

УДК 621.384.6

АНОМАЛИЯ ВО ВЗАИМОДЕЙСТВИИ МИКРОФОКУСНОГО ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НОВОГО ИСТОЧНИКА НА ОСНОВЕ 18 МэВ-БЕТАТРОНА С ОСТРЫМ КРАЕМ СТАЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ

© 2025 г. М. М. Рычков^{а,*}, В. В. Каплин^а, В. А. Смолянский^{а,**}

^аНациональный исследовательский Томский политехнический университет,
Томск, 634050 Россия

*e-mail: rychkov@tpu.ru

**e-mail: vsmol@tpu.ru

Поступила в редакцию 26.11.2024 г.

После доработки 15.01.2025 г.

Принята к публикации 15.01.2025 г.

Приведены изображения распределения микрофокусного тормозного излучения нового источника на основе 18 МэВ-бетатрона, прошедшего стальную пластину толщиной 0.4 мм с острым краем шириной 1.2 мм. Фотографии демонстрируют аномалию взаимодействия микрофокусного тормозного излучения с острием пластины в виде узкой темной полосы вдоль изображения острия, которая свидетельствует об усилении интенсивности излучения в этой области. Темная полоса обеспечивает контраст изображения острия, который вместе с высокой резкостью изображения благодаря микрофокусу источника позволяет визуализировать положение острия с высокой точностью. Темная полоса на снимках не наблюдалась при использовании излучения с энергией 450 и 45 кэВ от рентгеновских трубок с фокусами 400 и 100 мкм. Поглощение излучения обеспечивает на изображении плавное изменение почернения острого края и размытие острия из-за размера источника излучения. Наблюдаемый эффект при микрофокусном излучении нового источника определяется рассеянием излучения острием с возможным участием волновых эффектов, что необходимо дополнительно исследовать.

Ключевые слова: микрофокусное тормозное излучение, краевые абсорбционный и фазовый контрасты, рефракция излучения.

DOI: 10.31857/S1028096025030043, **EDN:** EKVDJR

ВВЕДЕНИЕ

На экспериментальной установке, созданной на базе бетатрона Б-18 с энергией электронов 18 МэВ, было показано, что при тонкой мишени, установленной в камере бетатрона вдоль пучка ускоренных электронов под скользким углом, узкий фокус генерируемого тормозного излучения вдоль поверхности мишени может иметь ширину менее 100 мкм [1, 2]. Использование мишеней размером гораздо меньше диаметра пучка электронов в циклических ускорителях для уменьшения фокуса излучения было рассмотрено ранее в [3–6].

В [7] были представлены результаты исследования генерации микрофокусного жесткого тормозного излучения при скользком взаимодействии электронов пучка бетатрона с энергией 18 МэВ с танталовой мишенью толщиной 13 мкм и длиной 2.5 мм вдоль пучка электронов и данные исследования скользкого взаимодействия этого излучения с краевыми поверхностями пластиковых пластин толщиной 10 и 4 мм, стальных пластин толщиной 10, 5 и 0.9 мм и свинцовых фольг толщиной 25 мкм. Представленные результаты показали отсутствие двухполосного краевого рефракционного контраста из-за рефракции

жесткого тормозного излучения на краевой грани пластин. Однако наблюдалась высокая резкость краевых изображений из-за малого размера фокуса генерированного излучения. Результаты были сравнены с данными, полученными при использовании микрофокусного тормозного излучения, генерированного в узкой (8 мкм) Si-мишени. Излучение мягкой части спектра не поглощалось столь существенно в более легком материале мишени и формировало рефракционный контраст изображения края пластикового корпуса стандарта качества радиографических изображений Duplex IQI [8].

Фазовый контраст на изображениях был впервые показан в [9, 10] и позднее для излучения рентгеновских трубок [11], фемтосекундной лазерной плазмы [12, 13], а также переходного [14] и тормозного [15–17] излучений, генерированных во внутренних мишенях синхротронов.

