

04;12

Характеристики статистического распределения тока, пропускаемого катодным пятном вакуумной дуги, в магнитных полях различной ориентации

© К.К. Забелло, А.А. Логачёв, А.М. Чалый, С.М. Школьник

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
104021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: zabellok@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 15 апреля 2008 г.)

Исследовано воздействие однородных магнитных полей различной ориентации на катодную привязку слаботочной вакуумной дуги с электродами из бескислородной меди и композиции CuCr30. Обнаружено, что при фиксированном токе количество катодных пятен в привязке дуги распределено по нормальному закону во всем исследованном диапазоне изменения амплитуды вектора индукции магнитного поля \mathbf{B} и угла его наклона относительно нормали к поверхности катода α . Параметры распределения зависят от материала катода и магнитного поля. Зависимость от магнитного поля существенно проявляется лишь при превышении некоторого критического значения угла α^* , которое составляет $\alpha^* \approx 30^\circ$ (материал катода — бескислородная медь) и $\alpha^* \approx 45^\circ$ (материал электродов — CuCr30). При $\alpha > \alpha^*$ появляется сильная зависимость параметров распределения от α , но зависимость от \mathbf{B} остается слабой. Лишь при $\alpha \rightarrow \pi/2$ амплитуда поля оказывает сильное влияние на параметры распределения. Полученные результаты позволили определить статистические характеристики распределения среднего тока, пропускаемого катодным пятном, в магнитных полях различной ориентации. Обнаруженные закономерности позволили объяснить особенности структуры катодной привязки сильноточной вакуумной дуги, стабилизированной внешним аксиальным магнитным полем.

PACS: 52.80.Vp

Введение

Привязка к катоду импульсного дугового разряда в вакууме реализуется в виде отдельных нестационарных эрозионных пятен, называемых катодными пятнами (КП). Характеристики КП зависят от материала катода, состояния его поверхности и параметров внешнего магнитного поля, под действием которого находится дуга. Наиболее изучены характеристики КП в коротких ($h \sim 10^{-1} - 1$ см) слаботочных ($I \sim 10 - 10^2$ А) дугах, горевших на чистых катодах, т.е. катодах, с поверхности которых с помощью тренировки дуговым разрядом удалены следы окисных пленок и диэлектрических включений. Однако подавляющее большинство исследований выполнено в случае свободно горящих дуг и дуг, находившихся под действием магнитного поля, ориентированного параллельно поверхности катода (тангенциального поля) [1,2]. Работы, в которых изучалось воздействие на КП нормального к поверхности катода магнитного поля, немногочисленны [3–6]. Воздействие на КП магнитного поля, наклоненного под тем или иным углом к поверхности катода, до последнего времени оставалось неизученным.

Между тем такие исследования представляют интерес не только для физики КП и истекающей из него плазменной струи, но и для физики сильноточной вакуумной дуги, стабилизированной внешним аксиальным магнитным полем, которая в настоящее время интенсивно исследуется в связи с ее использованием в вакуумной коммутационной аппаратуре [7,8]. Катодная

привязка такой дуги состоит из множества КП более или менее однородно распределенных по катоду [9]. КП находятся под действием результирующего магнитного поля, являющегося суммой внешнего аксиального поля и собственного поля дугового тока. Внешнее аксиальное поле в интересных для практики случаях распределено по поверхности катода существенно неоднородно. Собственное поле дуги изменяется от нуля в приосевой области до максимума на периферии привязки. Поэтому КП, локализованные в различных местах на поверхности катода, находятся под действием полей, амплитуды и углы наклона вектора индукции которых относительно нормали к поверхности могут различаться весьма значительно.

