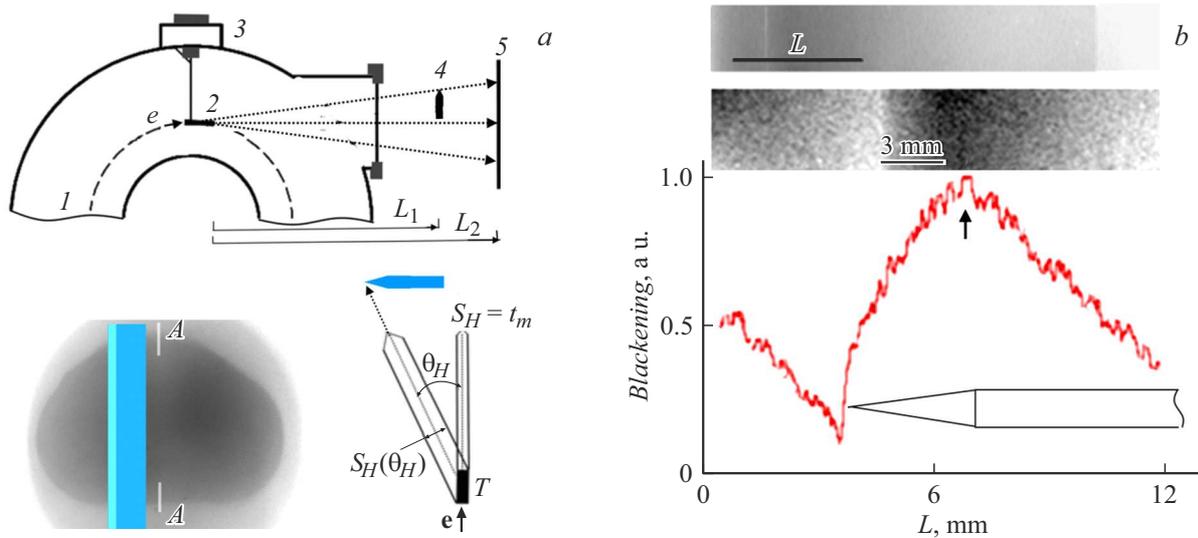
Для радиографии и томографии высокого разрешения существует необходимость создания компактных источников с микрофокальным (менее 0.1 mm) пятном и энергией излучения в мегаэлектронвольтовой области для увеличения радиационной толщины исследуемых изделий. Широко используемые высокоэнергетические микрофокусные рентгеновские трубки способны генерировать излучение с энергией только до 450 keV.

В [1,2] были проведены первые эксперименты с новым микрофокусным источником на основе бетатрона Б-18 с энергией электронов 18 MeV с узкими кремниевыми (Si) и танталовой (Ta) мишенями внутри, которые обеспечивали размер фокуса тормозного излучения в микронной области. Было показано, что указанный микрофокусный источник эффективен также и для получения увеличенных изображений с высоким контрастом и разрешением таких микрообъектов, как пары тонких проволок эталона качества изображений Duplex IQI [3]. Также отмечалось участие фазового контраста в формировании изображений краев пластиковых и стальных пластин при использовании узких (50 и 8  $\mu\text{m}$ ) Si-мишеней, что показало достаточно высокую пространственную когерентность излучения. Приведенные в [4] 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 mm, показали высокую чувствительность их визуализации при использовании излучения нового микрофокусного источника с узкой (13  $\mu\text{m}$ ) Ta-мишенью. В [5] была показана высокая чувствительность обнаружения микрообъектов при радиографии толстых стальных объ-

ектов с использованием нового источника на основе бетатрона. Отметим, что идея использования внутренней мишени размером меньше диаметра пучка циклического ускорителя для уменьшения фокусного пятна излучения была впервые предложена и исследована в [6,7].

