

Применение алюминиевых и титановых фольг в низкоэнергетических широкоапертурных электронных ускорителях

© Л.В. Бодакин, А.И. Гусаков, О.В. Комаров, С.Л. Косогоров, С.А. Мотовилов, Н.А. Успенский

Акционерное общество „НИИЭФА им. Д.В. Ефремова“,
196641 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: slkosogorov@mail.ru

(Поступило в Редакцию 15 декабря 2015 г.)

Приведены результаты расчетных и экспериментальных исследований характеристик алюминиевых и титановых фольг, используемых в устройствах вывода электронного пучка широкоапертурных низкоэнергетических ускорителей с высокой плотностью тока. Проведено сравнение механических свойств фольг при различных температурах, коэффициентов прохождения и поглощения электронного пучка. Приводятся результаты исследований зависимости эффективности вывода электронного пучка ускорителей от типа электронно-оптической системы, материала и толщины фольги, при различных размерах выводных окон и однотипной конструкции опорных решеток щелевого типа. Предложена аналитическая модель расчета температуры фольги в элементарной ячейке опорной решетки. Расчеты прохождения и поглощения электронов, а также температурных режимов фольг выполнены с использованием различных методик.

Введение

Одним из важнейших узлов широкоапертурных низкоэнергетических электронных ускорителей, определяющих их эффективность и надежность, является устройство вывода пучка (УВП), отделяющее вакуумную камеру ускорителя от внешней среды и обеспечивающее вывод электронного пучка из вакуумной камеры в атмосферу или среду с иным давлением. Основным элементом устройства вывода пучка является прозрачная для электронов разделительная фольга, которая устанавливается на опорной решетке (ОР), играющей роль поддерживающей и охлаждающей фольгу структуры.

Отличительной особенностью ускорителей рассматриваемого типа является синхронная генерация электронного пучка с одновременной засветкой всей апертуры площадью до $6000\text{--}7000\text{ см}^2$ и шириной до 40 см. Эффективность, или коэффициент вывода пучка таких ускорителей заметно ниже эффективности ускорителей с разверткой, ширина опорной решетки в которых обычно не превышает 10–15 см, поэтому поддерживающие фольгу структуры либо не используются, либо имеют высокую геометрическую прозрачность. Под коэффициентом вывода подразумевается отношение тока выведенного из ускорителя электронного пучка к току падающего на устройство вывода пучка в вакууме; геометрическая прозрачность опорной решетки — это отношение площади прозрачной (в свету) части апертуры к площади всей апертуры.

В конструкциях устройств вывода широкоапертурных низкоэнергетических электронных ускорителей разработки АО „НИИЭФА“ применяются опорные решетки, изготовленные из хромистой бронзы, и фольги из алюминиевого сплава АМг-2н толщиной 30 и 50 $\mu\text{м}$.

Использование хромистой бронзы для изготовления решеток обусловлено тем, что она сочетает в себе хорошие механические и теплофизические свойства.

Теплопроводность бронзы БрХ не намного меньше, чем у меди, их величины составляют 314 и 395 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ соответственно, а предел прочности — 440 и 450 МПа, т.е. практически одинаков [1].

В устройствах вывода пучка помимо фольг из алюминия и его сплавов в мировой практике используются также фольги из бериллия, его сплавов с алюминием, титана и полимерных пленок (майлар, лавсан). Бериллиевые фольги применяются обычно для выводных окошек рентгеновских трубок, использование их для широкоапертурных ускорителей весьма ограничено из-за хрупкости бериллиевых фольг и высокой токсичности соединений бериллия. Применение полимерных пленок нельзя назвать распространенным. Несмотря на высокие коэффициенты прохождения, их используют в исследовательских экспериментах в режиме одиночных импульсов, суммарное время наработки до потери вакуумной прочности невелико.

В широкоапертурных ускорителях в мире широко применяется титановая фольга, которая превосходит алюминиевую практически по всем показателям, за исключением теплопроводности.

Для оценки возможности использования титановых фольг в низкоэнергетических широкоапертурных ускорителях при высокой плотности выводимого пучка и сравнения их с алюминиевыми нами были проведены экспериментальные и расчетные исследования, результаты которых приводятся ниже. В экспериментах использовалась титановая фольга шириной 300 мм производства ФРГ.

Сравнение свойств алюминиевых и титановых фольг

Для сравнения механических свойств используемых нами алюминиевых и титановых фольг были проведены

их испытания на статическое растяжение. Работы проводились с помощью испытательной машины Instron 5965 зав. № L2142 с действующим свидетельством о поверке, микроскопа измерительного Olympus SZX7, длиномера вертикального ИЗВ-3 в соответствии с нормативно-технической документацией, используемой при испытаниях, и методиками, отвечающими требованиям государственных стандартов. Диаграммы растяжения титановой фольги толщиной 15 μm и алюминиевой фольги толщиной 30 μm при различных температурах приведены на рис. 1. На диаграммах по оси абсцисс указана величина относительного удлинения после разрыва (δ , [%]) или деформация при растяжении, по оси ординат — напряжение при растяжении (σ , [МПа]).