Одним из основных параметров, характеризующих КП, является пропускаемый им средний ток и зависимость этого тока от магнитного поля. В [10] было

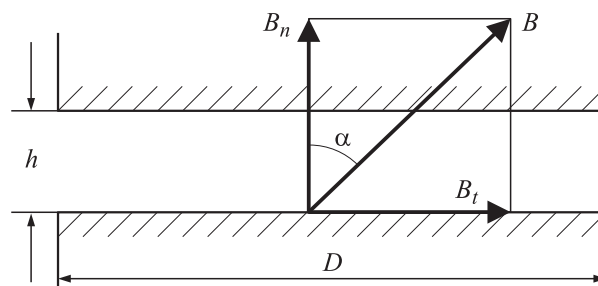


Рис. 1. Геометрия разрядного узла и ориентация внешнего магнитного поля, накладываемого на дугу.

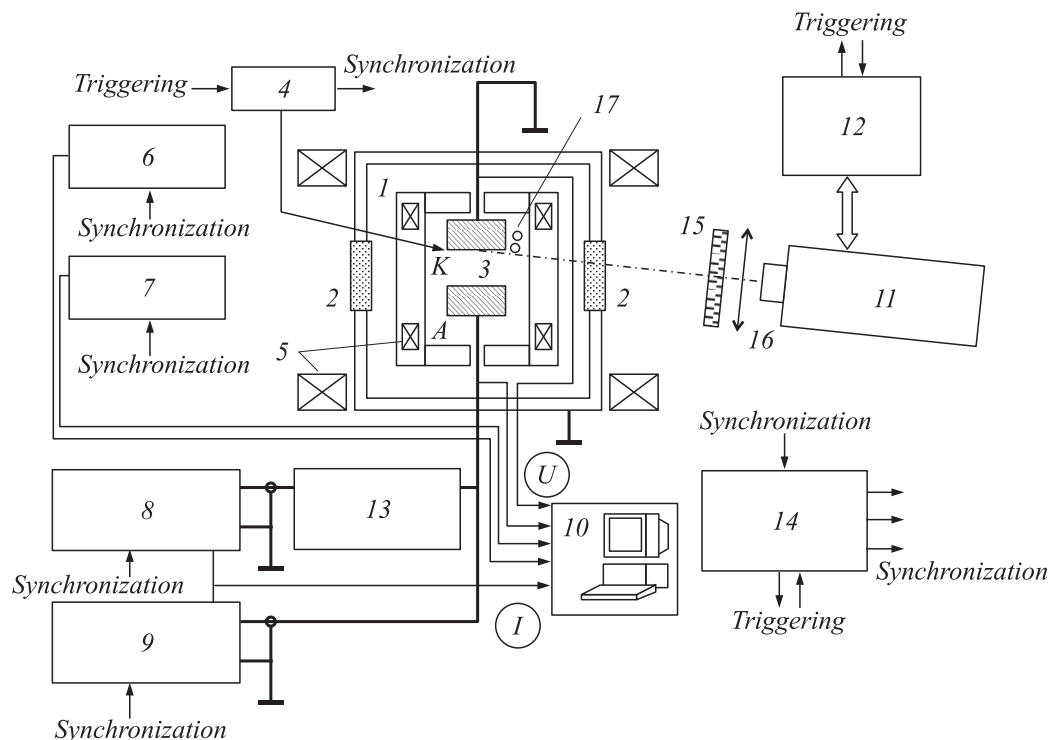


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки.

показано, что в свободно горящей дуге количество КП при некотором фиксированном токе распределено по нормальному закону и получены параметры этого распределения для ряда катодных материалов. В [11] была исследована зависимость среднего тока, пропускаемого КП, от внешнего тангенциального магнитного поля для катодов из меди и молибдена.

Целью настоящей работы являлось исследование влияния внешнего однородного магнитного поля, наклоненного под углом α ($0 \leq \alpha \leq \pi/2$) относительно нормали к поверхности катода (рис. 1), на распределение количества КП в катодной привязке вакуумной дуги при фиксированном токе. Результаты такого исследования позволяют определить статистические характеристики распределения среднего тока, пропускаемого КП вакуумной дуги, в зависимости от амплитуды вектора индукции магнитного поля и его ориентации относительно поверхности катода.