В настоящей работе представлены экспериментальные результаты, демонстрирующие контраст и резкость радиографических изображений острого края стальной пластины, которые были получены при использовании излучения нового микрофокусного источника на основе бетатрона Б-18 и излучений рентгеновских трубок с ускоряющими напряжениями 450 и 45 kV. При микрофокусном источнике на основе бетатрона отмечена особенность в позитивном изображении острия края в виде узкой светлой полосы вдоль острия, которая означает усиление излучения, падающего на эту узкую область. Эта полоса обеспечивает контраст изображения острия и позволяет определить его положение с высокой точностью благодаря также высокой резкости изображения из-за микрофокуса источника. Такой полосы нет при использовании рентгеновских трубок с размерами фокусов 400 и 80  $\mu\text{m}$ .

Схема эксперимента с микрофокусным излучением бетатрона Б-18 приведена на рис. 1, а. Танталовая мишень толщиной  $t_m = 13 \mu\text{m}$  с вертикальным размером  $H = 10 \text{ mm}$  и длиной вдоль пучка электронов  $T = 2.5 \text{ mm}$  помещалась вертикально 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



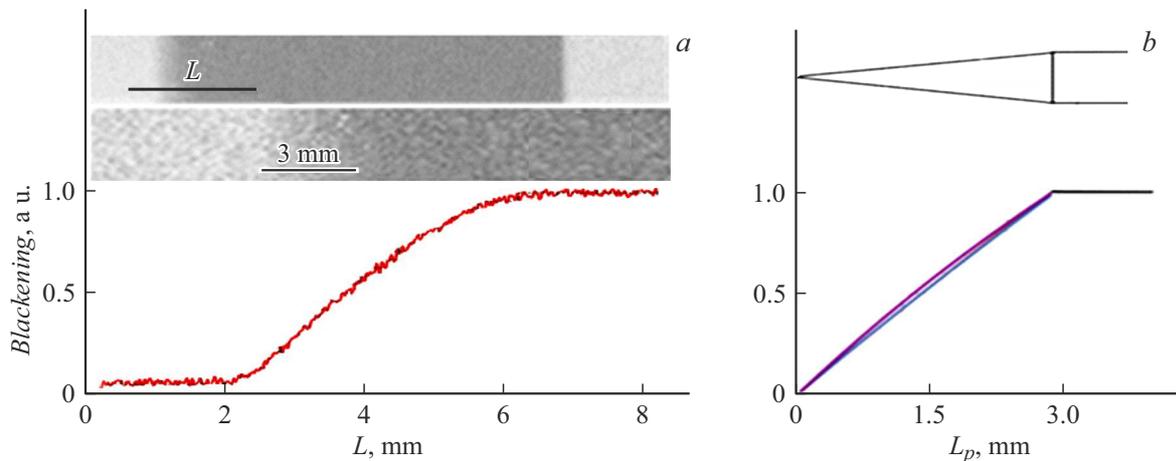
**Рис. 1.** *a* — схема эксперимента. 1 — камера бетатрона Б-18 (вид сверху); 2 — мишень, ориентированная вдоль пучка электронов; 3 — гониометр; 4 — стальная пластина с острым краем; 5 — рентгеновская пленка. Внизу приведены положение пластины с левым острым краем на пучке излучения и схема, показывающая зависимость горизонтального размера  $S_H$  источника от горизонтального угла  $\theta_H$  испускания тормозного излучения из мишени. *b* — денситограмма увеличенного ( $M = 2.43$ ) позитивного изображения (см. верхнюю вставку) острого края стальной пластины. На нижней вставке — увеличенная часть изображения острого края со светлой меткой (3 mm), которая показывает ширину изображения острого края.