В [18] также были представлены экспериментальные результаты исследования скользящего взаимодействия микрофокусного тормозного излучения с краевой поверхностью пластикового корпуса эталона Duplex IQI. Внутренний пучок электронов бетатрона Б-18 с энергией 18 МэВ генерировал микрофокусное излучение при скользящем падении на поверхности Si-мишени толщиной 50 или 8 мкм и длиной 4 мм вдоль пучка электронов. Результаты показывают, что краевой контраст зависит от ориентации краевой поверхности и может быть более сложным, чем две узкие полосы повышенного и пониженного почернения на рентгенограмме, которые определяются рефракцией излучения. Проведено сравнение результатов с результатами по краевому контрасту, полученными при использовании микрофокусного тормозного излучения рентгеновской трубки с фокусом 400 мкм. Зависимость краевого

контраста от ориентации краевой поверхности была также показана в [19].

В настоящей работе представлены радиографические снимки острого края стальной пластины толщиной 0.4 мм, демонстрирующие аномалию взаимодействия микрофокусного тормозного излучения нового источника на основе бетатрона с острием пластины в виде узкой темной полосы на снимке вдоль изображения острого края. Результат получен при использовании микрофокусного тормозного излучения, сгенерированного при скользящем падении внутреннего пучка электронов с энергией 18 МэВ бетатрона Б-18 на поверхность танталовой мишени толщиной 13 мкм и длиной 2.5 мм вдоль пучка электронов. Приведены для сравнения снимки острого края, полученные при использовании излучения с энергией 450 и 45 кэВ, генерируемого рентгеновскими трубками с фокусами 400 и 100 мм, где эффект темной полосы не наблюдается.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Результаты были получены на экспериментальной установке, которая была использована ранее [1, 2, 7, 18]. Схема эксперимента с микрофокусным излучением 18 МэВ-бетатрона приведена на рис. 1а. Под действием специальной обмотки радиус пучка ускоренных электронов бетатрона Б-18 уменьшался, и электроны падали на установленную перпендикулярно плоскости орбиты электронов во внутреннем гониометре танталовую мишень толщиной $t = 13$ мкм, с вертикальным размером $H = 10$ мм и шириной $T = 2.5$ мм вдоль касательной к орбите пучка электронов. Сгенерированное излучение со спектром до 18 МэВ выходило через окно экспериментальной камеры, закрытое лавсановой пленкой

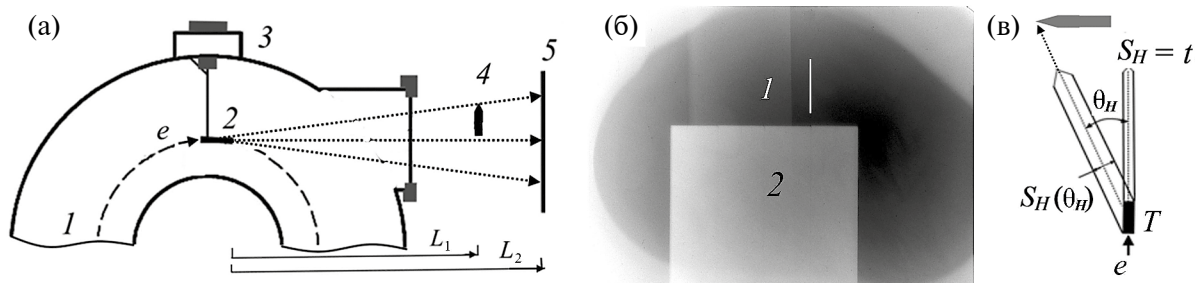


Рис. 1. Схема эксперимента (а): 1 — камера бетатрона (вид сверху); 2 — мишень, ориентированная вдоль пучка электронов; 3 — гониометр; 4 — стальная пластина с острым краем, расположенная на расстоянии L_1 от мишени; 5 — рентгеновская пленка, расположенная на расстоянии L_2 от мишени. Фотография (б) (увеличение $M = 1.1$), показывающая положение пластины (1) с левым острым краем на пучке излучения и толстую стальную пластину, служившую держателем (2). Светлая линия показывает направление плоскости мишени. Схема зависимости эффективного горизонтального размера S_H источника от горизонтального угла θ_H испускания излучения из мишени толщиной t и шириной T , ориентированной вдоль пучка электронов e (в).