Работа является продолжением исследований воздействия на слаботочную вакуумную дугу в целом и на ее катодную привязку однородных магнитных полей, наклоненных к плоскости катода [12,13].

Экспериментальная установка и методика измерений

Блок-схема экспериментальной установки показана на рис. 2.

Измерения проводились в разборной вакуумной камере 1 при постоянной откачке ($p \approx 10^{-4}$ Па). Камера была

снабжена смотровыми окнами 2. Исследовались дуги фиксированной длины $h = 4$ мм. Использовались торцевые цилиндрические электроды 3 диаметром $D = 30$ мм из бескислородной меди и композиции CuCr30. Разряд поджигался на поверхности заземленного катода с помощью поджигового электрода, который отрывался от катода индукционно-динамическим приводом 4.

Две пары катушек Гельмгольца обеспечивали возможность генерации внешних однородных нормальных к рабочей торцевой поверхности катода $B_n \leq 0.35$ Т и тангенциальных (параллельных поверхности) $B_t \leq 0.4$ Т магнитных полей 5. Катушки, создающие нормальное поле, были одеты на вакуумную камеру. Катушки, создающие тангенциальное поле, размещались внутри камеры и были намотаны на жестко закрепленном тefлоновом каркасе. Каждая пара катушек создавала однородное магнитное поле в центре камеры в области размером более 40 мм.

Обе пары катушек питались от независимых источников 6, 7, генерировавших импульсы тока с плато большой длительности. Постоянство тока на плато обеспечивалось с точностью не хуже 2%. Питание катушек и исследуемого разряда синхронизировалось таким образом, чтобы разряд поджигался и горел в установившемся однородном поле.

Магнитные поля, генерируемые в межэлектродном промежутке, измерялись в открытой камере до начала дуговых испытаний с помощью калиброванного датчика Холла с чувствительностью 2.5 мВ/Г. Датчик вводился в промежуток через смотровое окно.

Дуга питалась прямоугольными импульсами тока амплитудой до 400 А и длительностью $\tau \approx 3$ ms (источник тока 8). Ток регулировался безиндуктивным балластным сопротивлением 13. В режимах с малыми значениями B_z для того, чтобы „оторвать“ привязку дуги от места поджига (места касания поджиговым электродом катода), использовался дополнительный источник тока ($I \sim 1$ кА, $\tau \sim 0.5$ ms), который включался параллельно источнику рабочего тока. За время протекания сильного импульса пятна собственным магнитным полем разряда „расталкивались“ на достаточное расстояние от поджига. Измерения проводились после окончания дополнительного импульса.

Эксперименты начинались с обработки поверхности катода серией чистящих импульсов. Отдельный источник питания для чистящих импульсов 9 обеспечивал протекание тока ~ 1 кА в течение 2 ms. Далее в процессе измерений каждому рабочему импульсу предшествовал чистящий. Интервал между рабочим импульсом и импульсом для очистки составлял ~ 10 s.

Электрические измерения проводились с дискретизацией 1μ s с помощью четырехканального осциллографа TDS 3014B. Осциллограф был снабжен дифференциальным пробником Tektronix P5200. Результаты измерений сохранялись в компьютере 10.

Скоростная фотосъемка дуги проводилась через одно из смотровых окон с помощью камеры ВФУ-1 11, которая позволяла получить 60 последовательных изображений дуги за одну съемку. Время экспозиции кадра было выбрано равным 25μ s (длительность съемки ≈ 1.5 ms). Съемка проводилась под углом $\sim 15^\circ$ к поверхности катода, чтобы иметь возможность проанализировать структуру катодной привязки дуги. Результаты съемки вводились в компьютер с помощью пленочного сканера HP S20.