Средние значения предела прочности (σ_B) и условного предела текучести ($\sigma_{0,2}$) титановой фольги составили 824 и 680 МПа при комнатной температуре. Повышение температуры заметно сказывается на их величине. При нагревании испытуемых образцов до 150°C значения снизились до 616 и 538 МПа, при температуре 300°C — до 440 и 363 МПа соответственно.

Значения этих параметров для фольги АМг-2н толщиной 30 μm при комнатной температуре составили соответственно 320 и 301 МПа и оставались неизменными вплоть до температуры 80°C. Нагрев испытуемых образцов выше этой температуры приводил к снижению показателей. При температуре 120°C предел прочности понизился до $\sigma_B = 295$ МПа, при 140°C — до $\sigma_B = 267$ МПа. Температурная зависимость пределов прочности и текучести фольги АМг-2н (30 μm) представлена на рис. 2.

При снятии диаграмм растяжения алюминиевой фольги толщиной 50 μm были получены более высокие значения σ_B и $\sigma_{0,2}$, превышающие на 6–9% эти показатели

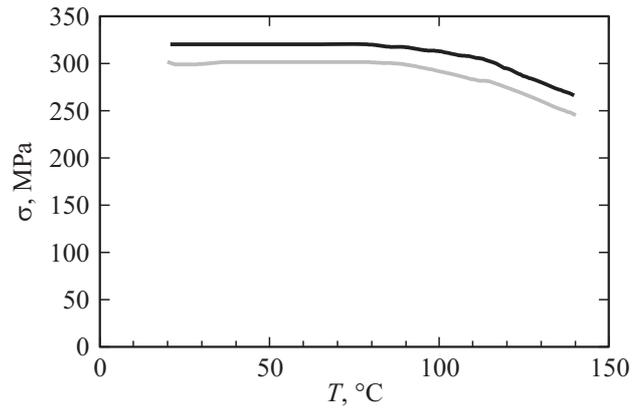


Рис. 2. Зависимость предела прочности и предела текучести фольги марки АМг-2н от температуры: верхняя кривая — $\sigma_B = f(T)$, нижняя — $\sigma_{0,2} = f(T)$.

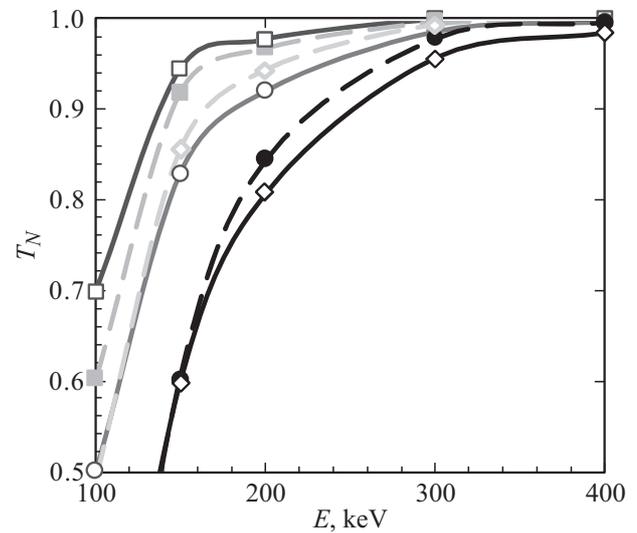


Рис. 3. Зависимость коэффициента прохождения T_N по числу частиц от энергии для титановых и алюминиевых фольг. \diamond — Ti, 25 μm ; \circ — Ti, 15 μm ; \square — Ti, 10 μm ; \bullet — Al, 50 μm ; \blacklozenge — Al, 30 μm ; \blacksquare — Al, 25 μm .

