

## Измерение толщины углеродных перезарядных фольг по электронно-микроскопическим изображениям

З. Г. Люллин<sup>1,2</sup>, С. А. Трифонов<sup>3</sup>, С. В. Григоренко<sup>2</sup>, Д. К. Кострин<sup>1✉</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова», Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> ООО «НИА Инжиниринг», Санкт-Петербург, Россия

✉ dkkostrin@mail.ru

**Аннотация.** На сегодняшний день особую значимость имеют исследования, ориентированные на разработку и усовершенствование методов изготовления тонкопленочных перезарядных фольг, применяемых в ускорительной технике для извлечения ускоренных пучков ионов. Одной из приоритетных задач является увеличение срока службы таких фольг, что связано с существенной сложностью процесса их замены. Данная работа посвящена экспериментальному определению с помощью методов электронной микроскопии толщины углеродной пленки, изготовленной методом вакуумно-дугового нанесения углерода на стеклянную подложку в результате распыления графитового стержня. В качестве объектов анализа рассматривались образцы углеродной пленки как в исходном состоянии, так и подвергнутой воздействию пучка ускоренных электронов. Для предварительной оценки поверхностной плотности изготовленной фольги применялся гравиметрический метод, при этом делалось допущение о равномерности осаждения углерода на поверхность. Анализ исследуемых образцов проводился с использованием двух подходов, основанных как на анализе электронно-микроскопических изображений, полученных при расположении объекта в плоскости, перпендикулярной направлению основного электронного пучка, так и на измерениях при размещении объекта на предметном столике, установленном под углом 52° по отношению к направлению первичного электронного пучка. На полученных изображениях отчетливо наблюдаются два сформированных слоя пленки с толщиной от 0.4 до 0.9 мкм, при этом суммарная толщина пленки составила от 1.2 до 2.0 мкм при среднем значении 1.4 мкм. Также был проведен расчет плотности материала пленок, оказавшейся немногим больше плотности технического углерода и менее плотности графита. Полученные двумя способами результаты определения толщины образца согласуются между собой, а также соответствуют расчетной толщине пленки.

**Ключевые слова:** перезарядная фольга, циклотронный ускоритель, структура поверхности, поверхностная плотность, электронная микроскопия, толщина слоя

**Для цитирования:** Измерение толщины углеродных перезарядных фольг по электронно-микроскопическим изображениям / З. Г. Люллин, С. А. Трифонов, С. В. Григоренко, Д. К. Кострин // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 10. С. 28–37. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-10-28-37.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

## Measuring the Thickness of Carbon Stripper Foils Using Electron Microscopy Images

Z. G. Lyullin<sup>1,2</sup>, S. A. Trifonov<sup>3</sup>, S. V. Grigorenko<sup>2</sup>, D. K. Kostrin<sup>1✉</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup> JSC «D. V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», Saint Petersburg, Russia

<sup>3</sup> LLC «NIA Engineering», Saint Petersburg, Russia

✉ dkkostrin@mail.ru

**Abstract.** To date, research focused on the development and improvement of manufacturing methods for thin-film stripper foils used in accelerator technology to extract accelerated ion beams is of particular importance.

One of the priorities is to increase the service life of such foils, which is associated with the significant complexity of the replacement process. This work is devoted to the experimental determination using electron microscopy methods of the thickness of a carbon film produced by vacuum-arc deposition of carbon on a glass substrate as a result of spraying a graphite rod. Samples of a carbon film, both in the initial state and exposed to an accelerated electron beam, were considered as objects of analysis. For a preliminary assessment of the surface density of the manufactured foil, the gravimetric method was used, while the assumption was made about the uniformity of carbon deposition on the surface. The analysis of the studied samples was carried out using two approaches based both on the analysis of electron microscopic images obtained when the object was positioned in a plane perpendicular to the direction of the main electron beam, and on measurements when the object was placed on a slide table mounted at an angle of  $52^\circ$  with respect to the direction of the primary electron beam. The obtained images clearly show two formed film layers with a thickness from 0.4 to 0.9  $\mu\text{m}$ , while the total film thickness ranged from 1.2 to 2.0  $\mu\text{m}$  with an average value of 1.4  $\mu\text{m}$ . The density of the film material was also calculated, which turned out to be slightly higher than the density of carbon black and less than the density of graphite. The results obtained by the two methods for determining the thickness of the sample are consistent with each other, and also correspond to the calculated thickness of the film.

**Keywords:** stripper foil, cyclotron accelerator, surface structure, surface density, electron microscopy, layer thickness

**For citation:** Measuring the Thickness of Carbon Stripper Foils Using Electron Microscopy Images / Z. G. Lyullin, S. A. Trifonov, S. V. Grigorenko, D. K. Kostrin // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 10. P. 28–37. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-10-28-37.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Введение.** На сегодняшний день особую значимость имеют исследования, ориентированные на разработку и усовершенствование методов изготовления тонкопленочных перезарядных фольг, применяемых в ускорительной технике для извлечения ускоренных пучков ионов [1]. В частности, одна из приоритетных задач – увеличение срока службы таких фольг, определяемой параметрами ионного облучения, в частности энергией, интенсивностью пучка, а также скоростью деградации материала, связанной с термическими и радиационными нагрузками [2], [3]. Замена отработавшей свой срок фольги связана не только с необходимостью временного вывода ускорительной установки из эксплуатации, но и последующим длительным восстановлением рабочего режима, а также с повышением радиационных рисков при выполнении таких операций [4]. Систематизация экспериментальных данных по углеродным фольгам с различной поверхностной плотностью, а также изучение морфологических особенностей их поверхности имеют принципиальное значение для решения задач увеличения срока их службы [5].