Размер изображения КП составлял 4–5 пикселей (1 пиксел ≈ 0.067 mm), что определялось в основном аппаратной функцией ВФУ. По нашим оценкам, КП могли быть пространственно разрешены, если расстояние между ними было не меньше 0.25 mm.

Запуск установки осуществлялся через блок управления ВФУ-1 12 с помощью устройства синхронизации 14. Для фотографирования катода использовались специально подобранные цветные фильтры 15 и линза для макросъемки 16. Для определения положения КП на катоде использовались опорные микролампочки 17.

Результаты измерений и обсуждение

Фотографирование дуги проводилось при различных комбинациях значений нормальной и тангенциальной компонент магнитного поля. Ток разряда для каждого значения результирующего поля и для обоих катодных материалов выбирался таким, чтобы на катоде одновременно существовало несколько КП. На рис. 3 в качестве примера приведен фрагмент одного из кадров скоростной фотосъемки дуги.



Рис. 3. Фрагмент кадра скоростной фотосъемки. $I = 150$ А, $B_n = 0.35$ Т, $B_z = 0.2$ Т, экспозиция 25μ s, $t = 0.8$ ms от поджига дуги. Материал электродов CuCr30.

Используя литературные данные, обсудим, какие объекты разрешаются на катоде с учетом пространственного и временного разрешения, обеспечиваемого в наших экспериментах.

В соответствии с современной точкой зрения существуют, по крайней мере, три уровня в иерархии катодных привязок слаботочной вакуумной дуги [14]. Для их обозначения используются разные термины. Будем использовать термин „макропятно“ (macrospot) для обозначения объектов высшего уровня (по току и размеру), термин „пятно“ (spot) для обозначения объектов среднего уровня и термин „ячейка“ (cell) для обозначения объектов нижнего уровня. „Макропятно“ является ассоциацией „пятен“. В свою очередь, „пятна“ состоят из „ячеек“. На медном электроде характерные размеры „макропятна“, „пятна“ и „ячейки“ составляют $(1-3) \cdot 10^{-2}$, $(1-2) \cdot 10^{-3}$ и $< 5 \cdot 10^{-4}$ cm соответственно. В соответствии с иерархией по току и размеру строится иерархия по характерным временам жизни объектов. Шумы напряжения и их параметры (в первую очередь, частота) связаны с процессами возникновения и угасания объектов на катоде, которые принадлежат к различным уровням иерархии. Нижнему и среднему уровню соответствует частота от $\sim 10^6$ до $\sim 10^8$ Hz, высшему уровню — до $\sim 10^5$ Hz.

В разрядах достаточной длительности ($\sim 10^{-4}$ s и более) с относительно большим током ($\sim 10^2$ А и более), которые и рассматриваются в настоящей работе, наиболее вероятно существование отдельных объектов верхнего уровня („макропятна“). Пространственное и временное разрешение в наших экспериментах достаточно для анализа процессов на уровне „макропятен“. В дальнейшем для простоты будем пользоваться термином „катодное пятно“ или КП для обозначения всех регистрируемых на катоде объектов.

После обработки фотографий количество КП на каждом кадре пересчитывалось. Пятном считался светящийся объект с одним максимумом интенсивности. Объекты с двумя максимумами интенсивности засчитывались как два пятна. Далее рассчитывалось распределение количества КП. При расчете использовались все кадры съемки, на которых КП располагались на достаточном (≥ 1 mm) расстоянии от поджигового электрода. Количество съе-

Таблица 1. Параметры аппроксимаций распределения количества катодных пятен. Материал электродов CuCr30, $I = 65$ (***);
90 (**), 150 А (*)

