

НИИЭФА П-К-0630
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ
им. Д.В.ЕФРЕМОВА



М.А.Аброян, Т.И.Макаренко,
И.Л.Токмаков

НАПРЯЖЕНИЯ НА ФОЛЬГЕ ВЫВОДНОГО
УСТРОЙСТВА УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ

Алроян М.А., Макаренко Т.И., Токмаков И.Л. Напряжения на фольге выводного устройства ускорителя электронов. Препринт К-0630. Л., НИИЭФА, 1983, 9 стр., с ил., цена 7 к.

В работе приведена оценка напряжений на фольге выводного устройства ускорителя электронов с учетом вкладов термического расширения и концентрации напряжений на включениях.

Проведена оптимизация параметров опорной решетки выводного устройства ускорителя электронов и выбора материала фольги для пучка ускоренных электронов с высокой плотностью тока.

Предлагается использовать опорную решетку с круглыми ячейками и фольги группы $Al-Mg$. Для оценки величины коэффициента концентрации напряжений на фазовых включениях, образующихся в материале фольги при облучении, предложена простая формула, пригодная для инженерных расчетов.

С Научно-исследовательский институт
электрофизической аппаратуры
им. Д.В.Фремова (НИИЭФА), 1983 г.

Выводное устройство является одним из важнейших узлов ускорителя электронов.

По данным лаборатории надежности и качества, наиболее частой причиной отказа высоковольтного ускорителя является выход из строя выводного устройства, вызванный разрушением фольги.

По имеющимся оценкам [1], количество патентов и авторских свидетельств, посвященных устройствам формирования и вывода пучка ускоренных электронов, существенно превышает число патентов и авторских свидетельств, посвященных другим узлам ускорителей.

Выводное устройство отделяет вакуумируемый объем ускорительного тракта от атмосферы. Оно состоит из опорной решетки, размещенной в гнезде фланца вакуумной камеры, фольги, перекрывающей опорную решетку и вакуумно-плотно закрепленной на решетке либо фланце камеры с помощью вакуумных уплотнений, прижимного фланца и элементов крепления. Фольга и опорная решетка обычно охлаждаются.

Применяемые для поддержки фольги опорные решетки снижают коэффициент геометрической прозрачности выводного устройства:

$$k_s = S_0 / S_{\Sigma} \quad (1)$$

где S_{Σ} - полная площадь окна; S_0 - площадь ячеек, прозрачная для электронов пучка. Ячейки обычно бывают круглыми либо удлиненными. Во втором случае

$$k_s = b / (b + \Delta), \quad (2)$$

где b - ширина ячейки; Δ - ширина перемычки.

В случае плотно упакованных круглых ячеек коэффициент геометрической прозрачности (рис.1)

$$k_s = \frac{\pi d^2}{2\sqrt{3}(d + \Delta)^2}, \quad (3)$$

где d - диаметр ячейки.

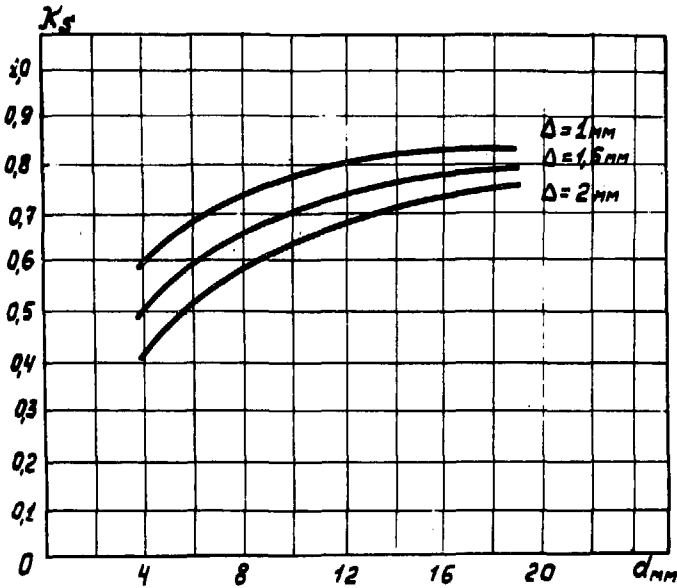


Рис. 1. Коэффициент геометрической прозрачности (опорная решетка с круглыми отверстиями)