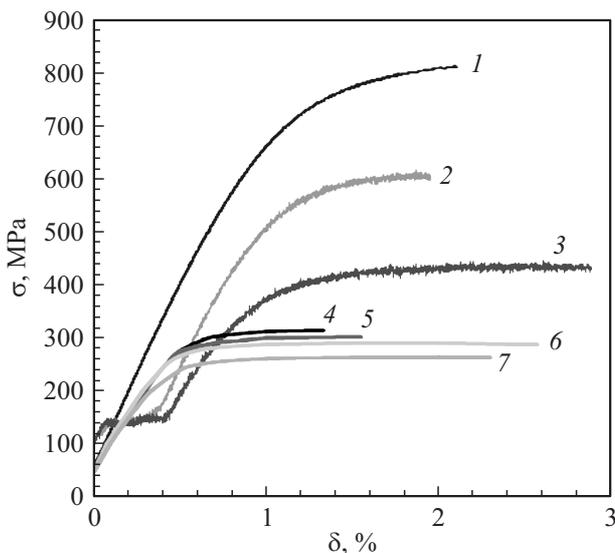


Рис. 1. Диаграммы растяжения титановой фольги и фольги марки АМг-2н при различных температурах: 1 — Ti, 22°C; 2 — Ti, 150°C; 3 — Ti, 300°C; 4 — Al, 22–80°C; 5 — Al, 110°C; 6 — Al, 120°C; 7 — Al, 140°C.

для фольги 30 μm во всем исследованном температурном диапазоне.

Температурная зависимость предела прочности хорошо согласуется с нашими экспериментальными результатами при работе с фольгами АМг-2н. В соответствии с экспериментами допустимые рабочие температуры этих фольг составляют 100–120°C; при температуре выше 150°C наблюдается потеря вакуумной плотности фольги, при температурах 120–140°C существенно снижается их срок службы.

Как видно из рис. 1, даже при температуре 300°C механические свойства титановой фольги лучше, чем у алюминиевой при комнатной температуре. Температура, при которой начинается ухудшение механических свойств титановой фольги, нами не определялась. Необходимо отметить, что по оценкам специалистов (напри-

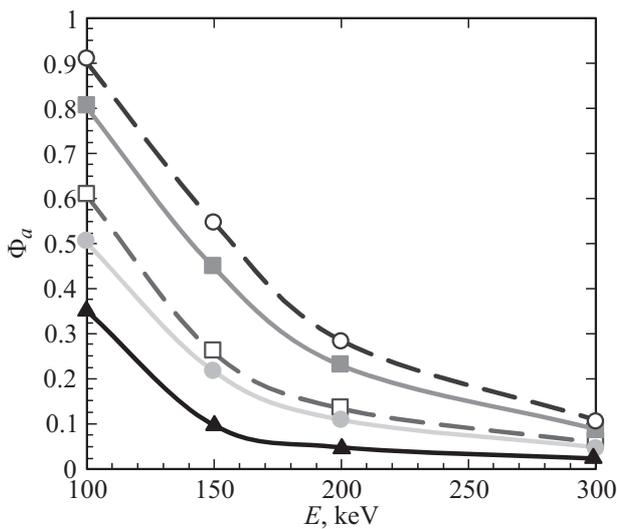


Рис. 4. Зависимость коэффициента поглощения алюминиевых и титановых фольг от энергии: \circ — Al, 50 μm ; \square — Al, 30 μm ; \blacksquare — Ti, 25 μm ; \bullet — Ti, 15 μm ; \blacktriangle — Ti, 10 μm .

мер, [2]) предельно допустимая температура титановой фольги должна быть ниже температуры начала активного окисления:

$$t_{\max} = t_a / \kappa_s, \quad (1)$$

где t_a — температура начала активного окисления фольги; $\kappa_s = 1.1\text{--}1.25$ — коэффициент запаса, обычно используемый на практике. С учетом этого предельно допустимая температура титановой фольги ($t_a = 400^\circ\text{C}$) может быть оценена величиной $t_{\max} = 350^\circ\text{C}$.

Расчетные характеристики прохождения по числу частиц (T_N) и поглощения энергии (Φ_a) алюминиевых и титановых фольг и их зависимости от энергии электронов приведены на рис. 3 и 4 [3]. Значения коэффициентов для титановой фольги толщиной 25 μm и алюминиевой толщинами 50 и 25 μm взяты из таблиц, для Ti толщинами 10 и 15 μm и Al толщиной 30 μm получены интерполяцией табличных данных. Как видно из представленных зависимостей, при сопоставимых значениях коэффициентов пропускания коэффициент поглощения титановой фольги заметно меньше, чем алюминиевой. Например, для энергии 200 keV коэффициент поглощения титановой фольги толщиной 10 μm составляет $\Phi_a = 0.05$ при коэффициенте пропускания $T_N = 0.975$, а коэффициент поглощения алюминиевой фольги толщиной 30 μm , имеющей близкий коэффициент пропускания ($T_N = 0.945$), — $\Phi_a = 0.135$.

Сравнение физических свойств фольг, влияющих на процессы ее охлаждения, показывает, что коэффициент теплопроводности фольги АМГ-2н существенно выше, чем титановой фольги ($\lambda_{\text{Al}} = 126 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, $\lambda_{\text{Ti}} = 16 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), а степень черноты выше уже у титановой фольги ($\varepsilon_{\text{Ti}} \approx 0.20$, $\varepsilon_{\text{Al}} \approx 0.03$).