V, T	V_n, T				
	0	0.05	0.1	0.2	0.35
0	*	***			
	$n_c = 7.8, \sigma = 0.7$	$n_c = 3.4, \sigma = 1.0$			
0.01	*				
	$n_c = 5.9, \sigma = 1.3$				
0.02	*				
	$n_c = 4.1, \sigma = 0.7$				
0.03	*	*			
	$n_c = 2.5, \sigma = 0.6$	$n_c = 6.5, \sigma = 1.1$			
0.04	*				
	$n_c = 1.6, \sigma = 0.6$				
0.05		*	*	**	***
		$n_c = 4.9, \sigma = 1.1$	$n_c = 5.7, \sigma = 1.0$	$n_c = 3.4, \sigma = 1.1$	$n_c = 2.2, \sigma = 1.1$
0.1		*	*	*	*
		$n_c = 2.7, \sigma = 0.8$	$n_c = 4.8, \sigma = 1.3$	$n_c = 5.6, \sigma = 1.0$	$n_c = 5.9, \sigma = 0.8$
0.15		*	*	*	*
		$n_c = 1.7, \sigma = 0.4$	$n_c = 4.1, \sigma = 1.0$	$n_c = 5.6, \sigma = 0.9$	$n_c = 5.2, \sigma = 1.0$
0.2			*	*	*
			$n_c = 3.2, \sigma = 1.0$	$n_c = 4.0, \sigma = 0.6$	$n_c = 4.4, \sigma = 0.9$
0.25			*	*	***
			$n_c = 1.8, \sigma = 0.5$	$n_c = 3.6, \sigma = 1.0$	$n_c = 2.0, \sigma = 0.5$

Таблица 2. Параметры аппроксимаций распределения количества катодных пятен. Материал электродов Cu, $I = 150$ (**);
300 А (*)

V, T	V_n, T				
	0	0.05	0.1	0.2	0.35
0	*	*	*		
	$n_c = 4.5, \sigma = 0.8$	$n_c = 4.7, \sigma = 0.8$	$n_c = 4.5, \sigma = 0.8$		
0.01	**				
	$n_c = 2.3, \sigma = 0.5$				
0.02	**				
	$n_c = 2.2, \sigma = 0.5$				
0.03		*	*		
		$n_c = 4.4, \sigma = 0.5$	$n_c = 3.9, \sigma = 0.5$		
0.04	**				
	$n_c = 1.6, \sigma = 0.8$				
0.05		*	*	*	
		$n_c = 3.6, \sigma = 0.4$	$n_c = 3.8, \sigma = 0.8$	$n_c = 3.7, \sigma = 0.6$	
0.08		*	*	*	
		$n_c = 3.2, \sigma = 0.5$	$n_c = 3.7, \sigma = 0.7$	$n_c = 3.9, \sigma = 0.6$	
0.1		*	*	*	*
		$n_c = 2.8, \sigma = 0.6$	$n_c = 3.1, \sigma = 0.7$	$n_c = 3.7, \sigma = 0.7$	$n_c = 3.2, \sigma = 0.7$
0.15			*	*	*
			$n_c = 2.5, \sigma = 0.5$	$n_c = 3.0, \sigma = 0.9$	$n_c = 3.1, \sigma = 0.6$
0.2				*	*
				$n_c = 2.5, \sigma = 0.5$	$n_c = 3.1, \sigma = 0.7$

мок (2–4) выбиралось таким, чтобы общее количество кадров было $\sim 10^2$ штук.

Результаты обработки фотографий показали, что распределения количества КП при фиксированном токе хорошо аппроксимируются нормальным распределением:

$$p(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \frac{-(n - n_c)^2}{2\sigma^2}, \quad (1)$$

где n — количество пятен; $p(n)$ — доля наблюдений с n пятнами; n_c , σ — параметры распределения (положение центра распределения и корень квадратный из дисперсии соответственно). Значения n_c и σ для каждого из режимов были получены по методу наименьших квадратов. Результаты, полученные при обработке экспериментов, приведены в табл. 1 и 2.