Существует ряд современных технологий производства углеродных фольг [6], [7]. В рамках данных исследований сверхтонкая фольга из углерода изготавливалась поэтапно. В качестве метода осаждения был выбран вакуумно-дуговой способ, при котором углерод наносился на стеклянную подложку в результате распыления гра-

фитового стержня [8]. Полученная в ходе эксперимента фольга обладала, согласно расчетам, поверхностной плотностью 290  $\text{мкг/см}^2$ , что рассматривалось как перспективный показатель для применения в ускорителях, производимых АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова» и применяемых для наработки ряда радионуклидов для ядерной медицины, в частности для бор-нейтронозахватной терапии, радионуклидной диагностики и радионуклидной терапии [9]. При этом, учитывая, что поверхностная плотность фольги 100  $\text{мкг/см}^2$  соответствует ее толщине порядка 1  $\mu\text{м}$ , можно оценить толщину данной фольги примерно в 2.8...3.0  $\mu\text{м}$ . Можно отметить, что оптимальная толщина фольги подбирается опытным путем для каждой конкретной установки [10].

Следует подчеркнуть, что существует возможность применения набора из нескольких пленок с малой толщиной вместо создания однослойной плотной фольги. Данный метод позволяет продолжать работу ускорителя даже в случае повреждения одной из таких пленок. Кроме того, он способствует увеличению срока службы каждого слоя фольги благодаря меньшему нагреву под воздействием пучка ионов, снижению числа накопленных дефектов и замедлению процесса растрескивания поверхности и, в итоге, приводит к более длительному сохранению работоспособности. В связи с этим целесообразно рассматривать возможность выращивания тонких пленок с подбором толщины экспериментальным путем,

при этом чем больше энергия пучка в ускорителе, тем с более высокой поверхностной плотностью может использоваться фольга. Тем не менее, как было отмечено, особенности технологии производства фольги со значительной толщиной, а также условия ее последующей эксплуатации в режиме термоциклического воздействия могут привести к ее преждевременному разрушению.

Настоящее исследование направлено на определение толщины углеродной пленки, изготовленной по разработанной в АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова» методике с применением вакуумно-дугового технологического оборудования. Режим напыления пленок характеризуется временем процесса, током дуги, зажигаемой между стержнями, и расстоянием между ними. Расстояние между стержнями регулируется специальным приспособлением, в которое помещается один из электродов. При этом, как было отмечено по результатам экспериментов, недостаточное время охлаждения камеры и структуры пленка-подложка приводит к значительному локальному перегреву, который, в свою очередь, вызывает расслаивание формируемой фольги с нарушением ее целостности. В перерывах между напылениями, требуемых для замены стержней, осуществляется опосредованный промежуточный контроль полученной толщины наносимой структуры за счет измерения поверхностной плотности пленки, осуществляемого взвешиванием.

#### Методы исследования и описание образцов.

В рамках данного исследования были применены методы электронной микроскопии (ЭМ), реализованные с использованием оборудования микроскопического комплекса FEI Quanta 200 3D [11].

В качестве объектов анализа рассматривались следующие образцы:

- образец № 1, углеродная пленка с поверхностной плотностью 290 мкг/см<sup>2</sup>;
- образец № 2, углеродная пленка с поверхностной плотностью 290 мкг/см<sup>2</sup>, подвергнутая в течение часа воздействию пучка ускоренных электронов, моделирующего воздействие ионного пучка в процессе работы циклотронного ускорителя [12], [13].

Реализация таких экспериментов дает возможность исследовать воздействие различных факторов на срок службы перезарядных углеродных фольг без необходимости использования собственно ускорителя заряженных частиц, что способствует выявлению оптимальных парамет-

ров процесса их производства и существенно сокращает расходы [14].

Для образца № 2 можно утверждать, что при ЭМ-анализе визуально четко виден градиент модификации поверхности. Необлученная область поверхности достаточно гладкая, ее шероховатость составляет 26 нм, видна слоистость структуры. В свою очередь, для облученной области пленки шероховатость составляет 51 нм, отчетливо видны островки исходного вещества и адсорбата, а также каверны.

Для промежуточной оценки поверхностной плотности изготовленной фольги применяется гравиметрический подход, позволяющий вычислить удельную массу фольги по разности масс стеклянной подложки до и после нанесения покрытия [15]. При этом делается допущение о равномерности осаждения углерода на поверхность, поскольку дуговой источник размещается на существенном отдалении от подложки внутри вакуумной камеры [16].

Толщина углеродной пленки напрямую определяет ее поверхностную плотность, которая в случае пленочных и листовых материалов выражается как отношение массы к единице площади [17]. При этом подразумевается, что площадь определяется по длине и ширине, которые существенно превышают по размерам толщину слоя. Для пленок с толщиной порядка 0.2 мкм характерна поверхностная плотность около 40 мкг/см<sup>2</sup>. Простые расчеты показывают, что такая плотность практически соответствует значениям плотности технического углерода (сажи) [24], которая составляет от 1.76 до 1.95 г/см<sup>3</sup>, и приближается к плотности графита, равной 2.27 г/см<sup>3</sup> (табл. 1) [18]. Это указывает на высокую степень однородности и уплотненности углеродного слоя.

Табл. 1. Расчет поверхностной и объемной плотности углеродной фольги  
Tab. 1. Calculation of the surface and bulk density of carbon foil

Толщина фольги, мкм	<b>0.2</b>	1.5
Размеры листа (ширина × длина), см	1 × 1	1 × 1
Плотность вещества, г/см <sup>3</sup>	2	2
Объем вещества, см <sup>3</sup>	0.00002	0.00015
Масса 1 см <sup>2</sup> фольги, г	0.00004	0.0003
Поверхностная плотность, мкг/см <sup>2</sup>	<b>40</b>	<b>300</b>

\* Параметры, полученные экспериментально и служащие отправной точкой для расчетов, выделены полужирным шрифтом.