Результаты экспериментальных исследований прохождения электронных пучков с высокой плотностью тока

Эксперименты по исследованию прохождения электронного пучка с высокой средней плотностью тока проводились на нескольких термоэмиссионных ускорителях с различными электронно-оптическими системами (ЭОС).

На ускорителе „УМ“ с апертурой $40 \times 60 \text{ cm}$ проведены эксперименты с триодными и тетродными ЭОС и алюминиевыми (АМГ-2н) фольгами толщиной 30 и 50 μm [4]. На ускорителе „УГ“ с апертурой $15 \times 60 \text{ cm}$ и тетродной ЭОС устанавливались алюминиевая фольга толщиной 30 μm и титановая фольги толщиной 10 и 15 μm . На ускорителе „УС“ с апертурой $40 \times 50 \text{ cm}$ и триодной ЭОС использовалась алюминиевая фольга толщиной 30 μm [5].

Исследования проводились в диапазонах ускоряющих напряжений 110–200 kV и величин плотности тока, падающего на опорную решетку, 30–250 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Во всех ускорителях использовались однотипные охлаждаемые водой опорные решетки со щелевой перфорацией, геометрия которых показана на рис. 5.

Толщина опорной решетки (H), ширина (d), длина (l) и шаг (s) щелей, шаг коллекторов охлаждения (L) и размеры каналов охлаждения ($b \times h$) были определены на основании прочностных и тепловых расчетов, исходя из необходимости обеспечения вывода электронного пучка со средней плотностью $\sim 100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ за алюминиевой фольгой толщиной 30 μm при ускоряющем напряжении $\sim 200 \text{ kV}$ и атмосферном внешнем давлении. Геометрическая прозрачность опорных решеток составляет 62%.

В качестве критерия сравнения использовался коэффициент вывода электронного пучка, определяемый как

$$\eta = I_b / I_0, \quad (2)$$

где I_b — ток выведенного из ускорителя электронного пучка, I_0 — ток пучка, падающего на опорную решетку

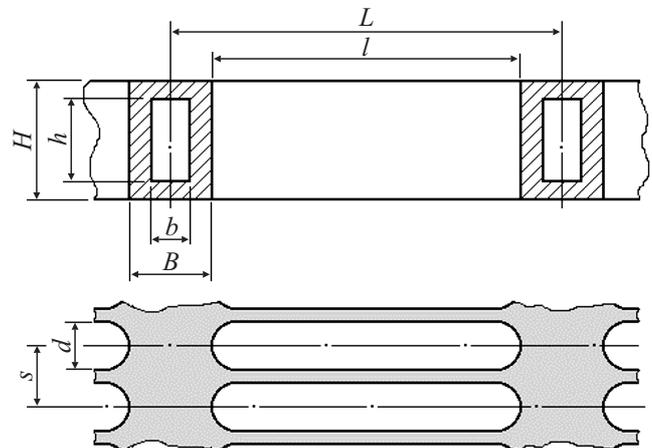


Рис. 5. Конструктивная схема охлаждаемой опорной решетки со щелевой перфорацией.

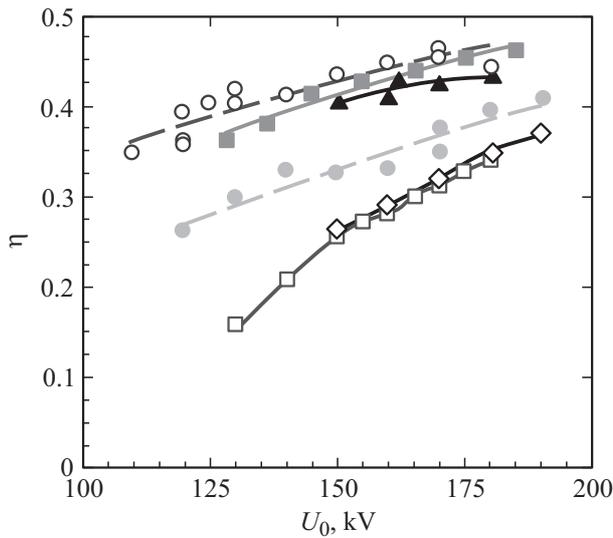


Рис. 6. Коэффициент вывода тока электронного пучка ускорителей с устройствами вывода с Al- и Ti-фольгами: \diamond — ускоритель „УМ“, триод, Al, 50 μm ; \square — ускоритель „УМ“, тетрод, Al, 50 μm ; \blacktriangle — ускоритель „УМ“, тетрод, Al, 30 μm ; \bullet — ускоритель „УГ“, тетрод, Ti, 15 μm ; \circ — ускоритель „УГ“, тетрод, Ti, 10 μm ; \blacksquare — ускоритель „УС“, триод, Al, 30 μm .

