

УДК 621.384.6

## ОСОБЕННОСТИ СКОЛЬЗЯЩЕГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МИКРОФОКУСНОГО ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С КРАЕВОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

© 2022 г. М. М. Рычков<sup>а</sup>, \*, В. В. Каплин<sup>а</sup>, В. А. Смолянский<sup>а</sup>, \*\*

<sup>а</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Томск, 634050 Россия

\*e-mail: rychkov@tpu.ru

\*\*e-mail: vsmol@tpu.ru

Поступила в редакцию 25.12.2021 г.

После доработки 30.01.2022 г.

Принята к публикации 30.01.2022 г.

Представлены экспериментальные результаты исследования скользящего взаимодействия микрофокусного тормозного излучения с боковой поверхностью пластикового корпуса стандарта качества радиографических изображений Duplex IQI. Показано, что “краевой” контраст зависит от ориентации боковой поверхности и может быть более сложным, чем две узкие полосы повышенного и пониженного почернения на рентгенограмме, которые определяются рефракцией излучения. Результаты получены при использовании микрофокусного тормозного излучения, сгенерированного при скользящем падении пучка электронов энергией 18 МэВ бетатрона “Б-18” на поверхность кремниевой мишени толщиной 50 или 8 мкм и длинной стороной размером 4 мм, расположенной вдоль пучка электронов. Проведено сравнение результатов с информацией, полученной при использовании микрофокусного тормозного излучения рентгеновской трубки с размером фокуса 400 мкм.

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

**DOI:** 10.31857/S1028096022090175

### ВВЕДЕНИЕ

С помощью экспериментальной установки 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 скользящим углом, генерируемое тормозное излучение, испущенное вдоль поверхности мишени, имеет узкий фокус шириной равной толщине мишени [1–5]. Использование мишеней размером гораздо меньшим диаметра пучка электронов в циклических ускорителях для уменьшения фокуса излучения было рассмотрено ранее в [6, 7].

При использовании кремниевых мишеней толщиной 50 и 8 мкм и длинной стороной размером 4 мм, расположенной вдоль пучка электронов, было исследовано формирование увеличенных изображений проволочных элементов эталона Duplex IQI [8]. Эталон выполнен в виде пластиковой пластины, внутри которой расположен ряд пар тонких вольфрамовых и платиновых проволок, и предназначен для определения качества рентгенографических снимков при неразрушаю-

щем контроле, относительной чувствительности радиографического метода в различных условиях и измерения размеров фокуса источника рентгеновского излучения. Показано, что микрофокусный источник тормозного излучения на основе бетатрона обеспечивает высококонтрастные радиографические изображения пары проволок эталона наименьшего диаметра (50 мкм).

В работе [5] также было показано, что для микрофокусного тормозного излучения бетатрона, сгенерированного в тонкой кремниевой мишени, ориентированной вдоль пучка электронов, реализуется фазовый контраст изображения края образца, который в случае полихроматического тормозного излучения определяется эффектом преломления излучения на боковой поверхности пластины, как было показано в [9]. Радиографический снимок эталона Duplex IQI при толщине кремниевой мишени 8 мкм показал две узкие полосы пониженного и повышенного почернения вдоль изображения края корпуса объекта, которые увеличивают контраст краевого изображения. В случае кремниевой мишени толщиной

50 мкм эти полосы размыты из-за более широкого фокуса сгенерированного излучения.

В [10] рефракционный контраст был исследован с использованием тормозного излучения, сгенерированного в микромишенях, установленных в синхротроне MIRRORCLE-6X с энергией электронов 6 МэВ. Было показано, что эффект рефракции тормозного излучения на боковых поверхностях пластиковых пластин и стержней, проявляющийся также в виде двух полос на снимках, определяет картину взаимодействия излучения с боковыми поверхностями образцов наряду с эффектом абсорбции излучения.

В первых работах по фазовому контрасту с использованием различных источников излучения было показано, что для получения увеличенных изображений малых объектов с усиленным контрастом за счет фазовых эффектов может также быть использовано синхротронное излучение [11], излучение рентгеновских трубок [12], излучение фемтосекундной лазерной плазмы [13, 14] и переходное излучение [15].