При сбалансированном охлаждении и равномерном распределении плотности тока пучка по площади выпускного окна фольга разрушается без следов оплавления и цветов побежалости — трещиной. Разрушение происходит при превышении действующим в материале фольги напряжением σ_f некоторой величины σ_{max} — напряжения, допустимого для материала фольги в условиях эксплуатации.

При эксплуатации ускорителя напряжения в материале фольги σ_f складываются из начальных напряжений σ_0 , обусловленных перепадом давления вакуум — атмосфера, и из напряжений σ_T , обусловленных нагревом элемента фольги, фактически жестко закрепленного по периметру ячейки опорной решетки и оттого деформирующегося при нагревании.

Напряжения σ_0 уменьшаются с уменьшением характерного размера ячейки, но одновременно уменьшается и коэффициент геометрической прозрачности окна. Максимальные значения напряжений рассчитаны для круглой ячейки по формуле

$$\sigma_0 = \rho \left[\frac{(4f_0^2 + d^2)^2}{16f_0 d^2 \delta_0} + 0,25 \right], \quad (4)$$

где $f_0 = 0,662 \delta_0 (P/E)^{1/3} (d/2\delta_0)^{1/3}$ - стрела прогиба элемента фольги; P - внешняя нагрузка (1 кг/см²); δ_0 - толщина фольги; E - модуль упругости материала фольги. Максимальные значения напряжений σ_0 для удлиненной ячейки рассчитаны по формуле

$$\sigma_0 = 0,423 \left[E (P\delta)^2 / (2\delta_0)^2 \right]^{1/3} \quad (5)$$

Значения начальных напряжений σ_0 и коэффициента геометрической прозрачности k_s для удлиненных и круглых ячеек приведены в табл. 1, 2 соответственно. Ширина перемычки в обоих случаях $\Delta = 1,5$ мм. Расчет проведен для алюминиевой фольги толщиной 30 мкм.

Таблица 1

Коэффициент геометрической прозрачности k_s и максимальные начальные напряжения σ_0 (опорная решетка с удлиненными ячейками, ширина перемычки $\Delta = 1,5$ мм)

b мм	4	5	6	7	8	9	10
k_s	0,73	0,77	0,8	0,82	0,84	0,86	0,87
σ_0 кг/мм ²	7,8	8,8	10,1	11,4	12,5	13,6	15,1

Таблица 2

Значения k_s и σ_0 (ячейки круглые)

d мм	6	8	10	12	14	16	18	20
k_s	0,57	0,63	0,67	0,74	0,75	0,77	0,78	0,8
σ_0 кг/мм ²	4,2	6,3	7,2	8,2	9,1	10,6	10,8	11,6

Уменьшение ширины ребра Δ увеличивает величину k_s . При конструировании опорной решетки, из условий оптимальности, допустимы сравнительно небольшие вариации ширины ребра - 0,5-2 мм и ширины (диаметра) ячейки - 5-14 мм. Для обеспечения щадящего режима эксплуатации фольги на удлиненных ячейках рекомендуем выполнение условия $b/\Delta \leq 5$, откуда предпочтительным является коэффициент геометрической прозрачности $k_s \leq 0,833$. При выборе формы ячеек следует учитывать степень однородности распределения напряжений по контуру периметра элемента фольги, перекрывающего ячейку опорной решетки. Например, в точках сопря-

жения сторон удлиненной ячейки действительные напряжения превышают напряжения, рассчитываемые по формулам (5). Круглые ячейки предпочтительнее уже из соображений симметрии. Очевидно, что к.п.д. ускорителя (коэффициент использования пучка) определяется коэффициентом геометрической прозрачности опорной решетки. Поскольку k_s для удлиненных ячеек выше, чем для решеток с круглыми ячейками, в промышленности обычно применяют опорные решетки с удлиненными ячейками.

