

ОПТИМИЗАЦИЯ СПЕКТРА КИНЕТИЧЕСКИХ ЭНЕРГИЙ ЭЛЕКТРОНОВ ПУЧКА ИМПУЛЬСНОГО УСКОРИТЕЛЯ ДЛЯ ОБЪЕМНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

И.С. Егоров, А.В. Полосков, М.А. Серебренников, Г.Е. Ремнев
Томский политехнический университет, пр. Ленина 30, 634050 Томск, Россия,
egoris@tpu.ru, polskovav@tpu.ru, mas48@tpu.ru, remnev@tpu.ru

Работа содержит результаты анализа выделения энергии электронного пучка (дозы) по глубине облучаемого материала в зависимости от спектра кинетических энергий электронов. Восстановлен спектр кинетических энергий электронов до 250 кэВ, обеспечивающий наиболее равномерное (неоднородность менее 1%) распределение дозы по глубине для массовой толщины объекта до 28 мг/см². Эффективность использования по сравнению с моноэнергетическим пучком 250 кэВ увеличилась с 65 до 75%. Полученный спектр отличается наличием низкоэнергетических электронов и подобен спектру пучка субмикросекундного электронного ускорителя на основе импульсного трансформатора. Результаты могут быть использованы при построении технологической линии объемной обработки материалов на основе импульсных и непрерывных ускорителей с возможностью корректировки амплитуды ускоряющего напряжения.

Ключевые слова: импульсный электронный пучок; спектр кинетических энергий электронов пучка; моноэнергетический электронный пучок; поглощенная доза; распределение поглощенной дозы по глубине.

OPTIMIZATION OF THE ELECTRON KINETIC ENERGY SPECTRUM OF A PULSED ACCELERATOR BEAM FOR BULK PROCESSING OF MATERIALS

Ivan Egorov, Artem Poloskov, Maksim Serebrennikov, Gennady Remnev
Tomsk polytechnic university, 30 Lenin Ave., 634050 Tomsk, Russia,
egoris@tpu.ru, polskovav@tpu.ru, mas48@tpu.ru, remnev@tpu.ru

Continuous electron accelerators are most often currently used to build radiation technologies. In bulk processing of materials with monoenergetic electron beams, the maximum absorbed dose is reached in the depth of the material (not on surface). This leads to a decrease in the efficiency of using the energy transmitted by the electron beam. An overexposed region are also produced. This paper contains the results of an analysis of the electron beam energy release (absorbed dose) over the depth of the irradiated material depending on the spectrum of the kinetic energies of the electrons. A method is described for increasing the efficiency of using a beam by adding electrons with a lower kinetic energy to the spectrum. The spectrum of the kinetic energies of electrons to 250 keV was restored, providing the uniform (inhomogeneity less than 1%) dose distribution in depth for the mass thickness of an object made of polyethylene to 28 mg/cm². The efficiency of use compared to a 250 keV monoenergetic beam increased from 65 to 75%. The resulting spectrum is characterized by the presence of low-energy electrons and is similar to the spectrum of a beam of a sub-microsecond electron accelerator based on a pulsed transformer. The results can be used to build a technological line for bulk processing of materials based on pulsed and continuous accelerators with the possibility of adjusting the amplitude of the accelerating voltage. For pulsed electron accelerators, a series of pulses with different amplitudes of the accelerating voltage can be used.

Keywords: pulsed electron beam; electron kinetic energy spectrum of the beam; monoenergetic electron beam; absorbed dose; depth distribution of absorbed dose.

Введение

В настоящее время для построения радиационных технологий наибольшее распространение получили источники непрерывных электронных пучков [1, 2]. При объемной обработке материалов в технологическом процессе ключевое значение имеет характеристика, которая оценивает выделение энергии электронного пучка по глубине - поглощенную дозу. Анализ данных литературных источников с теоретическими и эмпирическими оценками показывает, что максимальное выделение энергии происходит на глубине от поверхности (рис. 1) [3, 4]. При практическом использовании электронного пучка для объемной обработки материалов производительность установки определяется областью однородного распределения энергии, а значит и поглощенной дозы, по глубине (рис. 1).