режима ускорения, уменьшало радиус орбиты электронов, и они падали на мишень. Генерированное тормозное излучение с энергией до 18 MeV имеет линейный фокус с вертикальным размером, равным диаметру пучка электронов (1.4 mm), и горизонтальным размером, зависящим от горизонтального угла испускания излучения из мишени (см. вставку на рис. 1, *a*). Излучение выходило через окно камеры, закрытое лавсановой пленкой, и падало на стальную пластину толщиной  $t_p = 0.4$  mm, шириной 18 mm и длиной 10 cm, расположенную вертикально (см. вставку на рис. 1, *a*) во внешнем гониометре на расстоянии  $L_1 = 48$  cm от мишени. Рентгеновская пленка AGFA NDT D4 PbVacuPac устанавливалась на расстоянии  $L_2 = 116.5$  cm от мишени. Коэффициент увеличения изображения пластины с острым краем шириной  $l_p = 1.2$  mm, расположенной перпендикулярно оси конуса излучения, составлял  $M = L_2/L_1 = 2.43$ . Снимки обрабатывались на сканере для последующего анализа.

На рис. 1, *b* представлена денситограмма увеличенного ( $M = 2.43$ ) позитивного изображения острого края пластины, измеренная вдоль линии  $L$  на фрагменте изображения, показанном на верхней вставке. Проекция А—А плоскости Та-мишени находилась на расстоянии  $t_e = 52$  mm от изображения острого края. Поэтому [1] значение эффективного горизонтального размера  $S_H$  фокуса части излучения, падающего на левый острый край, составляет  $S_H(\theta_H) = t_m + T\theta_H = 127 \mu\text{m}$ , где  $\theta_H \approx t_e/L_2$  — горизонтальный угол испускания излучения из мишени. Контраст изображения острого края образован за счет светлой узкой полосы вдоль острого края. Эта аномалия в изображении в виде светлой полосы не объясняется

с точки зрения формирования контраста из-за поглощения излучения. Изменение поглощения излучения в этой области может дать только постепенное изменение почернения, т.е. отсутствие краевого контраста из-за постепенного уменьшения толщины  $t$  клиновидного края до  $t = 0$ . Наличие контраста и высокая резкость изображения острого края пластины из-за микрофокуса источника, которая определяется геометрической нерезкостью  $a_1 = S_H(M - 1) = 183 \mu\text{m}$  и собственной нерезкостью рентгеновской пленки, позволяют довольно точно установить положение острого края. Максимум на денситограмме, отмеченный стрелкой, соответствует началу острого края пластины. Почернение увеличивается на участке от  $L = 12$  до 6.8 mm и при  $L < 3$  mm из-за расположения пластины на склоне углового распределения излучения (фотография на рис. 1, *a*).

Постепенное уменьшение почернения наблюдалось на изображении острого края пластины, полученном с использованием рентгеновской трубки с энергией излучения до 450 keV и размером фокуса 0.4 mm. На рис. 2, *a* приведена денситограмма увеличенного ( $M = 2.3$ ) изображения острого края пластины, измеренная вдоль линии  $L$  на фрагменте изображения, приведенном на верхней вставке. На нижней вставке представлена дополнительно увеличенная часть изображения острого края пластины. Денситограмма показывает сильную размытость изображения острого края пластины из-за достаточно большого размера фокуса этого источника и постепенное уменьшение почернения на изображении по мере уменьшения толщины клиновидного края. Светлая полоса вблизи острого края пластины здесь отсутствует. Отметим, что



**Рис. 2.** *a* — денситограмма увеличенного ( $M = 2.3$ ) позитивного изображения острого края стальной пластины, полученного с рентгеновской трубкой с энергией излучения до 450 keV. Денситограмма измерена вдоль линии  $L$  на фрагменте изображения, показанном на верхней вставке. На нижней вставке — увеличенная часть изображения острия пластины. *b* — рассчитанные нормированные профили почернения на изображении острого края пластины для энергий фотонов излучения 400, 200 и 100 keV.

денситограмма показывает изменение почернения на ее склоне, очень близкое к линейному изменению толщины клиновидного края пластины.

На рис. 2, *b* приведены нормированные профили плотности почернения  $B(L_p)$  позитивного изображения острия пластины для энергий фотонов излучения 400, 200 и 100 keV, рассчитанные по приближенной формуле  $B(L_p) = N(1 - e^{-\mu k L_p})$  (где  $N$  — нормировочный коэффициент,  $\mu$  — коэффициент ослабления излучения,  $k = t_p / M l_p$ ), которая применима для  $0 < L_p < M l_p$ , а при  $L_p > M l_p$  значение  $B(L_p) = 1$ . Профили для энергий 400 и 200 keV совпадают, а зависимость для 100 keV слегка отличается от них. Рассчитанные профили почернения очень близки к профилю почернения на денситограмме изображения.