в вакууме (ток нагрузки ускорителя). Измерения величины I_b проводились методом полного перекрытия пучка коллектором из алюминиевого сплава с низкоомным измерительным шунтом. Измерение величины I_0 проводилось с помощью токового шунта в земляной цепи высоковольтного выпрямителя.

Результаты экспериментов обобщены на рис. 6 в виде зависимостей коэффициентов вывода η от ускоряющего напряжения U_0 .

Обсуждение экспериментальных результатов

Полученные результаты свидетельствуют о следующем.

Тип электронно-оптической системы ускорителя не влияет на величину коэффициента вывода пучка. При использовании фольги одинаковой толщины коэффициенты вывода на ускорителе „УМ“ с триодной и тетродной ЭОС имеют очень близкие значения.

При использовании однотипных опорных решеток максимальные значения коэффициента вывода получены при использовании титановой фольги толщиной 10 μm , имеющей самый высокий среди исследованных фольг коэффициент пропускания.

По прохождению электронов алюминиевая фольга толщиной 30 μm лишь немного уступает титановой 10 μm . Например, при ускоряющем напряжении 170 кВ на ускорителе „УГ“ величина коэффициента вывода с титановой фольгой составила $\eta = 0.46$, а с алюминиевой — $\eta = 0.41$ (при расчетных значениях коэффициентов пропускания $T_N = 0.96$ и $T_N = 0.92$ соответственно).

Промежуточные значения коэффициентов вывода пучка были получены при использовании титановой фольги толщиной 15 μm . Обращает на себя внимание то, что, несмотря на близкие значения T_N титановой (15 μm) и алюминиевой (30 μm) фольг, коэффициент вывода при использовании алюминиевой фольги заметно выше, чем титановой. Наиболее вероятным объяснением служит то, что расчетные значения T_N приведены для нормально падающего электронного пучка [3], а в экспериментах падающий пучок имеет полуширину углового распределения при подлете к опорной решетке 2.25–2.5° [6], кроме того, не учитывалось влияние краевых эффектов по периметру апертуры электронного пучка. Очевидно, что при таких энергиях определяющими для коэффициента вывода являются не потери в фольге выводного устройства, а потери электронного пучка в опорной решетке.

Таким образом, эксперименты показали, что коэффициенты вывода пучка ускорителей с опорными решетками рассмотренной конструкции при использовании титановой (10 μm) и алюминиевой (30 μm) фольг имеют близкие значения. При использовании тонкой титановой фольги значение коэффициента вывода достигает $\eta = 0.45–0.48$ при ускоряющем напряжении $U_0 = 180–190$ кВ, что несколько выше, чем для алюминиевой фольги толщиной 30 μm .

Еще одним существенным результатом проведенных экспериментальных исследований является следующее.

В проведенных на различных ускорителях исследованиях время наработки фольги зависит от величины плотности тока электронного пучка, ускоряющего напряжения и эффективности охлаждения опорной решетки.

При использовании фольги АМГ-2н это время составляет от нескольких сотен часов при средней плотности тока выведенного электронного пучка $j_b < 50 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ до нескольких десятков минут при $j_b > 100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

При работе с титановой фольгой это время оказалось значительно ниже. При использовании фольги толщиной 15 μm общая наработка составила лишь несколько десятков секунд, прорыв фольги произошел при плотности тока нагрузки $j_0 = 200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ($j_b \approx 90 \mu\text{A}/\text{cm}^2$). Образец толщиной 10 μm показал наработку 70 s, прорыв фольги произошел при $j_0 = 255 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ($j_b \approx 110 \mu\text{A}/\text{cm}^2$). На отработанных фольгах видны следы пластической деформации, выраженные в остаточном прогибе фольги внутрь ячейки опорной решетки, а также изменение ее цвета. Возможные причины этого обсуждаются ниже.

Аналитическая модель расчета температуры фольги

Прохождение электронного пучка через УВП сопровождается неизбежными потерями его энергии, обуславливающими нагрев ОР и фольги.

В рассматриваемой конструкции УВП охлаждение фольги осуществляется путем ее радиационно-конвективного теплообмена с внешней средой и кон-

дуктивного теплообмена с охлаждаемой ОР. На установившемся тепловом режиме вся тепловая мощность, поглощаемая УВП, частично рассеивается фольгой в окружающую среду, а частично отводится хладагентом, прокачиваемым через каналы охлаждения ОР. При этом максимальная температура фольги (в центре щелевой ячейки) определяется следующей суммой:

$$T_F^{\max} = T_0 + \Delta T_F + \Delta T_K + \Delta T_P + \Delta T_X, \quad (3)$$

где T_0 — температура хладагента, ΔT_F — температурный перепад на фольге (по ширине щели), ΔT_K — температурный перепад в зоне контакта „фольга—опорная решетка“, ΔT_P — температурный перепад на ребре ячейки опорной решетки, ΔT_X — температурный напор в канале охлаждения.