толщиной 50 мкм и попадало на стальную пластину толщиной $t_p = 0.4$ мм с одним острым краем шириной $l_p = 1.2$ мм. Эта пластина шириной 18 мм была расположена на другой толстой стальной пластине перпендикулярно пучку излучения (рис. 1б) на расстоянии $L_1 = 47$ см от мишени. Для протяженной вдоль пучка электронов мишени эффективный горизонтальный фокус излучения $S_H = t + T\theta_H$ зависит от горизонтального угла θ_H испускания излучения относительно плоскости мишени (рис. 1в). Вертикальный размер линейного фокуса равен диаметру пучка электронов ($D_e \approx 1.4$ мм). Для регистрации распределения излучения, прошедшего пластину, использована рентгеновская пленка AGFA NDT D4, установленная на расстоянии $L_2 = 114$ или 52 см от мишени. Полученные фотографии пучков прошедшего пластину излучения оцифровывали при помощи сканера для последующего анализа и построения денситограмм снимков.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Нарис. 2а представлен фрагмент распределения тормозного излучения, сгенерированного в узкой (13 мкм) Та мишени, после его взаимодействия со стальной пластиной толщиной 0.4 мм с левым

острым краем. Снимок, полученный с увеличением около $M = L_2/L_1 = 2.43$, демонстрирует хороший контраст и высокую резкость изображения правого края пластины из-за достаточного поглощения излучения и микрофокуса источника излучения. Контраст изображения острого края сформирован за счет темной узкой полосы вдоль острия края, которая означает увеличение количества излучения, пришедшего на эту область. Это видно на дополнительно увеличенном фрагменте изображении острия (рис. 2а, внизу). Темную полосу нельзя объяснить формированием контраста из-за поглощения излучения, так как изменение поглощения излучения в этой области может дать только постепенное изменение почернения на снимке, т.е. отсутствие краевого контраста из-за постепенного уменьшения толщины t_w клиновидного края до $t_w = 0$. Денситограмма острого края (рис. 2б), показывающая горизонтальное распределение яркости изображения на рентгеновской пленке, демонстрирует узкий минимум около острия, который соответствует узкой темной полосе на снимке, обеспечивающей контраст изображения острия края. Ниже представлена схема сечения части пластины с острым краем, которая показывает соответствие участков