Используя переменные

$$x = \frac{n - n_c}{\sqrt{2}\sigma}, \quad (2)$$

$$y = p(n)\sigma\sqrt{2\pi}, \quad (3)$$

можно представить распределение в безразмерном виде

$$y = \exp(-x^2). \quad (4)$$

Такое представление позволяет свести результаты для различных режимов на один график (рис. 4). На рис. 4 показано, что во всех исследованных нами режимах горения дуги на обоих использованных материалах распределение количества пятен в катодной привязке при некотором фиксированном токе действительно хорошо описывается нормальным законом.

Для свободно горящих дуг на катоде из меди этот результат находится в согласии с результатом работы [10]. Для свободно горящих дуг на катоде из композиции CuCr30, а также дуг, находящихся под действием магнитного поля, подобные исследования ранее не проводились.

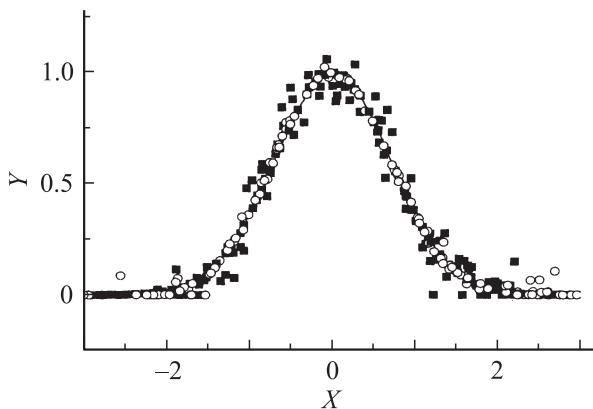


Рис. 4. Нормированная плотность распределения количества катодных пятен для всех исследованных режимов. Материал электродов CuCr30 (■); $I = 65, 90, 150$ А; $0 \leq B_n \leq 0.35$ Т; $0 \leq B_t \leq 0.25$ Т. Материал электродов Cu (○); $I = 150, 300$ А; $0 \leq B_n \leq 0.35$ Т; $0 \leq B_t \leq 0.2$ Т.

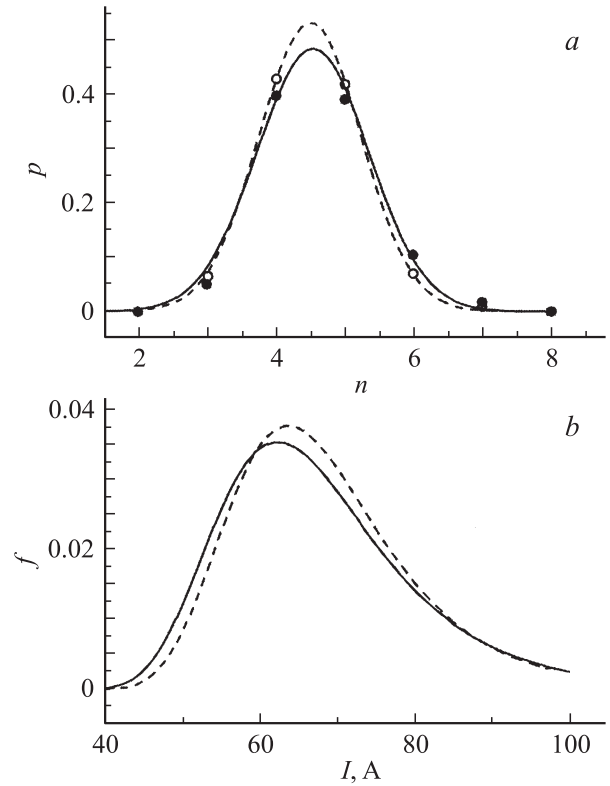


Рис. 5. Распределение количества КП (а) и распределение тока, пропускаемого КП (b) в дуге с медными электродами при токе $I = 300$ А. Точки — эксперимент, кривые — аппроксимации; • и сплошные кривые — $B_n = 0, B_t = 0$; ○ и штриховые кривые — $B_n = 0.1$ Т, $B_t = 0$.