Таким образом, при использовании моноэнергетических пучков непрерывных ускорителей возникают области, как с избыточным, так и с недоста-

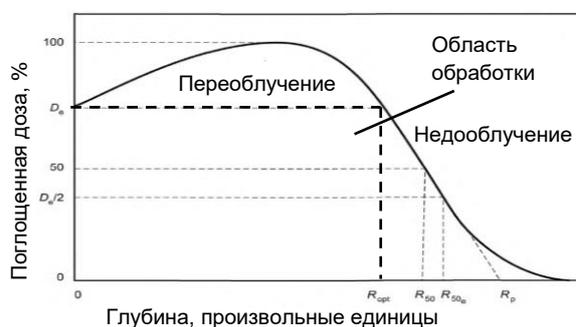


Рис. 1. Типичное (идеализированное) распределение дозы по глубине для электронного пучка в однородном материале, состоящем из элементов с низким атомным номером

Fig. 1. Typical (idealized) depth dose distribution for an electron beam in a homogeneous material with a low atomic number

точным значением поглощенной дозы, что снижает область эффективной обработки. Для снижения влияния описанного эффекта используют системы двухстороннего облучения материала.

Настоящая работа рассматривает вариант изменения области обработки с помощью корректирования спектра кинетических энергий электронов пучка. Предлагается использовать электронные пучки со сложным спектром кинетических энергий электронов для дополнительного выделения энергии в приповерхностных областях материала. Такой эффект может быть получен при использовании импульсных ускорителей электронов, построенных на основе импульсного трансформатора, а также при воздействии пучков, ускоренных при разном значении амплитуды ускоряющего напряжения.

Методика проведения исследований

Для оптимизации спектра кинетических энергий для объемного облучения материалов использовали опубликованные данные литературных источников для моноэнергетических электронных пучков с дискретным значением кинетических энергий [5]. Оптимизация проводилась путем расчета пропорций электронов с разными кинетическими энергиями в составе пучка. Полученный электронный пучок, с оптимизированным спектром, сравнивался с восстановленным спектром кинетических энергий электронов пучка для импульсного ускорителя электронов Астра-М [6].

Результаты и их обсуждение

На рисунке 2 приведено семейство кривых выделения энергии по глубине для моноэнергетических пучков [5] и для пучка с оптимизированным энергетическим спектром. В качестве объекта использовали мишень из полиэтилена.

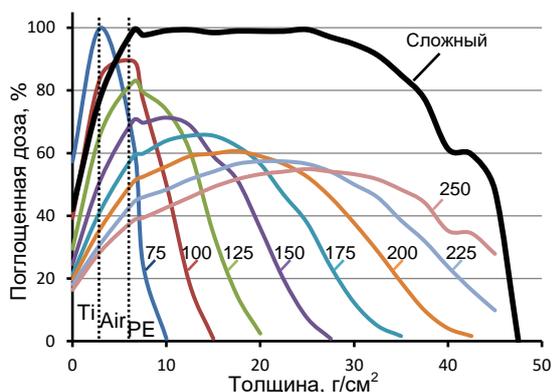


Рис. 2. Распределение дозы по глубине полиэтиленовой мишени (PE) для электронов с разной кинетической энергией (указаны цифрой, кэВ), с учетом фольги 6 мкм выпускного окна (Ti) и воздушного промежутка 25 мм до мишени (Air).

Fig. 2. The dose distribution over the depth of the polyethylene target (PE) for electrons with different kinetic energies (indicated by the number, keV), taking into account the outlet window 6 μm foil (Ti) and the air gap 25 mm to the target (Air).

Кривые на рис. 2 учитывают выделение энергии в фольге выпускного окна толщиной 6 мкм и в воз-

душном промежутке до обучаемого объекта. Оптимизированный спектр кинетических энергий электронов в пучке был получен сложением кривых для моноэнергетических электронных пучков с разными пропорциональными коэффициентами, приведенными на рисунке 3. Однородность распределения по глубине, определяющая эффективность использования пучка электронов, оценивалась по отношению площади под кривой к площади прямоугольника с уровнем энерговыделения достигнутым на поверхности мишени (рис. 1). Для электронного пучка со сложным составом спектра кинетических энергий получено, что выделение порядка 10% энергии электронного пучка в области кинетических энергий 75-150 кэВ, при максимальной кинетической энергией 250 кэВ, позволяет увеличить эффективность использования энергии пучка с 65% до 75%. Кроме того, применение пучка со сложным составом спектра позволяет на заданной глубине от поверхности материала, например, до 28 мг/см² на рис. 2, получить неоднородность дозы менее 1%.