В работе [16] были представлены результаты исследования генерации микрофокусного жесткого тормозного излучения при взаимодействии скользящего пучка электронов бетатрона с энергией 18 МэВ с танталовой мишенью толщиной 13 мкм и длиной 2.5 мм вдоль пучка электронов. В [17] описаны результаты взаимодействия такого излучения с боковыми поверхностями пластиковых пластин толщиной 10 и 4 мм, стальных пластин толщиной 10, 5 и 0.9 мм и свинцовых фольг толщиной 25 мкм. Представленная информация (когда “мягкая” часть спектра тормозного излучения подавлена поглощением в материале мишени из Ta) говорит об отсутствии явного проявления двухполосного рефракционного контраста из-за малости угла рефракции жесткого тормозного излучения на боковой грани пластины. Однако в описанных выше случаях наблюдали высокую резкость изображений краев образца из-за малого размера фокуса сгенерированного излучения. При использовании микрофокусного тормозного излучения, сгенерированного в узкой (8 мкм) кремниевой мишени, излучение “мягкой” части спектра не поглощалось столь существенно в более легком материале мишени и (в основном) формировало изображение края пластикового корпуса эталона Duplex IQI из-за гораздо более высокой эффективности регистрации рентгеновской пленкой “мягкого” излучения, чем фотонов с энергией, сравнимой с энергией электронов, вплоть до 18 МэВ.

В настоящей статье представлены экспериментальные результаты исследования взаимодействия скользящего микрофокусного тормозного излучения с краем поверхности пластикового корпуса эталона Duplex IQI, которые были полу-

чены при проведении исследований [5]. Целью работы было показать, что тормозное излучение нового микрофокусного источника на основе бетатрона способно образовывать высококонтрастные увеличенные изображения микрообъектов и краев образцов с участием абсорбционных и фазовых эффектов. Ранее в литературе были показаны только двухполосные “краевые” изображения, типичные для рефракционного механизма образования изображения полихроматическим излучением. Результаты, представленные в настоящей статье, демонстрируют различные картины “краевого” контраста при различных углах наклона поверхности относительно направления излучения. Результаты получены при использовании тормозного излучения, сгенерированного при скользящем падении пучка электронов с энергией 18 МэВ в бетатроне “Б-18” на поверхность кремниевых мишеней толщиной  $t = 50$  и 8 мкм и длиной стороны размером  $T = 4$  мм, расположенной вдоль пучка электронов. Показано, что рефракционный контраст зависит от ориентации боковой поверхности образца относительно направления излучения и может иметь более сложную форму, чем две узкие полосы повышенного и пониженного почернения на изображении.

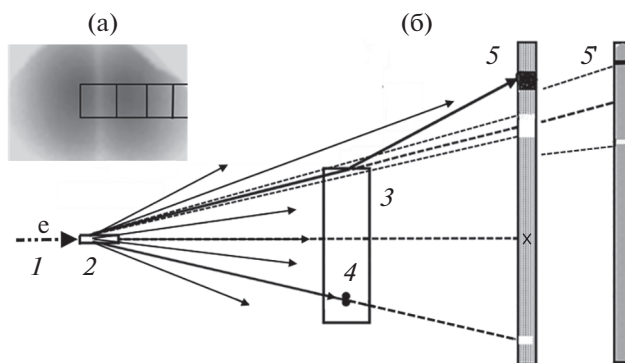
## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Экспериментальные результаты были получены на установке, которая была использована для исследований [1–5]. Ускоренный пучок электронов бетатрона диаметром  $D_e \approx 1.4$  мм смещался под действием обмотки сброса на установленную во внутреннем гониометре кремниевую мишень толщиной  $t = 50$  или 8 мкм, высотой  $H = 10$  мм и длиной стороны размером  $T = 4$  мм, размещенной вдоль пучка электронов. Сгенерированное излучение выходило через окно экспериментальной камеры, закрытое лавсановой пленкой толщиной 50 мкм и попадало на объект исследования. Объектом исследования являлся край пластиковой пластины корпуса стандарта качества радиографических изображений Duplex IQI. Образец был расположен на расстоянии  $L_1 = 38$  см от мишени. Для регистрации распределения излучения, рассеянного краем, использована рентгеновская пленка AGFA NDT D4, установленная на расстоянии  $L_2 = 114$  или 152 см от мишени. Полученные фотографии пучков рассеянного излучения оцифровывали при помощи сканера для последующего анализа.