Для того чтобы поверхностная плотность углеродной пленки на уровне  $300 \text{ мкг/см}^2$  (характерная для исследованных образцов) соответствовала указанным значениям объемной плотности сажи или графита, толщина пленки должна составлять приблизительно  $1.5 \text{ мкм}$  (табл. 1). Для верификации данной зависимости в рамках эксперимента были выполнены прямые измерения толщины методом электронной микроскопии [19]. Эта функция реализована в программном обеспечении, встроенном в систему управления сканирующего электронного микроскопа [20].

Образец № 1 исследовался без алюминиевой рамки, небольшие фрагменты углеродной пленки крепились на предметном столике микроскопа с помощью двухсторонней проводящей углеродной ленты. Исследования пленки проводились с двух сторон.

Образец № 2 крепился на предметный столик вместе с алюминиевой рамкой, так как в зоне воздействия электронов наблюдаются видимые изменения на поверхности углеродной пленки после облучения. В частности, невооруженным глазом наблюдается светло-серое пятно диаметром около  $5\text{--}6 \text{ мм}$ , отличающееся по цвету и тону от окружающего материала. Исследования также проводились с двух сторон, как в зоне воздействия электронов, так и за ее пределами.

**Результаты исследования образцов углеродной фольги.** Перед проведением ЭМ-анализа исследуемых образцов было принято решение проанализировать их состав с применением рентгеноспектрального микроанализа (РСМ-анализ). Площадь сканирования при анализе, определяемая кратностью увеличения ЭМ  $500\times$ , составляет  $515 \times 597 \text{ мкм}^2$ .

В табл. 2 приведены усредненные по пяти точкам измерения значения содержания химических элементов для двух сторон (А и В) обоих образцов. Полужирным шрифтом в таблице выделены значения, которые на наш взгляд значительно изменились после воздействия электронного пучка на центральную область образца № 2. При проведении РСМ-анализа было отмечено, что содержание алюминия в области пятна от воздействия облучения заметно различается для разных случайных поверхностей координатных зон возбуждения энергодисперсионных спектров при проведении анализа. Остальные химические элементы были обнаружены в примесных количествах, либо фрагментарно, что означает, что большинство из них, вероятно, случайны и относятся к поверхностным загрязнениям.

Табл. 2. Сравнительные результаты РСМ-анализа образцов углеродной фольги  
Tab. 2. Comparative results of the EPM analysis of carbon foil samples

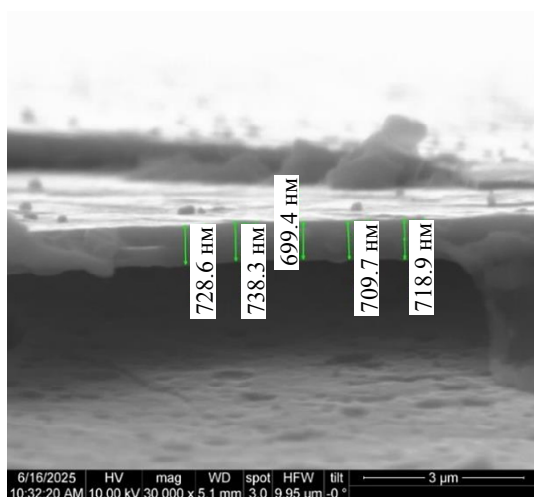
Химический элемент	Массовая доля, %			
	Образец № 1		Образец № 2	
	Сторона А	Сторона В	Сторона А	Сторона В
C	94.11	76.15	92.02	93.62
O	4.50	<b>22.69</b>	1.52	<b>2.15</b>
Cl	0.05	0.04	—	—
S	0.59	0.54	0.52	0.63
Na	0.14	0.07	—	—
Al	<b>0.04</b>	<b>0.03</b>	<b>4.85</b>	<b>2.15</b>
Si	0.10	0.10	—	0.14
Cu	0.30	0.25	0.27	0.12
Fe	0.15	0.13	0.04	—
W	—	—	<b>0.78</b>	<b>1.19</b>

ЭМ-анализ исследуемых образцов проводился с использованием двух подходов. Первый из примененных методов, — планарные измерения, основан на анализе ЭМ-изображений, полученных при расположении объекта в плоскости, перпендикулярной оси электронной колонны, т. е. перпендикулярной направлению основного электронного пучка (рис. 1). Такой режим наблюдения позволяет фиксировать геометрию объекта в проекции сверху и использовать его для оценки линейных размеров и толщины пленки [21]. В этом случае объект находится в плоскости получаемого ЭМ-изображения (на плоскости сканирования), в этой же плоскости реализуются измерения. Для данного подхода был использован образец фольги № 1.

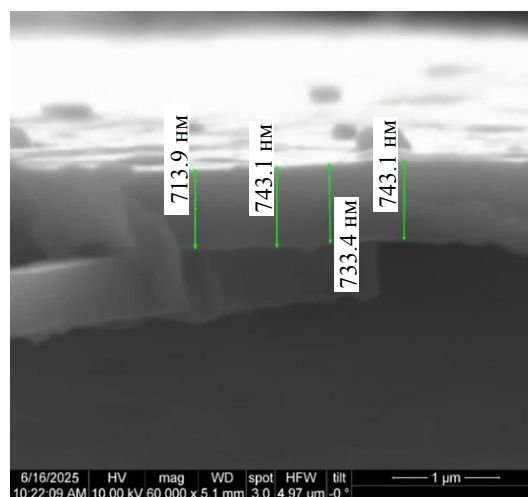


Рис. 1. Расположение образца в камере микроскопа под прямым углом к электронному пучку  
Fig. 1. Position of the sample in the microscope chamber at right angles to the electron beam