В некоторых технологических процессах, требующих вывода тока пучка высоких плотностей, задаваемое время наработки на отказ, обусловленное, например, длительностью цикла обработки облучением, может рассматриваться как параметр, более важный, чем к.п.д. ускорителя. В настоящее время предпочтение отдаем опорным решеткам с круглыми ячейками. Конструктивно опорная решетка выполняется из набора тонкостенных труб, размещенных в соосных отверстиях двух пластин и герметично соединенных по периметру их сопряжения, причем зазоры между внешними диаметрами труб образуют каналы для прохождения хладагента. Кратчайшее расстояние между внутренними диаметрами труб есть ширина перемычки

Δ опорной решетки. В настоящее время отработана технология изготовления опорных решеток с круглыми ячейками диаметром 6–12 мм при $\Delta = 1,5$ мм с охлаждением каждой ячейки. Для них $k_s = 0,57-0,74$. Экспериментально проверена работоспособность фольг толщиной 30 мкм из твердых алюминиевых сплавов на опорных решетках с круглыми ячейками до значений $d = 16$ мм. При этом $\Delta = 1,5$ мм.

Расчеты показывают, что в случае опорных решеток с круглыми ячейками ($d = 6$ мм, $\Delta = 1,5$ мм) на фольге из твердых алюминиевых сплавов толщиной 30 мкм термически стационарный режим достигается для электронов с энергией 200 кэВ и выше при плотностях тока $\sim 0,4$ ма/см². Расход воды на канал охлаждения 10 г/с. Максимальная длина канала 200 мм. Внутреннее сечение канала (в минимальной области) 0,5–6 мм². При этом $k_s = 0,575$. При тех же параметрах пучка для удлиненных ячеек термически стационарный режим возможен при $d = 5-6$ мм и $\Delta = 1,5$ мм. Расход воды на канал длиной 100 мм 12–14 г/с. Сечение канала 0,5–8 мм². Коэффициент геометрической прозрачности $k_s = 0,57-0,75$.

Термические напряжения, возникающие в элементе фольги, можно оценить как

$$\sigma_T \approx E \alpha T, \quad (6)$$

где α - коэффициент термического расширения; E - модуль упругости; T - нагрев фольги.

Значения температуры на фольге $T(t)$ зависят от величины вкладываемой мощности и эффективности систем охлаждения. В общем виде задача решена в [2,3]. При прочих равных условиях термонапряжения в фольгах из алюминиевых сплавов различны из-за разницы в значениях α . Модуль упругости для большинства алюминиевых сплавов в интервале температур 100-200°C составляет 0,9 и в интервале 200-300°C 0,8 от модуля при 20°C. В табл.3 приведены термонапряжения, оцениваемые по (6) для фольги Д-16 ($\alpha = 12,9 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$) и АМГ-5 ($\alpha = 23,9 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$) в функции от температуры.

Таблица 3

Термонапряжения (оценка)

T °C		20	50	100	150	200
σ_T кг/мм 2	Д-16	1,81	3,61	9,03	13,54	18,06
	АМГ-5	3,35	8,36	16,7	25,1	33,46

Предел прочности фольги зависит от температуры. Соответствующие зависимости иллюстрирует рис.2 [4]. Значения $\sigma_f = \sigma_o + \sigma_T$ и $\sigma_g(T)$ - пределы прочности при различных температурах сведены в табл.4.