Величина плотности теплового потока в фольгу определяется как

$$q_S = j \cdot U_0 \cdot \Phi_a(U_0), \quad (4)$$

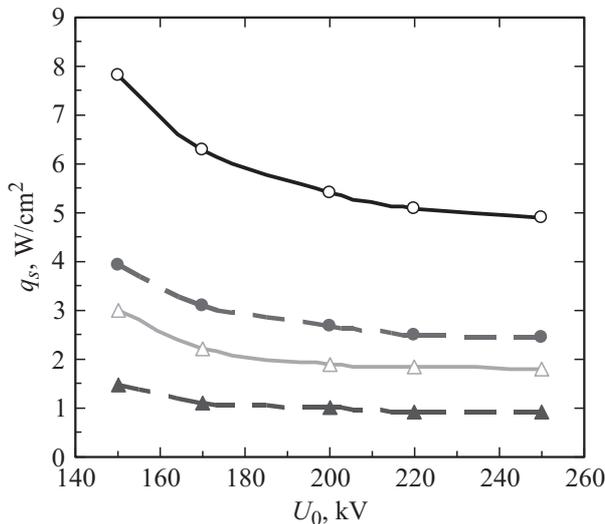


Рис. 7. Зависимость плотности теплового потока в фольгу от ускоряющего напряжения $q_S = f(U_0)$: о — Ti, 10 μm , $j_0 = 200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$; • — Ti, 10 μm , $j_0 = 100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$; Δ — Al, 30 μm , $j_0 = 200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$; ▲ — Al, 30 μm , $j_0 = 100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

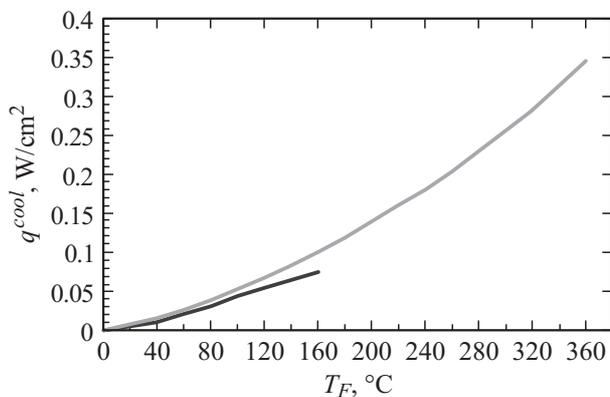


Рис. 8. Зависимость рассеиваемой в окружающую среду мощности от температуры фольги: верхняя кривая — Ti, нижняя кривая — Al.

где j — плотность тока пучка перед фольгой, которая в первом приближении может быть задана равной плотности тока нагрузки (j_0), U_0 — ускоряющее напряжение, Φ_a — коэффициент поглощения фольги, который является функцией ускоряющего напряжения (рис. 4). На рис. 7 показаны зависимости $q_S = f(U_0)$, построенные в соответствии с (4) для алюминиевой (30 μm) и титановой (10 μm) фольг при умеренных ($j_0 = 100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) и высоких ($j_0 = 200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) плотностях тока пучка.

Для оценки величины мощности, рассеиваемой фольгой в окружающую среду, может быть использовано простое соотношение

$$q_S^{\text{cool}} = \alpha(T_F - T_{\text{amb}}) + \varepsilon\sigma_0 [(T_F + 273)^2 - (T_{\text{amb}} + 273)^4], \quad (5)$$

где T_F и T_{amb} — соответственно температура фольги и окружающей среды ($^{\circ}\text{C}$), α — коэффициент теплоотдачи конвекцией, ε — степень черноты фольги, σ_0 — постоянная Стефана–Больцмана. На рис. 8 показаны зависимости, построенные по выражению (5) для алюминиевой и титановой фольг при условии вывода пучка в атмосферу при нормальных условиях ($P = 10^5 \text{ Pa}$, $T_{\text{amb}} = 20^{\circ}\text{C}$) и естественной конвекции ($\alpha \approx 5 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$), что соответствует условиям проведения экспериментов.