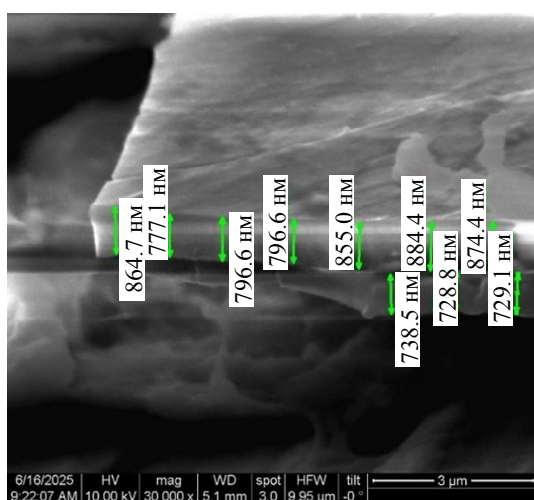
ЭМ-изображения были получены при максимально возможном увеличении от  $10\,000\times$  до  $60\,000\times$ , но при этом оставались достаточно качественными и информативными. Измерения проводили с помощью специализированного ин-



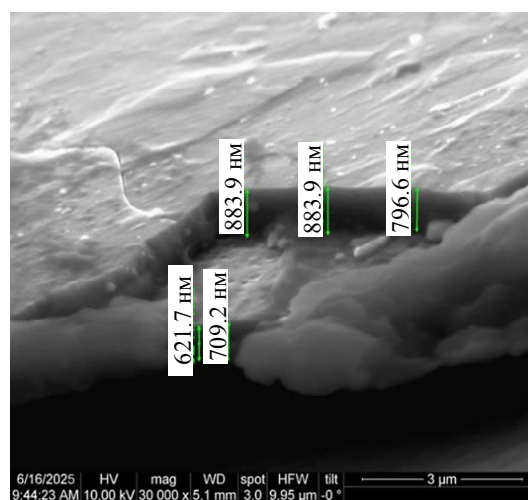
а



б



в



з

Рис. 2. ЭМ-изображения образца фольги в алюминиевой рамке под прямым углом при увеличениях 30 000× (а, в, з) и 60 000× (б) с указанием геометрических размеров  
Fig. 2. EM images of the foil sample in an aluminum frame at right angles at magnifications of 30 000× (a, v, z) and 60 000× (b) with indication of geometric dimensions

струмента в интерфейсе программы управления микроскопом Quanta 200 3D, предназначенным для измерения линейных размеров (отрезков) [22]. На рис. 2 представлены ЭМ-изображения некоторых нативных сломов с программно нанесенными маркерами измерения толщины углеродной пленки.

В случае, когда отчетливо различимы два сформированных слоя пленки суммарная толщина составляет 1.4...1.6 мкм. Это согласуется с оценкой толщины пленки с поверхностной плотностью 300 мкг/см<sup>2</sup> с плотностью вещества близкой к плотности технического углерода (сажи) и графита.

Второй подход к измерениям заключается в измерениях по ЭМ-изображениям объекта, размещенного на предметном столике, который в свою очередь установлен под углом 52° по отношению к

оптической оси электронной колонны (к направлению первичного электронного пучка, рис. 3).



Рис. 3. Расположение образца в камере микроскопа под углом 52° к электронному пучку  
Fig. 3. Position of the sample in the microscope chamber at an angle of 52° to the electron beam

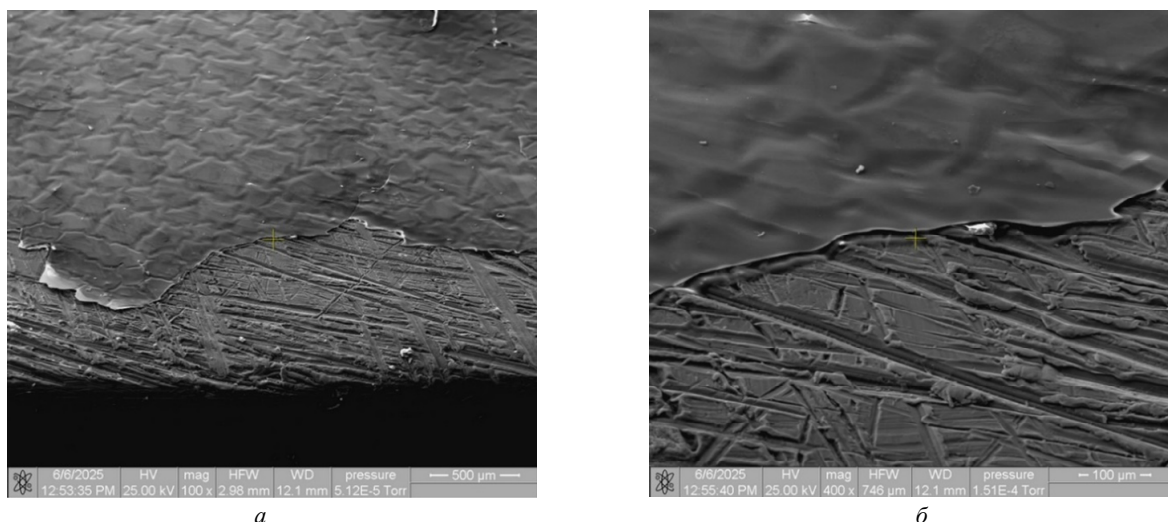


Рис. 4. Внешний вид фрагментов сопряжения пленки с поверхностью рамки при различных увеличениях (предметный столик под углом 52°): а – 100×; б – 400×

Fig. 4. Appearance of fragments of the film interface with the frame surface at various magnifications (slide table at an angle of 52°): а – 100×; б – 400×