Кривая коэффициентов пропорциональности распределения электронов с разными кинетическими энергиями в пучке может быть представлена как спектр кинетических энергий в относительных единицах и приведена на рис. 3.

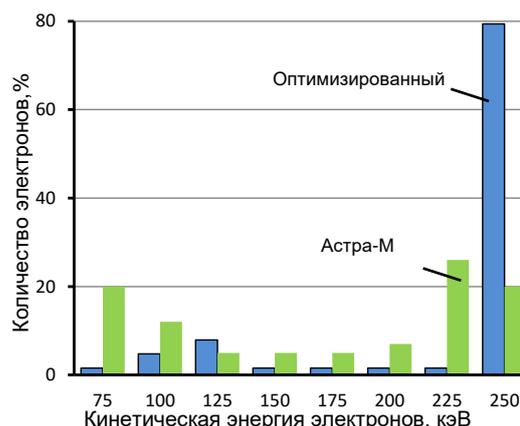


Рис. 3. Спектр кинетических энергий электронов

Fig. 3. Kinetic energy spectrum of electrons

Сравнение полученной кривой с восстановленным спектром кинетических энергий электронов пучка импульсного ускорителя Астра-М [6] показывает возможность генерации пучков со спектром подобным оптимизированному для объемной обработки материалов. Наличие низкоэнергетической составляющей в пучке электронов ускорителя на основе импульсного трансформатора является особенностями его работы. Генератор ускорителя позволяет формировать импульсы ускоряющего напряжения 250-450 кВ с частотой повторения до 50 имп./с [7]. Ускоритель используется для решения научных и практических задач [8, 9].

Технически достигнуть оптимального распределения энергии электронного пучка по глубине для объемной обработки материалов можно оптимизацией формы импульса ускоряющего напряжения, увеличивая пропорцию электронов с высокой кинетической энергией. Кроме того, возможно форми-

рование сложного спектра из последовательных импульсов ускоряющего напряжения с разной амплитудой. Последний способ легко реализуется, в том числе в автоматическом режиме, при использовании современных источников зарядки первичных накопителей и трансформаторных схем генерации импульсов ускоряющего напряжения.

Заключение

Показан способ обеспечения высокой однородности обработки материалов электронным пучком, в состав которого входят электроны с разными кинетическими энергиями для корректировки дозы на необходимой глубине. Для полиэтиленовой мишени восстановлен спектр электронов пучка, обеспечивающий разброс поглощенной дозы менее 1% по глубине до 28 мг/см². Спектр кинетических энергий, подобный оптимизированному, может быть получен при использовании электронного ускорителя на основе импульсного трансформатора, обеспечивающего наличие низкоэнергетических электронов в пучке. Также для получения требуемого спектра может быть использована серия импульсов с разной амплитудой ускоряющего напряжения.

Работа выполнена при поддержке Томского политехнического университета и с использованием средств гранта РФФИ 18-79-00261.