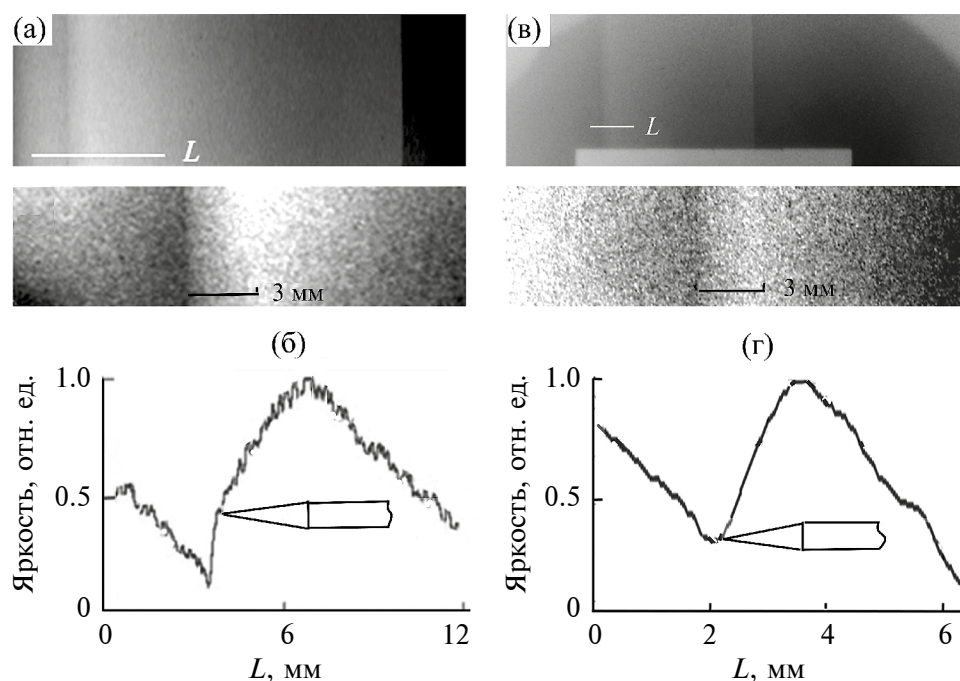


Рис. 2. Фрагмент полученного с увеличением $M = 2.43$ распределения тормозного излучения, сгенерированного в узкой ($t = 13$ мкм) Та мишени 18 МэВ-бетатрона, после его взаимодействия со стальной пластиной толщиной 0.4 мм с левым острым краем шириной 1.2 мм (а), внизу — дополнительно увеличенная часть изображения острия пластины. Денситограмма острого края, измеренная по линии L (б). Фрагмент распределения тормозного излучения с увеличением $M = 1.1$ (в), внизу — дополнительно увеличенная часть изображения острия пластины. Денситограмма острого края (г).

денситограммы участкам пластины. Яркость изображения на снимке увеличивается на участке L от 12 до 6.8 мм и при $L < 3$ мм из-за расположения пластины на склоне углового распределения излучения, где его интенсивность уменьшается по мере увеличения угла его испускания из мишени (рис. 1а).

Резкость изображения острия высокая из-за микрофокуса источника и определяется только геометрической нерезкостью $a_1 = S_H(M - 1)$, где S_H — эффективный горизонтальный размер S_H фокуса части излучения, падающего на левый острый край, и собственной нерезкостью a_2 рентгеновской пленки. Изображение острия пластины было сформировано излучением, которое было испущено под углом $\theta_H = 2.62^\circ$ к поверхности Та мишени, ориентированной вдоль пучка электронов. Поэтому эффективный горизонтальный размер S_H фокуса части излучения, падающего на левый острый край, составляет $S_H = 127$ мкм, и, следовательно, $a_1 = 183$ мкм. Собственная нерезкость a_2 рентгеновской пленки может составлять несколько десятков микрометров. Наличие контраста и высокая резкость изображения острого края пластины определяют довольно точно положение его острия.

На рис. 2в представлен фрагмент распределения тормозного излучения, фотография которого была получена с увеличением около $M = 1.1$, т.е. практически без увеличения. Этот снимок демонстрирует меньший контраст и не такое резкое изображение острого края пластины, как в случае

$M = 2.43$. Резкая темная узкая полоса вдоль острия края здесь не наблюдается. Это видно на дополнительно увеличенном фрагменте изображения острия (рис. 2в, внизу). Дополнительное увеличение участка изображения было примерно в 2.2 раза больше, чем на рис. 2а, так что масштаб этих изображений примерно одинаковый. Видно, что контраст изображения края гораздо ниже, чем на рис. 2а. Кроме того, резкость изображения острия также ниже, несмотря на то, что геометрическая нерезкость $a_1 = S_H(M - 1)$ здесь составляет около 3 мкм, а собственная нерезкость пленки по-прежнему составляет несколько десятков микрометров. Денситограмма острого края (рис. 2г), показывающая горизонтальное распределение яркости изображения (рис. 2в), на участке около $L = 2$ мм не демонстрирует узкий минимум яркости около острия в отличие от увеличенного контраста изображения на рис. 2а. Без достаточной контрастности высокая резкость изображения из-за малой геометрической нерезкости не обеспечивает хорошей визуализации острия при постепенном уменьшении толщины t_w клиновидного края до нуля.

Постепенное уменьшение яркости изображения острого края пластины наблюдалось на снимке, полученном с использованием рентгеновской трубки с энергией излучения до 450 кэВ и фокусом 0.4 мм. На рис. 3а представлен фрагмент полученного с увеличением $M = 2.3$ распределения рентгеновского тормозного излучения с энергией 450 кэВ, прошедшего стальную пластину