Таблица 4

Напряжения σ_f и предел прочности в функции от температуры (ячейки круглые)

T °C		20	50	100	150	200	
$\sigma_g(T)$ кг/мм 2	Д-16	28	26	22	20	17	
	АМГ-5	42	40	38	36	35	
σ_T кг/мм 2	d = 6 мм	Д-16	6	8,7	13,3	17,8	22,3
		АМГ-5	7,6	12,6	20,9	29,3	37,7
	d = 10 мм	Д-16	9	11,8	16,3	20,8	25,3
		АМГ-5	10,6	15,6	24	32,3	40,7

Видно, что фольги группы АМГ являются более предпочтительными, чем дюрал.

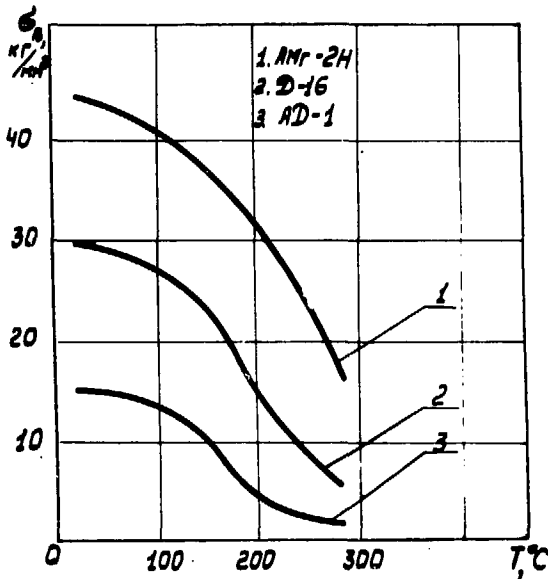


Рис. 2. Зависимость предела прочности от температуры $\sigma_B = \sigma_B(T)$ для алюминиевых сплавов

При изучении торцевых шлифов фольги АМг видно, что в результате облучения уменьшается размер зерна, образуются фазовые включения, наблюдается межкристаллитная коррозия (преимущественно по границам зерен). На облученной фольге АМг-2 толщиной 50 мкм в плоскостях, прилегающих к поверхностям, обнаружены плоские нитеобразные скопления фазы $Mn Al_6$, а в средней плоскости фольги — скопления фазы Mg_2Si . Фазовые включения образуются в фольге в

процессе эксплуатации ускорителя. Их размеры, количество, форма зависят от химического состава материала, параметров пучка, времени облучения и режима предварительной обработки, проводившейся нами с целью упрочнения фольги.

Фазовые включения являются концентраторами напряжений. Оценим величину напряжений, действующих в случае наличия концентраторов. Этому вопросу посвящена обширная библиография, приведенная, в частности, в [5]. По определению, коэффициент концентрации напряжений

$$k_{st} = \sigma / \sigma_f \quad (7)$$

где σ — действительное напряжение на концентраторе; σ_f — напряжение в отсутствие концентраторов. Из литературы следует, что значение коэффициента концентрации напряжений зависит от формы концентратора, геометрического фактора (места расположения в образце), от количества концентраторов и отношения модуля упругости материала концентратора к модулю упругости основного материала. При прочих равных условиях коэффициент концентрации максимален, если включение не заполнено (концентрация на порах).

Вопрос о концентрации напряжений в фольгах выводных устройств на фазовых включениях, образующихся при облучении, в литературе не рассмотрен. Поскольку модуль упругости фазового включения не всегда известен, оценим, в линейном приближении, максимальную величину коэффициента концентрации, считая фазовые включения круглыми и незаполненными полостями. Фольга в выводном устройстве находится в напряженном состоянии. Пусть F - действующая в материале фольги растягивающая сила, S_f - сечение фольги. Тогда

$$\sigma_f = F / S_f . \quad (8)$$

Если D - диаметр полости, сечение S_f уменьшается на величину $\pi D^2/4$. В случае появления концентратора напряжение σ_f увеличивается и действительное напряжение

$$\sigma = F / \left(S_f - \frac{\pi D^2}{4} \right) . \quad (9)$$

Собственно добавка напряжений тогда равна

$$\sigma - \sigma_f = F / \left(S_f - \frac{\pi D^2}{4} \right) - \sigma_f . \quad (10)$$

В принятом приближении рассматриваем площадь сечения S_f фольги как элемент поперечного сечения с высотой, равной толщине фольги δ_0 , и шириной D .