На рис. 1а показано положение эталона Duplex IQI в пучке излучения, сгенерированного электронами (1) в тонкой мишени (2) (рис. 1б), ориентированной вдоль пучка электронов. Угловое распределение тормозного излучения, сгенерированного электронами с энергией 18 МэВ при

угле наклона к плоскости кремниевой мишени  $\theta_0 = 0^\circ$  (рис. 1а), симметрично относительно плоскости мишени. Светлая полоса показывает направление плоскости мишени и определяется частичным поглощением “мягкой” части сгенерированного излучения в самой мишени. В случае кремниевой мишени толщиной  $t = 8$  мкм край эталона Duplex IQI располагали на расстоянии 2.25 мм от оси конуса излучения, что соответствует фокусу излучения с горизонтальным размером  $S_H = t + T|\theta_H| = 30$  мкм, где  $\theta_H = 0.34^\circ$  – угол эмиссии излучения в направлении края пластины. Если пластина 3 ориентирована передней гранью перпендикулярно плоскости мишени (рис. 1б), то угол наклона ее боковой поверхности относительно падающего излучения составляет  $\theta = \theta_H = 0.34^\circ$ . В экспериментах с излучением, сгенерированным в кремниевой мишени толщиной 50 мкм, край стандарта Duplex IQI был расположен на расстоянии 8 мм от оси конуса излучения, что соответствует фокусу излучения с горизонтальным размером 134 мкм. С помощью гониометра можно было дополнительно ориентировать боковую поверхность пластины относительно направления излучения с шагом около  $0.02^\circ$ , так что излучение могло преломляться под различными углами. К сожалению, одновременно с этим невозможно было точно знать, под каким именно углом ориентирована боковая поверхность относительно пучка излучения. Пластины ориентировали до получения двухполосной картины, типичной для рефракционного контраста.

В случае если угол наклона боковой поверхности относительно падающего излучения  $\theta_{p1}$  гораздо меньше некоторого критического угла  $\theta_{cr} = E_{pl}/E_\gamma$ , где  $E_{pl}$  – энергия плазмона материала пластины,  $E_\gamma$  – энергия фотонов излучения, то на рентгеновской пленке 5 (рис. 1б) формируются области повышенного и пониженного почернения за счет рефракции излучения. Угловое расстояние  $\Delta\theta_1$  между этими областями близко к величине угла  $\theta_{cr}$ , так как  $\Delta\theta_1 \approx \sqrt{\theta_{p1}^2 + \theta_{cr}^2} - \theta_{p1}$ . А угловая ширина каждой из этих областей меньше  $\Delta\theta_1$  и близка к величине  $\Delta\theta_2 = t_p\theta_{p1}/L_1$ , где  $t_p = 4$  мм – толщина пластины. На рис. 1б показаны компоненты почернения на пленке 5' при угле наклона  $\theta_{p2}$ , значительно большем  $\theta_{cr}$ . Часть пучка излучения, шириной  $\Delta\theta_2$ , преломляется на угол  $\Delta\theta_1 \ll \Delta\theta_2$ . Поэтому, ширины темной и светлой полос, определяемые рефракцией излучения, будут равны величине  $\Delta\theta_1$ . В этом случае угловое расстояние между светлой и темной полосами интенсивности уже не определяется углом  $\theta_{cr}$ , как это было в случае положения 5 (рис. 1б), а определяется величиной  $\Delta\theta_2$ . Величина  $\Delta\theta_1$  быстро уменьшается с увеличением угла наклона краевой поверхности  $\theta_p$ .



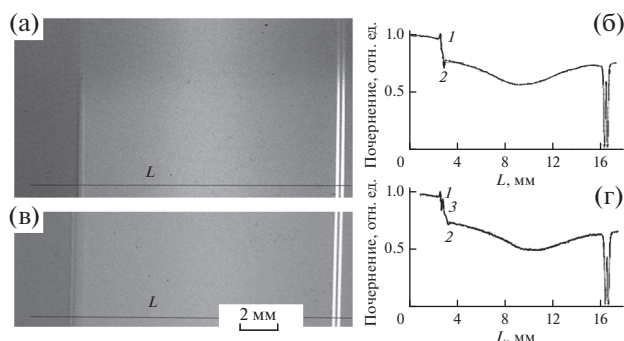
**Рис. 1.** Изображение интенсивности первичного пучка излучения и положение эталона Duplex IQI в пучке (а). Схема (вид сверху) взаимодействия излучения, сгенерированного электронным пучком (1) бетатрона в узкой кремниевой мишени (2), с боковой поверхностью корпуса (3) и с 13-й парой проволок (4) эталона Duplex IQI; (5) и (5') – примерное распределение полос на рентгеновских пленках при различных углах наклона боковой поверхности образца относительно падающего излучения (б).