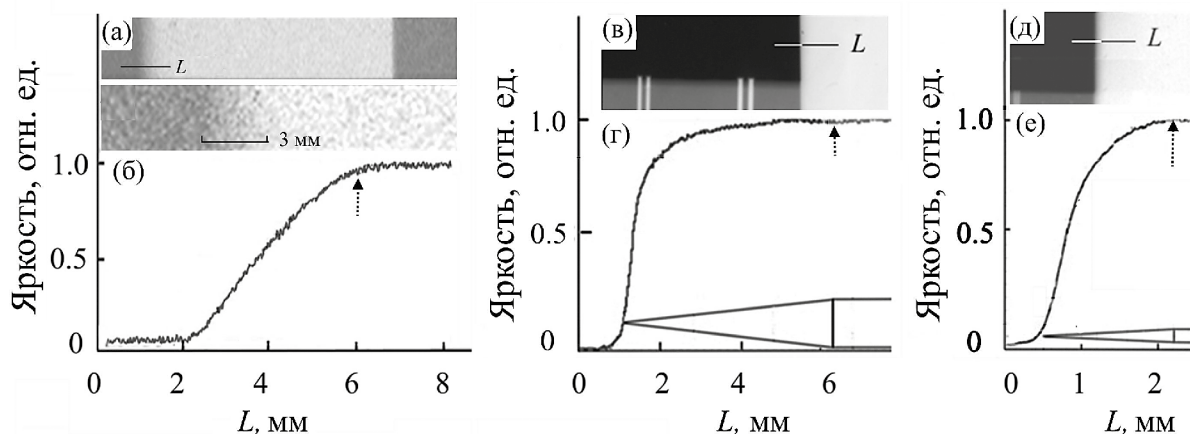


Рис. 3. Фрагмент полученного с увеличением $M = 2.3$ распределения рентгеновского тормозного излучения с энергией 450 кэВ, прошедшего стальную пластину толщиной 0.4 мм с левым острым краем (а), внизу — дополнительно увеличенная часть изображения острия пластины. Денситограмма острого края, измеренная по линии L (б). Фрагмент увеличенного ($M = 4.3$) изображения пластины толщиной 0.4 мм с левым острым краем, полученного с помощью рентгеновского излучения с энергией 45 кэВ (в). Денситограмма изображения острого края, измеренная по линии L (г). Фрагмент увеличенного ($M = 4.3$) изображения пластины толщиной 0.1 мм с левым острым краем шириной 0.4 мм, полученного с использованием рентгеновского излучения с энергией 45 кэВ (д). Денситограмма острого края, измеренная по линии L (е).

толщиной 0.4 мм с левым острым краем. Видно, что снимок демонстрирует уменьшение яркости изображения по мере уменьшения толщины клиновидного края и размытое изображение острия пластины из-за достаточно большого фокуса этого источника. Темная полоса вблизи острия пластины здесь отсутствует, что видно на дополнительно увеличенной части снимка острия пластины (рис. 3а, внизу). Отметим, что денситограмма (рис. 3б), измеренная по линии L на рис. 3а, показывает линейное изменение почернения на склоне, что правильно передает линейное изменение толщины клиновидного края пластины. Стрелка указывает на участок денситограммы, соответствующий началу клиновидного края пластины. Яркость изображения на снимке не изменяется при $L < 2$ мм и $L > 6.2$ мм, т.е. вне изображения клиновидного края, так как угловое распределение излучения рентгеновской трубки изотропное в широкой области углов.

Были также проведены эксперименты с использованием излучения с энергией до 45 кэВ рентгеновской трубки с фокусом около 100 мкм. На рис. 3в приведен фрагмент увеличенного ($M=4.3$) изображения острого края пластины толщиной 0.4 мм и пар проволок стандарта Duplex IQI диаметрами 0.16 и 0.2 мм. Из денситограммы (рис. 3г) следует, что изображение острия края размыто, а изменение яркости на участке L изображения острого края пластины от 1 до 6.2 мм сильно отличается от линейной зависимости яркости изображения от изменения толщины клиновидной части пластины.

С использованием рентгеновской трубки с энергией излучения до 45 кэВ был также прове-

ден эксперимент с другой пластиной толщиной $t_p = 0.1$ мм и шириной острого края $l_p = 0.4$ мм. На рис. 3д представлен фрагмент увеличенного ($M=4.3$) изображения острия этой пластины. Изображение и денситограмма (рис. 3е) показывают, что нет особенностей изображения острия, а изменение почернения на участке $L = 0.5-2.2$ мм отличается от линейной зависимости, но меньше, чем в случае пластины толщиной $t_p = 0.4$ мм (рис. 3г).