Разделим и умножим правую часть (10) на σ_f . Тогда, с учетом (7), (8), получим для верхней оценки коэффициента концентрации напряжений в фольге выражение

$$k_{st} = 4\delta_0 / (4\delta_0 - \pi D) . \quad (11)$$

Значения коэффициента концентрации напряжений в функции от диаметра D для фольг толщиной 30 и 50 мкм даны в табл.5.

Таблица 5

Коэффициент концентрации напряжений

D мкм	1	2	4	6	8	10
k_{st} 50 мкм	1,02	1,03	1,07	1,10	1,14	1,19
30 мкм	1,03	1,06	1,12	1,19	1,27	1,36

Максимальные значения локальных напряжений в фольге, с учетом концентраторов, есть

$$\sigma = (\sigma_0 + \sigma_T) k_{st}. \quad (12)$$

Условие неразрушаемости фольги можно представить в виде

$$(\sigma_0 + \sigma_T) k_{st} < \sigma_B(T). \quad (13)$$

Размер фазовых включений есть функция времени облучения $D = D(t)$. В случае нестационарного термического режима температура фольги $T = T(j, t)$. Таким образом, решение (13) относительно времени дает значение ресурса фольги выводного устройства.

На основании проведенной работы можно сделать следующие выводы:

1. Проведенный расчет механических и термических напряжений, возникающих в материале фольги выводного устройства ускорителя электронов при его эксплуатации, показал, что наиболее работоспособны фольги группы **Al-Mg**.

2. Для промышленных ускорителей в случае удлиненных ячеек опорной решетки рекомендуется $k_s \leq 0,833$, в случае круглых при $k_s = 0,575$ возможен термически стационарный режим работы выводного устройства. В тех технологических процессах, в которых требуется вывод пучка ускоренных электронов с высокой плотностью тока, предпочтение отдается опорным решеткам с круглыми ячейками.

3. Для оценки величины коэффициента концентрации напряжений на фазовых включениях, образующихся в материале фольги при облучении, предложена простая формула, пригодная для инженерных расчетов.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Дмитриев С.П., Никишкин В.И., Свиньин М.П., Иванов А.С. Выпускные окна ускорителей электронов: Обзор Од-37. - Л.: НИИЭФА, 1980, с.4.
2. Федоров В.И. Электронные пушки с выводом широкого потока в среду с повышенным давлением: Реферат дисс.канд.техн. наук. - М.: ВЭИ, 1980.
3. Biricikoglu V. Heat transfer problems in CW-gun windows. - AIAA - paper N 74-687, 1974.
4. Алюминиевые сплавы. Промышленные деформируемые, слепочные и литейные алюминиевые сплавы: Справочное руководство под общ. ред.Ф.И.Квасова и И.Н.Фридляндера. - М.: Металлургия, 1972, с.428, 432.
5. Петерсон Р. Коэффициенты концентрации напряжений. - М.: Мир, 1977.

М.А.Аброян, Т.И.Макаренко, И.Л.Токмаков

НАПРЯЖЕНИЯ НА ФОЛЫЕ ВЫВОДНОГО УСТРОЙСТВА
УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ

Заказ № 65/701. Рукопись поступила на издание 14/УП 1983 г.
Формат бумаги 60x90/16. Уч.-изд.л.0,5. Отпечатано 130 экз.
Ротапринт НИИЭФА. Цена 7 к. Индекс 3624. Т-23945 22/ХП 1983г.

Ответственная за выпуск В.Л.Гусева