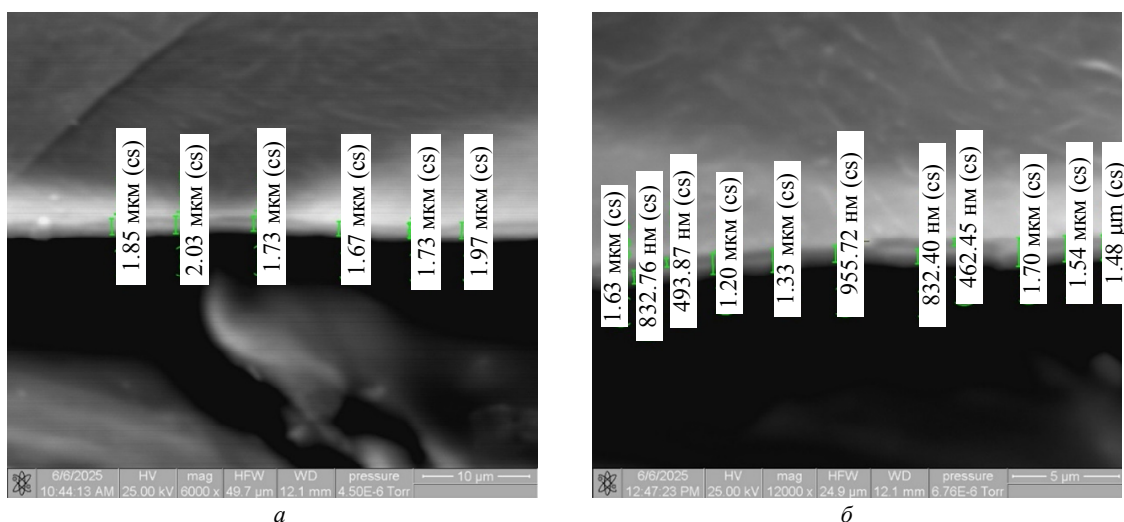


Рис. 5. ЭМ-изображения образца фольги со стороны облучения под углом 52° при увеличениях 6 000× (а) и 12 000× (б) с нанесенными измерительными маркерами

Fig. 5. EM images of the foil sample from the irradiation side at an angle of 52° at magnifications of 6 000× (а) and 12 000× (б) with applied measuring markers

В этом случае торцевые поверхности объекта, ориентированные перпендикулярно поверхности предметного столика, соответствуют понятию «поперечные сечения». Если измерять их с учетом угла наклона столика (режим «tilt correction») и использовать опцию поперечного сечения (режим «cross section») при нанесении измерительного маркера, то измеряемый размер будет соответствовать высоте поперечного сечения, т. е. в данном случае толщине пленки. Для данного измерения использовались ЭМ-изображения образца № 2 с поверхностной плотностью 290 мкг/см<sup>2</sup> подвергнутого облучению пучком заряженных электронов. Внешний вид фрагментов сопряжения пленки с поверхностью рамки представлен на рис. 4.

На рис. 5 представлены ЭМ-изображения фрагментов пленки в местах сопряжения с рамкой с нанесенными измерительными маркерами. На изображениях при увеличениях 6 000× и 12 000× можно оценить толщину пленки. Видно, что образец в данной области рассмотрения местами состоит из двух слоев. Толщина всей пленки по изображениям при 6 000× составляет от 1.42 до 2.03 мкм, при этом среднее значение толщины составляет 1.69 мкм. Толщина слоев по изображению фрагмента пленки при 12 000× в местах измерения равна от 0.956 до 1.63 мкм, при этом среднее значение толщины составляет 1.4 мкм. Полученные результаты согласуются с данными измерений по первому способу и с рас-



четной толщиной пленки с поверхностной плотностью  $300 \text{ мкг/см}^2$ .

Толщина одного верхнего слоя (среднее значение по двум измерениям) составляет  $478.2 \text{ нм}$ , толщина нижнего слоя, также измеренного по двум областям –  $832.6 \text{ нм}$ . Получать изображения с еще большим увеличением оказалось нецелесообразным из-за затруднительной фокусировки, при которой грани поперечного сечения пленки получались «размытыми», а границы – нечеткими. В этих условиях относительно точные измерения, по понятным причинам, невозможны.

В процессе анализа поперечной структуры образцов фольги были обнаружены участки с трещинами и сколами, которые предоставляют информацию о внутренней структуре, видимой на упомянутых дефектах, открывающих внутреннюю поверхность. Судя по характеру этих дефектов, можно предположить, что в структуре пленок, помимо подложки, которая значительно отличается от основной пленки по множеству параметров, присутствует выраженная многослойность, состоящая как минимум из двух слоев. Не следует исключать возможность того, что углеродная фольга может расслоиться при возникновении деформаций под действием случайных изгибающих усилий, которые предшествуют или сопровождают образование сколов. Трудно утверждать, что многослойность

и способность к расслоению характерны для всех пленок, изготовленных по данной технологии, однако на представленных фрагментах обоих образцов явно заметно наличие нескольких слоев.

**Заключение.** В исследованиях был проведен анализ структуры углеродной фольги с использованием методов ЭМ: были измерены толщины отдельных слоев, различимых на микрофотографиях, а также определена суммарная толщина покрытия.

Был проведен расчет плотности материала пленок и показано, что плотность материала составляет порядка  $2 \text{ г/см}^3$ . Это значение немногим больше плотности технического углерода (сажи)  $1.76...1.95 \text{ г/см}^3$  и меньше плотности графита  $2.27 \text{ г/см}^3$ . Проведено измерение толщины пленки с плотностью  $290 \text{ мкг/см}^2$ , которая составила  $1.2...2.0 \text{ мкм}$  (в среднем  $1.4 \text{ мкм}$ ) для суммарной структуры и  $0.4...0.9 \text{ мкм}$  для ее отдельных слоев, толщину которых удалось измерить. Полученные данные по измерениям толщины фольги хорошо согласуются с расчетными значениями, полученными с учетом плотности материала пленок.

Полученные в результате исследования данные будут использованы для оптимизации режимов напыления различных видов тонкой углеродной фольги, что позволит лучше контролировать толщину и качество получаемых пленок.