Из сравнения рис. 7 и 8 следует, что для алюминиевой фольги даже в случае поддержания ее температуры на уровне предельно допустимой ($T_F \approx 140^{\circ}\text{C}$) вклад теплообмена фольги с окружающей средой в тепловом балансе пренебрежимо мал (1–2%), т.е. практически все выделяющееся в фольге тепло отводится охлаждаемой ОР. В случае титановой фольги радиационно-конвективный теплообмен с воздухом способен обеспечить съём $\sim 15\%$ выделяющегося в фольге тепла при высоких плотностях тока ($j_0 = 200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) и $\sim 30\%$ при умеренных плотностях тока ($j_0 = 100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$). Это обусловлено тем, что, во-первых, титановая фольга поглощает существенно меньшую долю энергии пучка, во-вторых, допускает нагрев до более высокой температуры ($T_F \approx 350^{\circ}\text{C}$) и, в-третьих, обладает сравнительно высокой степенью черноты, определяющей интенсивность радиационного теплообмена.

Если пренебречь влиянием теплообмена фольги с окружающей средой, для расчета величин слагаемых, входящих в (3) могут быть использованы следующие соотношения [7–9]:

$$\Delta T_F = \frac{d^2}{8\lambda_f \delta_f} \sigma_c \Phi_a \cdot j_0 U_0, \quad (6)$$

$$\Delta T_K = A \frac{1 + \lambda_f / \lambda_c}{\lambda_f} \frac{\sigma_c \sigma_g \Phi_a}{(1 - \sigma_g)^{0.14}} j_0 U_0, \quad (7)$$

$$\Delta T_P = \frac{l^2}{8\lambda_c H} \frac{1 - \sigma_c \sigma_g (1 - \Phi_a)}{(1 - \sigma_g)} j_0 U_0, \quad (8)$$

$$\Delta T_X = \frac{L}{2\alpha_X H} \left[1 - \sigma_g \sigma_c (1 - \Phi_a) \frac{l}{L} \right] j_0 U_0. \quad (9)$$

Здесь d, H, L, l — геометрические параметры ОР (рис. 5), λ_f и λ_c — коэффициенты теплопроводности фольги и ОР, δ_c — толщина фольги, σ_g — геометрическая прозрачность ОР, σ_c — коэффициент „угловой“ прозрачности ОР, учитывающий потери пучка при прохождении щелевой ячейки ОР, обусловленные „развалом“ пучка (при полуширине углового разброса пучка в пределах 2.5° его величина для рассматриваемой ОР $\sigma_c \approx 0.95$), α_x — коэффициент теплоотдачи к хладагенту в канале охлаждения (при использовании воды $\alpha_x \approx 10 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$), A — коэффициент, учитывающий механические свойства контактирующих материалов, внешнее давление, с которым фольга прижимается к опорной решетке, и чистоту обработки их поверхностей (при чистоте обработки поверхности, выполненной из хромистой бронзы ОР на уровне $R_a = 1.6$ для алюминиевой фольги $A = 0.026$, для титановой — $A = 0.052$). Остальные обозначения приведены выше.

Соотношения (6) и (7) получены на основании решения стандартной задачи теплопроводности в ребре с источником теплоты (см., например, [7]). Соотношение (9) записано при условии, что вся выделяющаяся в УВП тепловая мощность отводится хладагентом, прокачиваемым через каналы охлаждения ОР. При выводе соотношения (7) использованы рекомендации [8,9], в соответствии с которыми проводимость в зоне контакта определяется соотношением

$$\alpha_K = 8 \cdot 10^3 \lambda_{\text{eff}} \left(\frac{kP_p}{3\sigma_B} \right)^{0.86}, \quad (10)$$

где

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{2\lambda_1\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$$

— эффективная теплопроводность контакта (λ_1 и λ_2 — коэффициенты теплопроводности контактирующих материалов), P_p — внешнее давление на фольгу в зоне контакта, σ_B — предел прочности более пластичного из контактирующих материалов (в нашем случае — фольги), k — коэффициент, учитывающий чистоту обработки контактирующих поверхностей. При записи соотношения (7) полагалось, что внешнее давление $P = 10^5 \text{ Pa}$.

В проведенных нами исследованиях с рассмотренным типом ОР основные потери электронного пучка происходят именно в опорной решетке, а не в фольге. При коэффициенте поглощения фольги $\Phi_a < 0.2$ его величина, как видно из (8) и (9), слабо влияет на величину температурных перепадов по длине ребра ОР и в канале охлаждения.

На величину двух других составляющих общего температурного перепада определяющее влияние оказывает коэффициент теплопроводности фольги, значения которого для алюминиевой и титановой фольг отличаются почти на порядок.