Отметим, что хотя при наложении магнитного поля распределения для обоих материалов остаются нормальными, параметры распределений зависят от магнитного поля. Зависимость имеет сложный характер. Существует некоторый критический угол наклона α^* , внутри которого ($\alpha < \alpha^*$) зависимость от магнитного поля слабая. При превышении критического угла ($\alpha > \alpha^*$) проявляется сильная зависимость параметров распределения от угла наклона α , но не от амплитуды вектора поля $|B|$. Амплитуда магнитного поля начинает оказывать сильное влияние на распределения лишь при $\alpha \rightarrow \pi/2$ ($B_t/B_n \gg 1$). Общий характер зависимости от магнитного поля одинаков для обоих исследованных материалов, но значения критических углов α^* отличаются и составляют $\alpha^* \approx 45^\circ$ (материал электродов — CuCr30) и $\alpha^* \approx 30^\circ$ (материал катода — бескислородная медь).

На рис. 5, а–7, а приведены примеры результатов экспериментов и их аппроксимации нормальным распределением для обоих использованных в работе материалов, иллюстрирующие сказанное выше.

Используя аппроксимации распределения количества КП, можно получить распределение среднего тока, пропускаемого пятном $I_s = I/n$. Примеры таких распределений приведены на рис. 5, б–7, б.

Среднее по распределению значения I_s для свободно горящих дуг на катодах из медь-хромовой композиции CuCr30 и медных катодах и составляют 20 и 65 А соответственно. Результат, полученный в дугах с медным катодом, находится в хорошем согласии с литературными данными [10,11]. Данных для дуг с катодом из композиции CuCr30 в литературе ранее отсутствовали.

Представляет интерес, в том числе для исследований сильноточных вакуумных дуг, зависимость среднего по распределению значения I_s от магнитного поля, наложенного на дугу, представленные на рис. 8 и 9.

Рассмотрим эти рисунки. В начале остановимся на результатах, полученных при наложении на дугу магнитного поля, имеющего только тангенциальную компоненту ($\alpha = \pi/2$). Зависимость среднего по распределению значения I_s для дуги с медными электродами от V_t при $V_n = 0$ в наших экспериментах получилась отличной от опубликованной в [11]. Согласно [11], при $V_t \leq 0.1$ Т средний ток, пропускаемый КП, остается неизменным, и лишь начиная с $V_t > 0.1$ Т начинает линейно увеличиваться. Рис. 9 показывает, что в наших экспериментах увеличение I_s начинается при существенно меньших значениях магнитного поля. Можно предположить, что такое различие есть результат различия в условиях эксперимента. В [11] для фотографирования поверхности катода использовалась аналогичная по конструкции камера. Значит, временное и пространственное разрешение было таким, как в наших экспериментах, однако