## Список литературы

1. Шарков Б. Ю., Мешков И. Н. Развитие физики и технологии ускорителей заряженных частиц. М.: Российская Академия Наук, 2021. 140 с.
2. Расчет времени жизни углеродных перезарядных мишеней в интенсивных потоках тяжелых ионов / Б. Н. Гикал, Г. Г. Гульбекян, В. И. Казача, Д. В. Каманин. Дубна: Объединенный ин-т ядерных исследований, 2005. 12 с.
3. Казаринов Н. Ю., Гульбекян Г. Г., Иваненко И. А. Расчет вывода пучка из циклотронов TR-24 и ДЦ-140 // Письма в журн. Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2020. Т. 17, № 4 (229). С. 468–473.
4. Multipurpose Cyclotron System for research works and applied use / R. M. Klopenkov, Z. A. Andreeva, A. V. Vannin, O. L. Veresov, Yu. N. Gavrish, A. V. Galchuck, S. V. Grigorenko, V. I. Grigoriev, Yu. V. Zuev, M. L. Klopenkov, L. E. Korolev, K. A. Kravchuck, A. N. Kuzhlev, I. I. Mezhev, A. G. Miroshnichenko, V. G. Mudrolyubov, G. V. Muraviov, Yu. K. Osina, K. E. Smirnov, M. V. Usanova, S. S. Tsygankov // Phys. of Particles and Nuclei Lett. 2020. Vol. 17, no. 4. P. 615–619. doi: 10.1134/S1547477120040238.
5. Hellborg R. Electrostatic Accelerators. Berlin Heidelberg: Springer, 2005. 275 p.
6. Defect-oriented carbon stripper foil development / D. Kabiraj, S. Ojha, S. R. Abhilash, D. K. Avasthi, S. K. Datta // Nuclear Instruments and Methods in Phys. Research

Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2004. Vol. 521, no. 1. P. 183–186. doi: 10.1016/j.nima.2003.11.149.

7. Jaggi V., Pavan R. A., Zeisler S. K. Production of carbon stripper foils for high-power cyclotrons // Nuclear Instruments and Methods in Phys. Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2006. Vol. 561, no. 1. P. 1–3. doi: 10.1016/j.nima.2005.12.183.

8. Lisenkov A. A., Kostrin D. K., Pikus M. I. Vacuum arc deposition of carbon and carbon-based coatings // Solid State Phenom. 2017. Vol. 265. P. 750–754. doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.265.750.

9. Особенности конструкции циклотрона Ц-250 / К. Е. Смирнов, А. А. Акимова, О. В. Ананьева, Ю. Н. Гавриш, А. В. Галчук, Д. В. Кирцев, В. Г. Мудролюбов, Ю. К. Осина, Ю. И. Стогов // Письма в журн. Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2023. Т. 20, № 4. С. 1015–1020.

10. Расчет и проектирование высоковакуумных систем циклотронного ускорителя с применением конечно-элементного моделирования / З. Г. Люллин, И. В. Лазарев, И. В. Гольяев, Д. К. Кострин // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 4. С. 16–25. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-4-16-25.

11. Исследование микроструктуры и элементного состава платинита методами РЭМ и СЗМ / К. Н. Нищев, В. П. Мишкин, М. В. Вилкова, В. Ю. Илюшкин, Д. И. Рожаев // Оборонный комплекс – науч.-техн. прогрессу России. 2014. № 1 (121). С. 43–48.
12. Measurement of continuous degradation of a stripper foil during this operation with 300 kW beam power in the 3-GeV RCS of J-PARC / P. K. Saha, M. Yoshimoto, H. Hotchi, H. Harada, K. Okabe, Y. Yamazaki, M. Kinsho, Y. Irie // J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2015. Vol. 305, no. 3. P. 851–857. doi: 10.1007/s10967-015-4023-7.
13. Measurement of lifetimes of thin carbon stripper foils produced by ion-beam sputtering / Y. Takeda, Y. Irie, I. Sugai, A. Takagi, M. Oyaizu, H. Kawakami, T. Hattori, K. Kawasaki // Vacuum. 2010. Vol. 84, no. 12. P. 1448–1451. doi: 10.1016/j.vacuum.2010.01.050.
14. Оценка долговечности углеродных перезарядных фольг циклотронных ускорителей / И. В. Гольяев, Ю. С. Барышников, С. В. Григоренко, О. Л. Вересов, И. В. Лазарев, И. А. Родионов, З. Г. Люллин, Д. К. Кострин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2025. Т. 91, № 6. С. 45–53. doi: 10.26896/1028-6861-2025-91-6-45-53.
15. Кузнецов Б. В., Морева А. А., Рахманова Т. А. Сравнение гравиметрического, объемного и газохроматографического методов измерения адсорбции // Журн. физ. химии. 2000. Т. 74, № 9. Т. 1507–1511.
16. Смоленов Н. А., Неверов В. А. Особенности структур, осажденных из плазмы дугового разряда // Письма о материалах. 2015. Т. 5, № 2. С. 179–184.
17. Казанцев В. В., Медведевских С. В., Васильев А. С. Государственный первичный эталон единиц поверхностной плотности и массовой доли элементов в покрытиях ГЭТ 168–2015 // Измерительная техника. 2018. № 9. С. 17–19. doi: 10.32446/0368-1025it-2018-9-17-19.
18. Свойства и методы анализа углеродных материалов / Г. И. Раздьяконова, Л. Г. Пьянова, Ю. В. Суровикин, В. А. Лихолобов. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. 172 с.
19. Теплофизические свойства графита МПГ-6 / С. В. Станкус, И. В. Савченко, А. Ш. Агажанов, О. С. Яцук, Е. И. Жмуриков // Теплофизика высоких температур. 2013. Т. 51, № 2. С. 205–209.
20. Автоматический анализ неметаллических включений в стали с помощью электронного микроскопа с энергодисперсионным микроанализатором / Т. И. Сидоренко, В. И. Возная, Ю. С. Белаш, Е. В. Ермаченко // Литье и металлургия. 2022. № 1. С. 64–69. doi: 10.21122/1683-6065-2022-1-64-69.
21. Усманов А. И., Козлова А. В., Мешков В. Г. Анализ современных методов автоматизации неразрушающего контроля качества и диагностики электронных компонентов // Вестн. МГТУ «Станкин». 2024. № 2. С. 161–172.
22. Scanning electron microscopy for quantitative small and large deformation measurements Part II: experimental validation for magnifications from 200 to 10,000 / M. A. Sutton, N. Li, D. Garcia, N. Cornille, J. J. Orteu, S. R. McNeill, H. W. Schreier, X. Li, A. P. Reynolds // Experimental Mechan. 2007. Vol. 47, no. 6. P. 789–804. doi: 10.1007/s11340-007-9041-0.