На рис. 4 приведены рассчитанные нормированные распределения яркости $B(L_p)$ изображений острых краев пластин толщиной 0.4 и 0.1 мм и излучения рентгеновских трубок по приближенной формуле $B(L) = N(1 - \exp(-\mu k L p))$, где N — нормировочный коэффициент, μ — коэффициент ослабления излучения, и $k = t_p / M l_p$, которая применима для $0 < L_p < M l_p$, а при $L_p > M l_p$ значение $B(L_p) = 1$.

На рис. 4а представлены рассчитанные нормированные распределения $B(L_p)$ яркости изображений острия пластины толщиной 0.4 мм для энергии фотонов излучения 400, 200 и 100 кэВ. Профили распределений для энергии 400 и 200 кэВ совпадают, а зависимость для 100 кэВ слегка отличается от них. В этом случае энергия излучения источника достаточна для получения распределения яркости изображения на пленке, отражающей линейное изменение толщины острой части этой пластины.

На рис. 4б представлены рассчитанные нормированные распределения $B(L_p)$ яркости изображений острого края пластины толщиной 0.4 мм для энергии фотонов излучения 40, 30 и 20 кэВ. Результаты расчета по формуле, качественно опи-

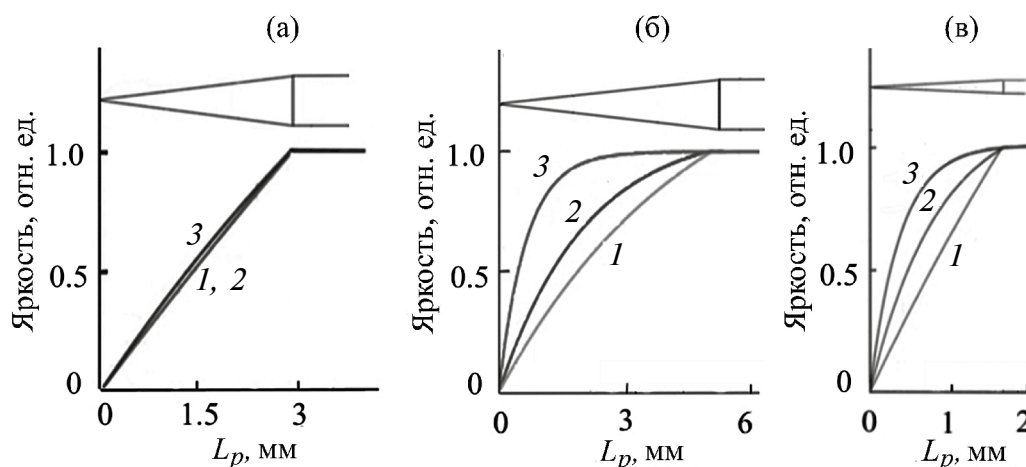


Рис. 4. Рассчитанные нормированные распределения яркости изображения острия пластины толщиной: а — 0.4 мм для энергии фотонов излучения 400 (1), 200 (2) и 100 кэВ (3); б — 0.4 мм для энергии фотонов излучения 40 (1), 30 (2) и 20 кэВ (3); в — 0.1 мм для энергии фотонов излучения 40 (1), 20 (2) и 15 кэВ (3).

сывающей изменение профиля распределения яркости изображения, показывают, что профиль определяется излучением средней части спектра. Для почернения пленки, отражающей линейное изменение толщины острой части этой пластины, необходимо использовать источник излучения с гораздо большей энергией.

На рис. 4в представлены рассчитанные нормированные распределения $B(L_p)$ яркости изображения острой пластины толщиной 0.1 мм для энергии фотонов излучения 40, 20 и 15 кэВ. Результаты расчета также показывают, что профиль яркости изображения определяется излучением средней части спектра. Для линейного почернения пленки необходимо использовать источник излучения с большей энергией.