Подобная информация об изменении толщины объекта, которую можно извлечь из радиографического изображения, не всегда правильная. Для иллюстрации этого был проведен эксперимент с использованием излучения рентгеновской трубки с энергией излучения до 45 keV и размером фокуса  $80 \mu\text{m}$ . На рис. 3, *a* приведена денситограмма увеличенного ( $M = 4.3$ ) позитивного изображения острого края стальной пластины, полученного с рентгеновской трубкой с энергией излучения до 45 keV. Денситограмма была измерена вдоль линии  $L$  на фрагменте изображения, показанном на вставке. Из денситограммы следует, что изображение острия края размыто, а изменение почернения на участке изображения острого края пластины от  $L = 1$  до 6.2 mm сильно отличается от линейной зависимости почернения пленки от толщины этой части пластины.

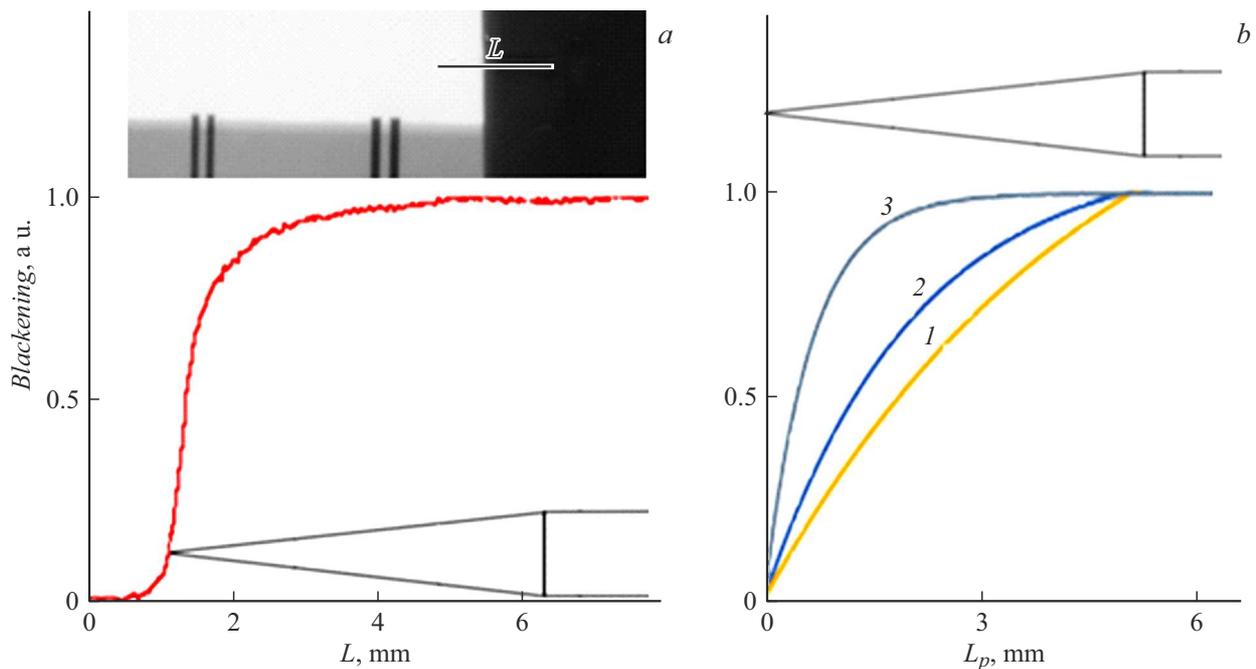
На рис. 3, *b* представлены рассчитанные по приведенной выше формуле нормированные профили почернения  $B(L_p)$  на позитивном изображении острого края пластины для энергий фотонов излучения 40, 30 и 20 keV. Видно, что профиль почернения определяется излучением

средней части спектра. Для правильного представления о распределении толщины по краю необходимо использовать источник с гораздо большей энергией излучения. Для корректного расчета необходимо учитывать спектр излучения и чувствительность рентгеновской пленки в различных частях спектра излучения.