### Информация об авторах

**Люллин Захар Геннадьевич** – аспирант гр. 2922 СПбГЭТУ «ЛЭТИ»; инженер. АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова», дор. на Металлострой, д. 3, Санкт-Петербург, 196641, Россия.  
E-mail: lullin@luts.niiefa.spb.su

**Трифонов Сергей Александрович** – канд. техн. наук, главный инженер-проектировщик. ООО «НИА Инжиниринг», ул. Восстания, д. 40, Санкт-Петербург, 191123, Россия.  
E-mail: triser89@gmail.com

**Григоренко Сергей Викторович** – канд. техн. наук, начальник лаборатории. АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова», дор. на Металлострой, д. 3, Санкт-Петербург, 196641, Россия.  
E-mail: grigorenko\_sv@luts.niiefa.spb.su

**Кострин Дмитрий Константинович** – д-р техн. наук, профессор кафедры электронных приборов и устройств СПбГЭТУ «ЛЭТИ».  
E-mail: dkkosttrin@mail.ru  
<http://orcid.org/0000-0002-6284-0246>

### Вклад авторов:

Люллин З. Г. – обзор литературы, проведение экспериментов.

Трифонов С. А. – разработка методики измерения, проведение экспериментов.

Григоренко С. В. – постановка задачи, анализ результатов, выводы.

Кострин Д. К. – анализ результатов, подготовка текста статьи.