Представленные расчеты дают только качественное представление о необходимой энергии излучения источника и максимальной толщине пластины для отображения на радиографическом снимке изменения ее радиационной толщины на разных участках. Для корректного расчета распределения яркости на снимке такого объекта необходимо учитывать форму спектра излучения источника и чувствительность рентгеновской пленки к фотонам различных участков спектра излучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате эксперимента с микрофокусным излучением нового источника на основе 18 МэВ-бетатрона установлено, что аномальный контраст из-за узкой темной полосы вдоль увеличенного изображения ($M=2.43$) острой края пластины вследствие увеличения интенсивности рассеянного излучения в этом направлении и высокой резкости изображения из-за малого размера источника делает возможным четкую визуализацию острого, которое практически прозрачно для жесткого излучения. Эксперимент, проведенный с увеличением $M=1.1$, показал, что резкость изображения без достаточного контраста не обеспечивает четкой визуализации острого.

Наблюдаемый эффект противоречит представлениям о формировании изображения в результате абсорбции излучения. Его также затруднительно объяснить и рефракцией излучения, как это было ранее при изучении краевого контраста с использованием пластин с боковой поверхностью, так как в данном случае нет боковой поверхности. Эффект отклонения излучения за счет рефракции на поверхностях острого края здесь весьма мал, так как угол между этими плоскостями составляет около 18° . Поэтому необхо-

димы дальнейшие исследования этого эффекта с помощью увеличенных изображений с учетом, например, комптоновского рассеяния острым краем пластины и возможным вкладом рефракции излучения в мягкой части спектра излучения, если размер источника достаточно мал, чтобы обеспечить высокую пространственную когерентность полихроматического излучения [20].

Отмеченную в экспериментах возможную прямо пропорциональную зависимость яркости изображения от радиационной толщины различных участков объекта также следует дополнительно исследовать, чтобы определить соотношение между максимальной радиационной толщиной объекта и необходимой энергией излучения источника для обеспечения такой зависимости, которая даст дополнительную практически значимую информацию о форме различных деталей или дефектов составного объекта. Интересны также будут эксперименты по пропорциональному отображению на радиографическом снимке формы одной профилированной поверхности пластины.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках программы развития Национального исследовательского Томского политехнического университета.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рычков М.М., Каплин В.В., Сухарников К.В., Васильковский И.К. // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 103. Вып. 11. С. 816.
http://jetpletters.ru/ps/2128/article_31935.shtml
2. Rychkov M.M., Kaplin V.V., Malikov E.L., Smolyanskii V.A., Gentsel'man V., Vaskovskii I.K. // J. Nondestructive Evaluation. 2018. V. 37. № 1. P. 13.
<https://doi.org/10.1007/s10921-018-0464-6>
3. Патент 2072643 (РФ). Способ получения фокусного пятна тормозного излучения малых размеров в циклическом ускорителе заряженных частиц. / Пушин В.С., Чахлов В.Л. // 1997. <http://www.findpatent.ru/patent/207/2072643.html>
4. Yamada H. // Jpn. J. Appl. Phys. 1996. V. 35. № 2A. P. L182.
<http://doi.org/10.1143/JJAP.35.L182>
5. Gambaccini M., Marziani M., Taibi A., Cardarelli P., Di Domenico G., Mastella E. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2012. V. 664. P. 78.
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2011.10.028>