На рис. 9 показаны зависимости $\Delta T_F = f(U_0)$, построенные по (6) для алюминиевой ($30 \mu\text{m}$) и титановой ($10 \mu\text{m}$) фольг при умеренных ($j_0 = 100 \mu\text{A/cm}^2$)

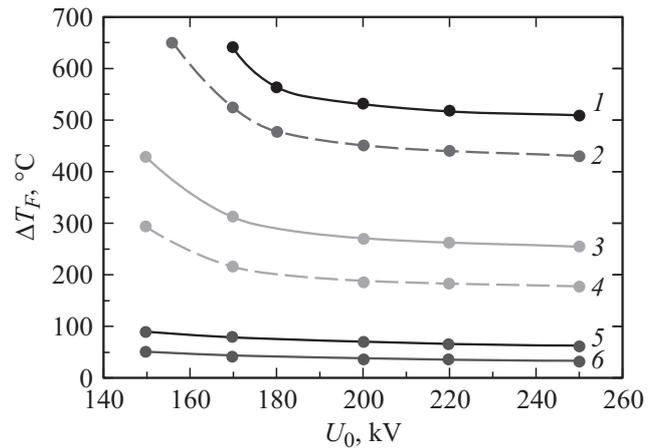


Рис. 9. Зависимость перепада температур „центр ячейки–ребро“ для алюминиевых и титановых фольг от ускоряющего напряжения: 1 — Ti, $200 \mu\text{A/cm}^2$; 2 — Ti, $200 \mu\text{A/cm}^2$ с учетом теплообмена со средой; 3 — Ti, $100 \mu\text{A/cm}^2$; 4 — Ti, $100 \mu\text{A/cm}^2$ с учетом теплообмена со средой; 5 — Al, $200 \mu\text{A/cm}^2$; 6 — Al, $100 \mu\text{A/cm}^2$.

и высоких ($j_0 = 200 \text{ A/cm}^2$) плотностях тока пучка и ширине щели $d = 6 \text{ mm}$. Кривые, показанные на рисунке штрихами, построены для титановой фольги с учетом вклада теплообмена фольги с окружающей средой; мощность, поглощаемая фольгой, уменьшалась на величину, которую способна рассеять фольга при температуре 350°C .

Как видно из рисунка, перегрев алюминиевой фольги имеет умеренные значения даже при высокой плотности тока, например, при $j_0 = 200 \mu\text{A/cm}^2$ и $U_0 = 200 \text{ kV}$ перепад между центром и краем фольги в ячейке составляет $\Delta T_F = 68^\circ$. При этих же условиях остальные слагаемые (3), рассчитанные по соответствующим выражениям, имеют следующие значения: $\Delta T_K = 12$, $\Delta T_P = 13$, $\Delta T_X = 24^\circ$. С учетом этого при температуре охлаждающей воды $T_0 = 20^\circ\text{C}$ расчетное значение максимальной температуры фольги, определяемой соотношением (3), составляет $T_F^{\text{max}} = 137^\circ\text{C}$, т.е. находится на уровне предельно допустимой.

Результаты расчетов титановой фольги показывают, что при высоких плотностях тока пучка ($j_0 = 200 \mu\text{A/cm}^2$) ее нагрев недопустимо высок, что, по нашему мнению, и обуславливает малое время жизни титановой фольги в проведенных экспериментах.

Таким образом, результаты наших расчетных и экспериментальных исследований показывают, что, несмотря на значительно более высокие значения временного сопротивления разрыву и допустимой температуры титановой фольги при работе с высокими плотностями выведенного тока электронного пучка ($\sim 100 \mu\text{A/cm}^2$), в широкоапертурных низкоэнергетичных ускорителях фольги из алюминиевых сплавов являются предпочтительными.

Список литературы

- [1] www.splav-kharkov.com
- [2] *Никишкин В.И.* Разработка и исследование устройств вывода электронных ускорителей со сканирующим пучком. Дис. на соискание ученой степени канд. тех. наук. Л.: НИИЭФА, 1982 г. 197 с.
- [3] *Seltzer S.M., Berger M.J.* // NIM. 1974. Vol. 119. P. 157–179.
- [4] *Косоголов С.Л.* // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 7. С. 115.
- [5] *Баранов Г.А., Бодакин Л.В., Гурашвили В.А.* и др. // ПТЭ. 2013. № 1. С. 81–85.
- [6] *Аброян М.А., Зуев Ю.В., Косоголов С.Л., Шведюк В.Я.* // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 8. С. 98.
- [7] *Юдаев Б.Н.* Теплопередача: Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. школа, 1981. 319 с.
- [8] *Миллер В.С.* Контактный теплообмен в элементах высокотемпературных машин. Киев: Наукова думка, 1966. 164 с.
- [9] *Шлыков Ю.П., Ганин Е.А., Царевский С.Н.* Контактное термическое сопротивление. М.: Энергия, 1977. 328 с.