## References

1. Sharkov B. Ju., Meshkov I. N. Razvitie fiziki i tehnologii uskoritelej zarjazzhennykh chastic. M.: Rossijskaja Akademija Nauk, 2021. 140 s. (In Russ.).
2. Raschet vremeni zhizni uglerodnykh perezarjadnykh mishenej v intensivnykh potokakh tjazhelykh ionov / B. N. Gikal, G. G. Gul'bekjan, V. I. Kazacha, D. V. Kamanin. Dubna: Ob#edinennyj in-t jadernykh issledovanij, 2005. 12 s. (In Russ.).
3. Kazarinov N. Ju., Gul'bekjan G. G., Ivanenko I. A. Raschet vyvoda puchka iz ciklotronov TR-24 i DC-140 // Pis'ma v zhurnal Fizika jelementarnykh chastic i atomnogo jadra. 2020. T. 17, № 4 (229). S. 468–473. (In Russ.).
4. Multipurpose Cyclotron System for research works and applied use / R. M. Klopenkov, Z. A. Andreeva, A. V. Vanin, O. L. Veresov, Yu. N. Gavrish, A. V. Galchuck, S. V. Grigorenko, V. I. Grigoriev, Yu. V. Zuev, M. L. Klopenkov, L. E. Korolev, K. A. Kravchuck, A. N. Kuzhlev, I. I. Mezhev, A. G. Miroshnichenko, V. G. Mudrolyubov, G. V. Muraviov, Yu. K. Osina, K. E. Smirnov, M. V. Usanova, S. S. Tsygankov // Phys. of Particles and Nuclei Lett. 2020. Vol. 17, no. 4. P. 615–619. doi: 10.1134/S1547477120040238.
5. Hellborg R. Electrostatic Accelerators. Berlin-Heidelberg: Springer, 2005. 275 p.
6. Defectoriented carbon stripper foil development / D. Kabiraj, S. Ojha, S. R. Abhilash, D. K. Avasthi, S. K. Datta // Nuclear Instruments and Methods in Phys. Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2004. Vol. 521, no. 1. P. 183–186. doi: 10.1016/j.nima.2003.11.149.
7. Jaggi V., Pavan R. A., Zeisler S. K. Production of carbon stripper foils for high-power cyclotrons // Nuclear Instruments and Methods in Phys. Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2006. Vol. 561, no. 1. P. 1–3. doi: 10.1016/j.nima.2005.12.183.
8. Lisenkov A. A., Kostrin D. K., Pikus M. I. Vacuum arc deposition of carbon and carbon-based coatings // Solid State Phenom. 2017. Vol. 265. P. 750–754. doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.265.750.
9. Osobennosti konstrukcii ciklotrona C-250 / K. E. Smirnov, A. A. Akimova, O. V. Anan'eva, Ju. N. Gavrish, A. V. Galchuk, D. V. Kircev, V. G. Mudrolyubov, Ju. K. Osina, Ju. I. Stogov // Pis'ma v zhurn. Fizika jelementarnykh chastic i atomnogo jadra. 2023. T. 20, № 4. S. 1015–1020. (In Russ.).
10. Raschet i proektirovanie vysokovakuumnykh sistem ciklotronnogo uskoritelja s primeneniem konechno-jelementnogo modelirovanija / Z. G. Ljullin, I. V. Lazarev, I. V. Gol'tjaev, D. K. Kostrin // Izv. SPbGJeTU «LJeTI». 2025. T. 18, № 4. S. 16–25. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-4-16-25. (In Russ.).
11. Issledovanie mikrostruktury i jelementnogo sostava platinita metodami RJeM i SZM / K. N. Nishhev, V. P. Mishkin, M. V. Vilkova, V. Ju. Iljushkin, D. I. Rozhaev // Oboronnyj kompleks – nauch.-tehn. progressu Rossii. 2014. № 1 (121). S. 43–48. (In Russ.).
12. Measurement of continuous degradation of a stripper foil during this operation with 300 kW beam power in the 3-GeV RCS of J-PARC / P. K. Saha, M. Yoshimoto, H. Hotchi, H. Harada, K. Okabe, Y. Yamazaki, M. Kinsho, Y. Irie // J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2015. Vol. 305, no. 3. P. 851–857. doi: 10.1007/s10967-015-4023-7.
13. Measurement of lifetimes of thin carbon stripper foils produced by ion-beam sputtering / Y. Takeda, Y. Irie, I. Sugai, A. Takagi, M. Oyaizu, H. Kawakami, T. Hattori, K. Kawasaki // Vacuum. 2010. Vol. 84, no. 12. P. 1448–1451. doi: 10.1016/j.vacuum.2010.01.050.
14. Ocenka dolgovechnosti uglerodnykh perezarjadnykh fol'g ciklotronnykh uskoritelej / I. V. Gol'tjaev, Ju. S. Baryshnikov, S. V. Grigorenko, O. L. Veresov, I. V. Lazarev, I. A. Rodionov, Z. G. Ljullin, D. K. Kostrin // Zavodskaja laboratorija. Diagnostika materialov. 2025. T. 91, № 6. S. 45–53. doi: 10.26896/1028-6861-2025-91-6-45-53. (In Russ.).
15. Kuznecov B. V., Moreva A. A., Rahmanova T. A. Sravnenie gravimetricheskogo, ob#emnogo i gazohromatograficheskogo metodov izmerenija adsorbcii // Zhurn. fiz. himii. 2000. T. 74, № 9. T. 1507–1511. (In Russ.).
16. Smolanov N. A., Neverov V. A. Osobennosti struktur, osazhdennykh iz plazmy dugovogo razrjada // Pis'ma o materialah. 2015. T. 5, № 2. S. 179–184. (In Russ.).
17. Kazancev V. V., Medvedevskih S. V., Vasil'ev A. S. Gosudarstvennyj pervichnyj jetalon edinic poverhnostnoj plotnosti i massovoj doli jelementov v pokrytijah GJeT 168–2015 // Izmeritel'naja tehnika. 2018. № 9. S. 17–19. doi: 10.32446/0368-1025it-2018-9-17-19. (In Russ.).
18. Svojstva i metody analiza uglerodnykh materialov / G. I. Razd'jakonova, L. G. P'janova, Ju. V. Surovikin, V. A. Liholobov. Omsk: Izd-vo OmGTU, 2014. 172 s. (In Russ.).
19. Teplofizicheskie svojstva grafita MPG-6 / S. V. Stanekus, I. V. Savchenko, A. Sh. Agazhanov, O. S. Jacuk, E. I. Zhmurikov // Teplofizika vysokikh temperatur. 2013. T. 51, № 2. S. 205–209. (In Russ.).
20. Avtomaticheskij analiz nemetallicheskih vkljucheenij v stali s pomoshh'ju jelektronnogo mikroskopa s jenergodispersionnym mikroanalizatorom / T. I. Sidorenko, V. I. Voznaja, Ju. S. Belash, E. V. Ermachenok // Lit'e i metallurgija. 2022. № 1. S. 64–69. doi: 10.21122/1683-6065-2022-1-64-69. (In Russ.).
21. Usmanov A. I., Kozlova A. V., Meshkov V. G. Analiz sovremennykh metodov avtomatizacii nerazrushajushhego kontrolja kachestva i diagnostiki jelektronnykh komponentov // Vestn. MGТУ «Stankin». 2024. № 2. S. 161–172. (In Russ.).
22. Scanning Electron microscopy for quantitative small and large deformation measurements part II: Experimental validation for magnifications from 200 to 10,000 / M. A. Sutton, N. Li, D. Garcia, N. Cornille, J. J. Orteu, S. R. McNeill, H. W. Schreier, X. Li, A. P. Reynolds // Experimental Mechan. 2007. Vol. 47, no. 6. P. 789–804. doi: 10.1007/s11340-007-9041-0.

### Information about the authors

**Zakhar G. Lyullin** – postgraduate student of gr. 2922 Saint Petersburg Electrotechnical University, Engineer JSC «D. V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», rd. to Metallostroy, 3, St. Petersburg, 196641, Russia.  
E-mail: lullin@luts.niiefa.spb.su

**Sergey A. Trifonov** – Cand. Sci. (Eng.), Chief design engineer. LLC «NIA Engineering», Vosstaniya St., 40, St. Petersburg, 191123, Russia.  
E-mail: triser89@gmail.com

**Sergey V. Grigorenko** – Cand. Sci. (Eng.), Head of the laboratory. JSC «D. V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», rd. to Metallostroy, 3, St. Petersburg, 196641, Russia.  
E-mail: grigorenko\_sv@luts.niiefa.spb.su

**Dmitry K. Kostrin** – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the department of electronic instruments and devices. Saint Petersburg Electrotechnical University.  
E-mail: dkkostrin@mail.ru  
<http://orcid.org/0000-0002-6284-0246>

#### Author contribution statement:

Lyullin Z. G. – literature review, conducting experiments.

Trifonov S. A. – development of measurement methods, conducting experiments.

Grigorenko S. V. – problem statement, analysis of the results, conclusions.

Kostrin D. K. – analysis of the results, preparation of the article text.

Статья поступила в редакцию 29.07.2025; принята к публикации после рецензирования 15.08.2025; опубликована онлайн 30.12.2025.

Submitted 29.07.2025; accepted 15.08.2025; published online 30.12.2025.

---