Расстояние между полосами интенсивности на снимке и их размытие зависит от энергии фотонов излучения, толщины и материала образца, его ориентации относительно направления излучения и коэффициента увеличения изображения. Ширина полос и их интенсивность будет зависеть от размера пучка излучения и характеристик рентгеновской пленки. В случае полихроматического излучения на параметры двухполосной картины будут дополнительно влиять спектр фотонов излучения и зависимость чувствительности рентгеновской пленки от энергии фотонов.

В [17] дана оценка, что при  $\theta_p \ll \theta_{cr}$  основной вклад в формирование двухполосной “краевой” картины дает излучение с энергией фотонов менее 56 кэВ, сгенерированное в кремниевой мишени. Эта весьма приближенная оценка показала, что в случае кремниевой мишени “краевой эффект” определяется “мягкой” частью спектра, который простирается вплоть до энергии фотонов 18 МэВ. Там же было установлено, что для мишени из тантала “краевые” изображения формируются фотонами “жесткой” части спектра излучения из-за поглощения излучения “мягкой” части спектра в мишени из тяжелого материала.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2а представлен фрагмент фотографии распределения тормозного излучения, сгенерированного в узкой (8 мкм) кремниевой мишени, после взаимодействия с краем эталона Duplex IQI. Снимок, полученный с увеличением около  $K = L_2/L_1 = 3$ , выполнен с хорошим разрешением 13-й пары платиновых проволок эталона диамет-

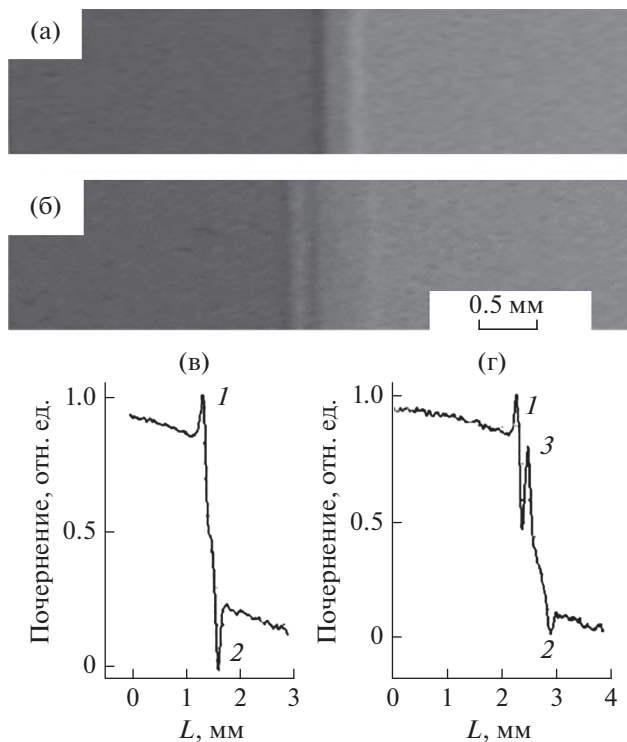


**Рис. 2.** Радиографические снимки (а, в) края пластикового корпуса эталона Duplex IQI, полученные с трехкратным увеличением при различных углах ориентации боковой поверхности относительно направления излучения, и соответствующие денситограммы (б, г).

ром 50 мкм, благодаря малому горизонтальному размеру (30 мкм) пучка источника излучения. Изображение верхнего края пластины эталона, который перпендикулярен светлой полосе на снимке углового распределения излучения, размыто из-за большого вертикального размера источника излучения, который составляет около 1.4 мм. Сложный контраст на изображении края эталона Duplex IQI в виде темной и светлой узких полос определяется, как было показано в [9], эффектом рефракции полихроматического излучения на резкой границе раздела двух сред с различной диэлектрической проницаемостью.

Наблюдаемая картина согласуется со схемой (рис. 1б) взаимодействия микрофокусного излучения с краем пластины 3 с образованием областей повышенного и пониженного почернения на радиографической пленке 5 за счет эффекта рефракции. Преломленный пучок излучения складывается с излучением, прошедшим рядом с краем пластины, что формирует узкие области повышенного и пониженного почернения по обе стороны изображения края образца на фотографии, которым соответствуют максимум 1 и минимум 2 на денситограмме (рис. 2б). Это обеспечивает повышенный контраст изображения, который определяется разностью почернений по обе стороны края.