Библиографические ссылки

1. Cleland M. Industrial applications of electron accelerators, «CAS - CERN Accelerator School and KVI: Specialised CAS Course on Small Accelerators», Proceedings. (24 May – 2 Jun, 2005), Zeegse, The Netherlands, 2005. 383–416.
2. Chmielewski A.G, Haji-Saeid M. Radiation technologies: Past, present and future. *Radiation Physics Chemistry*. 2004; 71(1–2): 17–21.
3. ГОСТ 34157 2017 Руководство по дозиметрии при обработке пищевых продуктов электронными пучками и рентгеновским (тормозным) излучением (ISO/ASTM 51431:2005, NEQ).
4. Svensson H., Almond P., Brahme A., Dutreix A., Leetz H.K. Report 35, Journal of the International Commission on Radiation Units and Measurements. Bethesda, Maryland, U.S.A. p. 166.
5. Cleland M. R., Galloway R. A., Berejka A. J. Energy dependence of electron beam penetration, area throughput rates and electron energy utilization in the low-energy region. *Nuclear Instruments Methods Physisc Research Section B Beam Interaction with Materials Atoms*. 2007; 261(1-2 SPEC. ISS.): 94–97.
6. Egorov I, Remnev G, Poloskov A, Serebrennikov M. Effect of emission current delay on the efficiency of electron beam production. *Vacuum* [Internet]. 2017; 1–5.
7. Ремнев Г.Е., Егоров И.С., Кайканов М.И., Канаев Г.Г., Луконин Е.И., Нашилевский А.В., и др. Частотно-импульсный электронный ускоритель для радиационных технологий. В кн. Кадыржанов К. К., редактор. Материалы 8-ой международной конференции «Ядерная и радиационная физика». (20-23 сентября 2011 г.), г. Алма-Ата. Алма-Ата: Институт ядерной физики национального ядерного центра Республики Казахстан; 2011. 549-555.
8. Egorov I.S., Kaikanov M.I., Kolokolov D.Yu., Merinova L.R., Remnev G.E., Sazonov R.V. et. al. Treatment of industrial and household waste water with the pulse electron accelerator-based setup. *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2012; 55(10): 61-64.
9. Mostovshchikov A. V., Ilyin A. P., Egorov I.S., Ismailov D. V. Thermal Stability of Iron Micro- and Nanopowders after Electron Beam Irradiation. *Key Engineering Materials*. 2016; 712: 60–64.

References

1. Cleland M. Industrial applications of electron accelerators, «CAS - CERN Accelerator School and KVI: Specialised CAS Course on Small Accelerators», Proceedings. (24 May – 2 Jun, 2005), Zeegse, The Netherlands, 2005. 383–416.
2. Chmielewski A.G, Haji-Saeid M. Radiation technologies: Past, present and future. *Radiation Physics Chemistry*. 2004; 71(1–2): 17–21.
3. GOST (Government standard) 34157 2017 Rukovodstvo po dozimetrii pri obrabotke pishchevykh produktov elektronnyimi puchkami i rentgenovskim (tormoznym) izlucheniem [Guidelines for dosimetry in the processing of food products by electron beams and x-ray (bremsstrahlung) radiation] (ISO/ASTM 51431:2005, NEQ) (in Russian).
4. Svensson H., Almond P., Brahme A., Dutreix A., Leetz H.K. Report 35, Journal of the International Commission on Radiation Units and Measurements. Bethesda, Maryland, U.S.A. 166 p.
5. Cleland M. R., Galloway R. A., Berejka A. J. Energy dependence of electron beam penetration, area throughput rates and electron energy utilization in the low-energy region. *Nuclear Instruments Methods Physisc Research Section B Beam Interaction with Materials Atoms*. 2007; 261(1-2 SPEC. ISS.): 94–97.
6. Egorov I, Remnev G, Poloskov A, Serebrennikov M. Effect of emission current delay on the efficiency of electron beam production. *Vacuum* [Internet]. 2017; 1–5.
7. Remnev G.E., Egorov I.S., Kaykanov M.I., Kanaev G.G., Lukonin E.I., Nashilevskiy A.V., et. al. Chastotno-impul'snyy elektronnyy uskoritel' dlya radiatsionnykh tekhnologiy [Pulsed electron accelerator for radiation technology]. Kadyrzhанov K. K., editor. «Yadernaya i radiatsionnaya fizika», Proceedings. (20 - 23 of September, 2011), Alma-Ata. Alma-Ata: The Institute of Nuclear Physics of National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan; 2011; 549-555. (in Russian).
8. Egorov I.S., Kaikanov M.I., Kolokolov D.Yu., Merinova L.R., Remnev G.E., Sazonov R.V. et. al. Treatment of industrial and household waste water with the pulse electron accelerator-based setup. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika*. 2012; 55(10): 61-64.
9. Mostovshchikov A. V., Ilyin A. P., Egorov I.S., Ismailov D. V. Thermal Stability of Iron Micro- and Nanopowders after Electron Beam Irradiation. *Key Engineering Materials*. 2016; 712: 60–64.