Дополнительно отметим, что с использованием рентгеновской трубки с энергией излучения до 45 keV был проведен эксперимент на другой пластине толщиной  $t_p = 0.1 \text{ mm}$  с шириной острого края  $l_p = 0.4 \text{ mm}$ . Денситограмма увеличенного ( $M = 4.3$ ) позитивного изображения острия этой пластины также показала, что изменение почернения на соответствующем участке изображения отличается от линейной зависимости, но меньше, чем в случае пластины толщиной  $t_p = 0.4 \text{ mm}$ . Это значит, что для получения почернения пленки, отражающего линейное изменение толщины острой части и этой пластины, необходимо использовать источник с большей энергией излучения.

Представленный результат эксперимента с микрофокусным излучением источника на основе бетатрона показал, что резкость изображения острого края стальной пластины высокая из-за микрофокуса источника, а эффект аномального контраста из-за узкой светлой полосы вдоль изображения острия края не находит объяснения в рамках представлений об абсорбционном контрасте и требует дальнейших исследований.

Возможную прямо пропорциональную зависимость плотности почернения изображения от радиационной толщины различных участков объекта исследования также следует дополнительно изучить, чтобы определить соотношение между максимальной радиационной толщиной объекта и необходимой энергией излучения источника для обеспечения такой зависимости, которая даст дополнительную практически значимую информа-



**Рис. 3.** *a* — денситограмма увеличенного ( $M = 4.3$ ) позитивного изображения острого края стальной пластины, полученного с рентгеновской трубкой с энергией излучения до 45 keV. Денситограмма измерена вдоль линии  $L$  на фрагменте изображения пластины, показанном на вставке. Четыре вертикальные линии на вставке — изображения двух пар проволок эталона Duplex IQI. *b* — рассчитанные нормированные профили почернения на позитивном изображении острого края пластины для энергий фотонов излучения 40 (1), 30 (2) и 20 keV (3).

цию о форме различных деталей или дефектов составного объекта.

### Финансирование работы

Работа выполнена в рамках программы развития ТПУ.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] M.M. Rychkov, V.V. Kaplin, K. Sukharnikov, I.K. Vaskovsky, *Exp. Theor. Phys. Lett.*, **103** (11), 723 (2016). DOI: 10.1134/S0021364016110114
- [2] M.M. Rychkov, V.V. Kaplin, E.I. Malikov, V.A. Smolyanskii, V. Gentsef'man, I.K. Vas'kovskii, *J. Nondestruct. Eval.*, **37** (1), 13 (2018). DOI: 10.1007/s10921-018-0464-6
- [3] IE-NTD Ltd. [Электронный ресурс]. <http://ie-ndt.co.uk/en4625astme2002duplexiqi.html>
- [4] M.M. Rychkov, V.V. Kaplin, V.A. Smolyanskii, *J. Phys: Conf. Ser.*, **1327**, 012014 (2019). DOI: 10.1088/1742-6596/1327/1/012014
- [5] М.М. Рычков, В.В. Каплин, В.А. Смолянский, *Письма в ЖТФ*, **49** (19), 43 (2023). DOI: 10.21883/PJTF.2023.19.56273.19583 [M.M. Rychkov, V.V. Kaplin, V.A. Smolyanskiy, *Tech. Phys. Lett.*, **49** (10), 37 (2023). DOI: 10.61011/TPL.2023.10.57055.19583].

[6] H. Yamada, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **35** (2A), L182 (1996). DOI: 10.1143/JJAP.35.L182

[7] V.S. Pushin, V.L. Chakhlov, patent RU 2072643 (1997). <http://www.findpatent.ru/patent/207/2072643.html>