При ориентировании образца также наблюдался “краевой” контраст другого вида. На рис. 2в представлен фрагмент фотографии распределения тормозного излучения, которая была получена также с трехкратным увеличением, но при ориентации  $\theta_2$  боковой поверхности к пучку излучения, отличной от ориентации  $\theta_1$ , использованной ранее (рис. 2а). Видно, что в этом случае изображение края образца резко отличается от предыдущего. Изображение состоит из двух узких полос повышенного почернения и слабой светлой полосы. Контраст и резкость изображения



**Рис. 3.** а, б – Дополнительно увеличенные участки снимков, представленных на рис. 2а, 2в; в, г – Части денситограмм, представленных на рис. 2б, 2г, соответственно.

края образца при такой ориентации гораздо ниже, чем в случае снимка на рис. 2а.

На рис. 2б, 2г приведены денситограммы изображений (а) и (в), измеренные вдоль линий  $L$ . Представленные графики показывают, что в случае (б) изображению края образца соответствуют узкие максимум (1) и минимум (2). В случае (г) денситограмма демонстрирует два узких максимума (1 и 3) и слабый минимум (2). Следует отметить, что высота максимумов (г) гораздо ниже, чем в случае (б).

На рис. 3а, 3б приведены для сравнения дополнительно увеличенные участки фотографий, представленных на рис. 2а, 2в, которые более ясно показывают различия изображений края пластины, полученных при двух ориентациях боковой поверхности относительно направления излучения. На рис. 3в, 3г приведены части соответствующих денситограмм.

Расстояние между максимумом и минимумом на рис. 3в составляет 305 мкм. Это соответствует угловому расстоянию между светлой и темной полосами  $\theta_r = 4.46 \times 10^{-4}$  рад. Расстояние между максимумами на рис. 3г составляет 222 мкм. Это соответствует углу  $\theta_r = 3.25 \times 10^{-4}$  рад. Расстояние между максимумом 1 и минимумом 2 (рис. 3г) со-



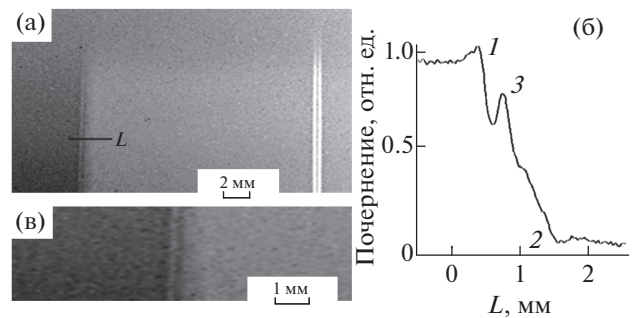
ставляет 677 мкм (или  $\theta_r = 6 \times 10^{-4}$  рад) и характеризует примерную величину  $\Delta a$  нерезкости (размытия) изображения края образца на рис. 3б, которое гораздо больше, чем на рис. 3а.

Нерезкость краевого изображения определяется так называемой геометрической нерезкостью  $\Delta a_1$ , а также и дополнительной геометрической нерезкостью  $\Delta a_2$ . Величина геометрической нерезкости краевого изображения  $\Delta a_1 = S_H(K - 1)$  определяется размером  $S_H$  фокуса источника излучения и коэффициентом  $K$  увеличения изображения. Здесь, размытие изображения определяется наложением изображений края, которые образованы различными участками протяженного источника излучения, с образованием полутени шириной  $\Delta a_1$ . Величина дополнительной геометрической нерезкости “краевого” изображения  $\Delta a_2 = Kt_p\theta_p$ . Здесь размытие изображения края образца, то есть изменение интенсивности почернения на изображениях, определяется изменением толщины материала, поглощающего излучение. Величина дополнительной геометрической нерезкости  $\Delta a_2$  равна увеличенной в  $K$  раз ширине проекции  $P = t_p\theta_p$  боковой поверхности на плоскость перпендикулярную направлению излучения.