6. Yamada H. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 2003. V. 199. Iss. 6. P. 509.
[http://doi.org/10.1016/S0168-583X\(02\)01593-8](http://doi.org/10.1016/S0168-583X(02)01593-8)
7. Рычков М.М., Каплин В.В., Смолянский В.И. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2021. № 3. С. 14. <https://sciencejournals.ru/view-article/?j=poverh&y=2021&v=0&n=3&a=Poverh2103012Rychkov>
8. Website of the IE-NTD Ltd: <http://ie-ndt.co.uk/en4625astme2002duplexiqi.html>
9. Wilkins S.V., Gureyev T.E., Gao D., Pogany A., Stevenson A.W. // Nature. 1996. V. 384. P. 335.
<https://doi.org/10.1038/384335a0>
10. Snigirev A., Snigireva I., Kohn V., Kuznetsov S., Schelokov I. // Rev. Sci. Instrum. 1995. V. 66. P. 5486.
<https://doi.org/10.1063/1.1146073>
11. Gureyev T.F., Paganin D.M., Mayers G.R., Nesterets Y.I., Wilkins S.W. // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89. № 3. P. 034102.
<https://doi.org/10.1063/1.2226794>
12. Laperle C.M., Wintermeyer Ph., Wands J.R., Shi D., Anastasio M. A., Li X., Arh B., Diebold G.J., Rose-Petruck C. // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 91. P. 173901.
<https://doi.org/10.1063/1.2802728>
13. Gasilov S.V., Fayenov A.Ya., Pikuz T.A., Skobelev I.Yu., Caleyary F., Vozzy C., Nisoli M., Sansone G., Valentiny G., De Silvestry S., Stagira S. // JETP Lett. 2008. V. 87. № 5. P. 238.
<https://doi.org/10.1134/S0021364008050032>
14. El-Ghazaly M., Backe H., Lauth W., Kube G., Kunz P., Sharafutdinov A., Weber T. // Eur. Phys. J. A. 2006. V. 28. P. 197.
<http://doi.org/10.1140/epja/i2006-09-021-6>
15. Hirai T., Yamada H., Sasaki M., Hasegawa D., Morita M., Oda Y., Takaku J., Hanashima T., Nitta N., Takahashi M., Murata K. // J. Synchrotron Rad. 2006. V. 13. P. 397.
<https://doi.org/10.1107/S0909049506027026>
16. Yamada H., Hasegawa D., Yamada T., Kleev A.I., Minkov D., Miura N., Moon A., Hirai T. Haque M. // Comprehensive Biomed. Phys. 2014. V. 8. P. 43.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780444536327006043?via%3Dihub>
17. Yamada H., Hiraia T., Morita M., Hasegawa D., Hanashima M. // Proc. SPIE. 2008. V. 7078.
<http://doi.org/10.1117/12.796333>
18. Рычков М.М., Каплин В.В., Смолянский В.А. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2022. № 9. С. 93. <https://sciencejournals.ru/view-article/?j=poverh&y=2022&v=0&n=9&a=Poverh2209017Rychkov>
19. Van Heekeren J., Kostenko A., Hanashima T., Yamada H., Stallinga S., Offerman E., Vliet L. // Med. Phys. 2011. V. 38. № 9. P. 5136.
<http://doi.org/10.1118/1.3622606>
20. Hwu Y., Tsai Wen-Li, Groso A., Margaritondo G., Ho Je J. // J. Phys. D. 2002. V. 35. № 13. P. R105.
<http://doi.org/10.1088/0022-3727/35/13/201>

Anomaly in the Interaction between Microfocus Bremsstrahlung from a New 18 MeV Betatron-Based Source and a Sharp Edge of a Steel Plate

M. M. Rychkov^{1,*}, V. V. Kaplin¹, V. A. Smolyanskii^{1,**}

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050 Russia

*e-mail: rychkov@tpu.ru

**e-mail: vsmol@tpu.ru

Images of the distribution of microfocus bremsstrahlung from a new source based on an 18 MeV betatron, which has passed a 0.4 mm thick steel plate with a 1.2 mm wide sharp edge, are presented. The photographs demonstrate an anomaly in the interaction between the microfocus bremsstrahlung and the plate tip in the form of a narrow dark stripe along the tip image, which indicates an increase in the radiation intensity in this area. The dark stripe provides a contrast in the tip image, which, together with the high sharpness due to the microfocus of the source, allows the tip position to be visualized with high precision. The dark stripe in the images was not observed when using radiation from 450 and 45 keV X-ray tubes with foci of 400 and 100 μm . The absorption of radiation ensures a smooth change in the blackening of the sharp edge and blurring of the tip in the image due to the size of the radiation source. The observed effect with microfocus radiation of the new source is determined by the scattering of radiation by the tip with the possible participation of wave effects, which needs to be further investigated.

Keywords: microfocus bremsstrahlung, edge absorption and phase contrasts, radiation refraction.