Величина геометрического размытия  $\Delta a_1 = 60$  мкм гораздо меньше величины наблюдаемого размытия, которое можно определить приближенно по наклону денситограммы (рис. 3г) как  $\Delta a \approx 670$  мкм. Поэтому, дополнительное геометрическое размытие  $\Delta a_2$  определяет, в основном, величину наблюдаемого размытия  $\Delta a$  “краевого” изображения. Величина наблюдаемого размытия позволяет оценить угол наклона краевой поверхности как  $\theta_p = \Delta a_2 / Kt_p = 3.2^\circ$ .

Картины “краевого” контраста двух типов наблюдали и при проведении исследований [5] формирования изображений эталона Duplex IQI с использованием тормозного излучения, генерируемого в кремниевой мишени толщиной 50 мкм, ориентированной вдоль направления пучка электронов. Были получены изображения подобные представленным на рис. 2, но менее контрастные из-за большего размера источника излучения. Но в [5] было опубликовано только изображение края эталона, состоящее из двух полос повышенного и пониженного почернения, которые были менее яркими, чем в случае рис. 2а.

На рис. 4а представлен фрагмент фотографии распределения тормозного излучения, генерируемого в кремниевой мишени толщиной 50 мкм, после взаимодействия с краем эталона Duplex IQI. Фотография получена при увеличении  $K = 4$ . На рис. 4б представлена денситограмма изображения края образца, измеренная по линии  $L$ . На рис. 4в показано дополнительно увеличенное

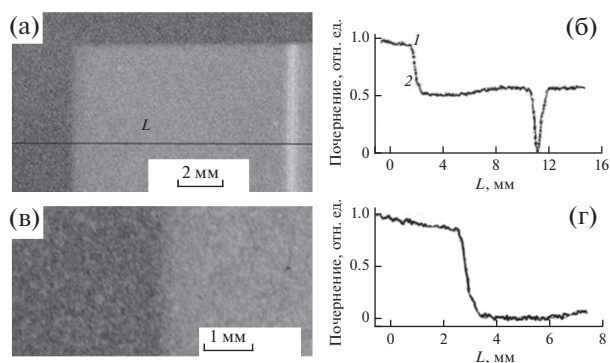


**Рис. 4.** Радиографический снимок (а) края пластикового корпуса эталона Duplex IQI, полученный с четырехкратным увеличением при использовании тормозного излучения, сгенерированного в кремниевой мишени толщиной 50 мкм; денситограмма (б) снимка (а), измеренная по линии  $L$ ; (в) — дополнительно увеличенный участок снимка (а).

изображение края. Видно, что изображение края состоит из двух полос повышенного почернения, как в случае рис. 2в, которым соответствуют максимумы 1 и 3 на денситограмме. На рис. 4б продемонстрированы менее резкие максимумы почернения, чем на рис. 3г. О существовании слабой светлой полосы в изображении свидетельствует неглубокий минимум 2.

Расстояние между максимумом 1 и соседним с ним минимумом на рис. 4б составляет 246 мкм. Это соответствует углу  $\theta_r = 2.14 \times 10^{-4}$  рад. Расстояние между максимумами 1 и 3 составляет 394 мкм, что соответствует углу  $\theta_r = 3.74 \times 10^{-4}$  рад. Расстояние между максимумом 1 и минимумом 2 составляет 1330 мкм (или  $\theta_r = 8.73 \times 10^{-4}$  рад) и характеризует величину размытия изображения края на рис. 4а, которое гораздо больше, чем на рис. 2в. В этом случае величина эффективного горизонтального размера источника излучения составляет  $S_H = 134$  мкм, геометрическая нерезкость “краевого” изображения  $\Delta a_1 = 402$  мкм, а вклад дополнительной геометрической нерезкости можно приближенно оценить, как  $\Delta a_2 = 1330$  мкм —  $\Delta a_1 = 928$  мкм. Учитывая это, оценка угла наклона краевой поверхности дает приближенное значение  $\theta_p = \Delta a_2 / Kt_p = 3.33^\circ$ .

На рис. 1б представлены схемы, иллюстрирующие взаимодействие микрофокусного излучения с краем пластины и позволяющие объяснить максимум 1 и минимум 2 на рис. 2г, 3г и 4б, за счет эффекта рефракции. Но образование максимумов 3 на этих денситограммах не находит объяснения в рамках представленных схем. Вероятно, необходимо усложнить модель взаимодействия микрофокусного излучения с краем пластины и включить в рассмотрение дополнительные процессы, например, дифракцию излучения от края наклоненной пластины.



**Рис. 5.** Радиографический снимок (а) края пластикового корпуса эталона Duplex IQI, полученный с увеличением  $\times 2.3$  при использовании тормозного излучения рентгеновской трубки (энергия излучения 450 кэВ, размер фокуса 400 мкм); денситограмма (б) снимка (а), измеренная по линии  $L$ ; в — дополнительно увеличенный участок снимка (а); г — увеличенная часть денситограммы, представленной на (б).

Для сравнения с вышеприведенными результатами, полученными на бетатроне с энергией электронов 18 МэВ, эксперимент был проведен с использованием в качестве источника излучения рентгеновской трубки MXR-451HP/11 [18] с энергией электронов 450 кэВ и размером фокуса 400 мкм. На рис. 5а, 5в представлены фрагмент фотографии распределения излучения рентгеновской трубки после взаимодействия с краем эталона Duplex IQI и ее увеличенный участок. На рис. 5б, 5г представлены соответствующие денситограммы.

Снимок 5а получен при увеличении  $K = 2.3$ . На рис. 5 видно, что изображение пар платиновых проволок диаметром 50 мкм размыто, так как размер пучка в четыре раза больше расстояния между осями проволок 100 мкм. Изображению пары проволок соответствует минимум на денситограмме (б), в отличие от двойных минимумов на денситограммах, представленных на рис. 2. Изображение края образца также размыто из-за достаточно большого размера фокуса трубки. Денситограмма (г) изображения края пластины демонстрирует изменение почернения без явных особенностей в виде пиков или минимумов. Ширина размытия  $\Delta a$  изображения края составляет около 850 мкм (или  $6.2 \times 10^{-4}$  рад), что определяется в значительной мере геометрической нерезкостью  $\Delta a_1 = 520$  мкм.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведено экспериментальное распределение микрофокусного тормозного излучения, сгенерированного в узкой кремниевой мишени бетатрона электронами с энергией 18 МэВ и рассеянного боковой поверхностью пластиковой пласти-

ны эталона Duplex IQI. Наблюдаемая картина, состоящая из двух узких полос повышенного и пониженного почернения вдоль изображения края пластины, может быть объяснена в рамках простой модели рефракции излучения на боковой поверхности. При этом эффект рефракции излучения увеличивает контраст изображения пластины, то есть разницу между почернениями по обе стороны от края пластины. В этом случае резкость изображения края пластины высокая из-за малого размера источника излучения и малого угла наклона боковой поверхности относительно излучения.

Представленные результаты показывают, что “краевой” контраст может иметь более сложную форму, чем две узкие полосы повышенного и пониженного почернения на изображении края пластины. При большем угле наклона боковой поверхности относительно направления излучения на изображениях видны две темные полосы и слабая светлая полоса, а резкость изображения края пластины ниже, чем в первом случае. Это происходит из-за большего угла наклона боковой поверхности образца относительно излучения, так как ширина размытия изображения края определяется шириной увеличенной проекции боковой поверхности на плоскость перпендикулярную направлению излучения, падающего на эту поверхность. Формирование двух полос повышенного почернения на изображении края образца не находит объяснения в рамках простой модели рефракции излучения на боковой поверхности. Для выяснения механизма формирования подобного контраста необходимы детальные исследования ориентационной зависимости “краевого” изображения и его теоретический анализ. Отметим, что ориентационная зависимость рефракционного контраста исследована в [19], но “краевые картины”, полученные при значительных углах наклона боковой поверхности относительно направления излучения, отличаются по виду от представленных в настоящей работе.

Сложная многополосная “краевая картина” была обнаружена только для монохроматического рентгеновского излучения микрофокусного источника (например, [15]) из-за дифракции излучения. В случае полихроматического тормозного излучения, как в настоящей работе, такой эффект не очевиден. Хотя, как было отмечено в [20], для достаточно малого размера источника, то есть при высокой пространственной когерентности излучения, условие продольной когерентности (монохроматичности) выполняется автоматически для всех видов синхротронных источников, излучение которых полихроматическое.

Представленные результаты показали высокое качество излучения микрофокусного источника на основе бетатрона с узкой мишенью внутри. Та-

кой микрофокусный источник может также быть использован в качестве лабораторного источника для исследований, например, в материаловедении или волновых эффектов в рентгеновской и гамма оптике.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rychkov M.M., Kaplin V.V., Sukharnikov K., Vaskovsky I.K. // J. Exp. Theor. Phys. Lett. 2016. V. 103. № 11. P. 723.
2. Rychkov M.M., Kaplin V.V., Kuznetsov S.I., Sukharnikov K., Vaskovskii I.K. // J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. 2017. V. 11. № 3. P. 660.
3. Rychkov M.M., Kaplin V.V., Malikov E.L. et al. // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Engin. 2017. V. 289. P. 012044.
4. Rychkov M.M., Kaplin V.V., Malikov E.L., Smolyanskii V.A., Stepanov Yu.B., Lutsenko A.S., Gentsel'man V., Vaskovskii I.K. // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 881. P. 012007.
5. 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.
6. Патент. 2072643 (Россия). Способ получения фокусного пятна тормозного излучения малых размеров в циклическом ускорителе заряженных частиц / Пушкин В.С. Чахлов В.Л. // 1997. <http://www.findpatent.ru/patent/207/2072643.html>
7. Yamada H. // Jpn. J. Appl. Phys. 1996. V. 35. Iss. 2. № 2A. P. 182.
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.
10. 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. 13. P. 397.
11. Snigirev A., Snigireva I., Kohn V., Kuznetsov S., Schelokov I. // Rev. Scient. Instrum. 1995. V. 66. P. 5486.
12. Gureyev T.F., Paganin D.M., Mayers G.R., Nesterets Y.I., Wilkins S.W. // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89(3). P. 034102.
13. 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.
14. Gasilov S.V., Fayonov A.Ya., Pikuz T.A., Skobelev I., Kalgary F., Votstse K., Nicoloy M., Sansone D., Valentiny D., De Sil'estry S., Statzira S. // JETP Lett. 2008. V. 87. № 5–6. P. 286.
15. El-Ghazaly M., Backe H., Lauth W., Kube G., Kunz P., Sharafutdinov A., Weber T. // Eur. Phys. J. A. 2006. V. 28. P. 197. <https://doi.org/10.1140/epja/i2006-09-021-6>
16. Rychkov M.M., Kaplin V.V., Kuznetsov S.I., Smolyanskii V.A., Vaskovskii I.K. // J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. 2019. V. 13. № 4. P. 609.
17. Rychkov M.M., Kaplin V.V., Kuznetsov S.I., Smolyanskii V.A. // J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. 2021. V. 15. № 2. P. 221. <https://doi.org/10.1134/S1027451021020129>
18. [https://www.comet-xray.cn/CometXRay/media/Content/pdf\\_mxr-451hp\\_11\\_de\\_v1.pdf](https://www.comet-xray.cn/CometXRay/media/Content/pdf_mxr-451hp_11_de_v1.pdf)
19. van Heekeren J., Kostenko A., Hanashima T., Yamada H., Stallinga S., Offerman E., Vliet L. // Med. Phys. 2011. V. 38. № 9. P. 5136–45. <https://doi.org/10.1118/1.3622606>
20. Hwu Y., Tsai Wen-Li, Groso A., Margaritondo G., Ho Je Jung // J. Phys. D: Appl. Phys. 2002. V. 35. № 13. P. R105. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/35/13/201>

## Features of Grazing Interaction of Microfocal Bremsstrahlung with the Surface Edge

M. M. Rychkov<sup>1</sup>\*, V. V. Kaplin<sup>1</sup>, V. A. Smolyanskiy<sup>1</sup>\*\*

<sup>1</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050 Russia

\*e-mail: [rychkov@tpu.ru](mailto:rychkov@tpu.ru)

\*\*e-mail: [vsmol@tpu.ru](mailto:vsmol@tpu.ru)

Experimental results of studying the grazing interaction of microfocal bremsstrahlung with the edge surface of the plastic framework of the radiographic image quality standard Duplex IQI are presented. The results show that edge contrast depends on the orientation of the edge surface and can be more complex than the two narrow bands of increased and decreased blackening on the X-ray radiographic pattern, which are determined by radiation refraction. The results were obtained using microfocal bremsstrahlung generated by grazing interaction of an internal electron beam of a B-18 betatron with an energy of 18 MeV with the surface of Si target 50 or 8 μm thick and 4 mm long along the electron beam. The results are compared with the results on edge contrast obtained using microfocal bremsstrahlung of a 450 keV X-ray tube with a focus size of 400 μm.

**Keywords:** microfocal bremsstrahlung, grazing interaction of radiation with a surface, edge absorption and phase contrasts.