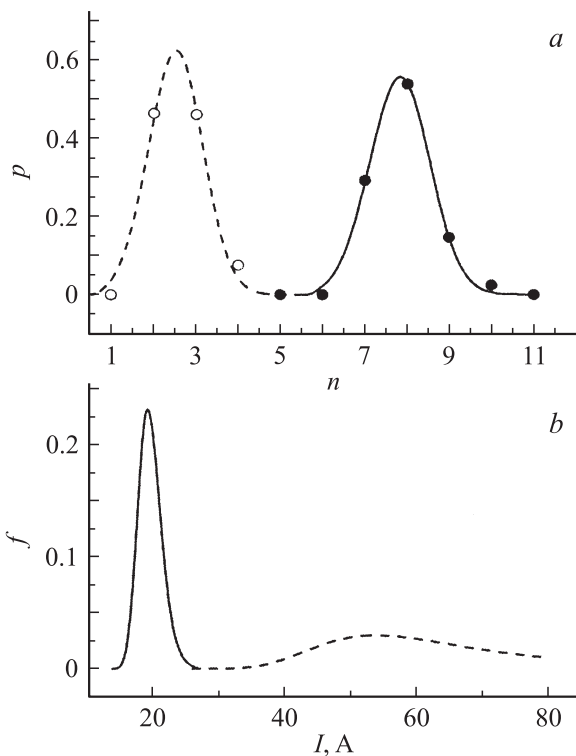


Рис. 6. Распределение количества КП (а) и распределение тока, пропускаемого КП (б) в дуге с электродами из композиции CuCr30 при токе $I = 150$ А. Точки — эксперимент, кривые — аппроксимации, ● и сплошные кривые — $V_n = 0$, $V_t = 0$; ○ и штриховые кривые — $V_n = 0$, $V_t = 0.03$ Т.

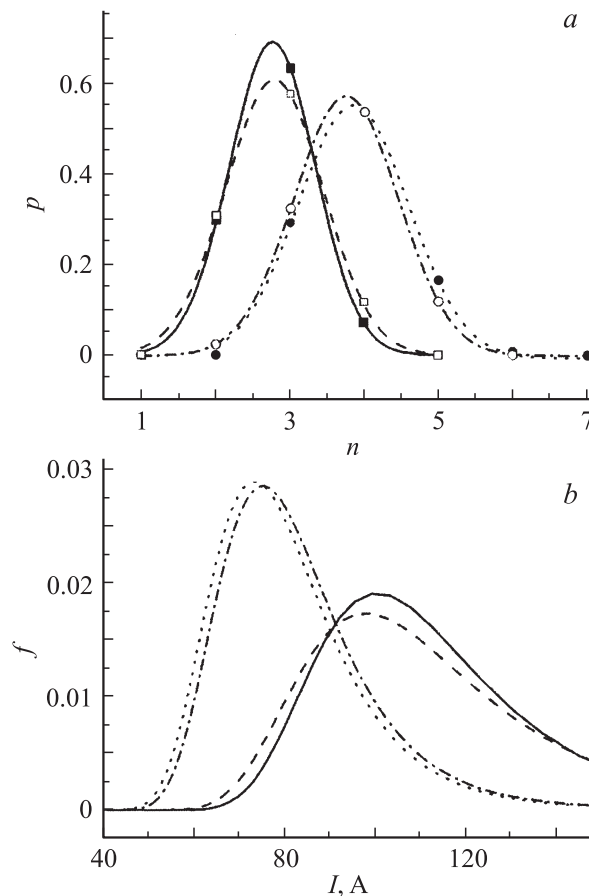


Рис. 7. Распределение количества КП (а) и распределение тока, пропускаемого КП (б) в дуге с медными электродами при токе $I = 300$ А. Точки — эксперимент, кривые — аппроксимации; ● и точечные кривые $V_n = 0.1$ Т, $V_t = 0.05$ Т; ○ и штрихпунктир — $V_n = 0.2$ Т, $V_t = 0.1$ Т; ■ и сплошные кривые — $V_n = 0.05$ Т, $V_t = 0.1$ Т; □ и штриховые кривые — $V_n = 0.1$ Т, $V_t = 0.15$ Т.

фотографирование производилось сквозь сетчатый анод. Использование сетчатого анода, как показано в [15], изменяет условия в дуге, так как снижает эффективность генерации вторичной плазмы, основным источником которой является именно анод [16].

При наложении на дугу наклонного к катоду магнитного поля среднее по распределению значение I_s изменяется мало, если угол наклона поля меньше критического значения. В настоящих экспериментах абсолютное значение вектора результирующего поля достигало значения $B = 0.43$ Т. Такое сильное поле, но наклоненное под углом, меньшим критического ($\alpha < \alpha^*$), увеличивает среднее по распределению значение I_s для обоих исследованных материалов менее чем в полтора раза. Примерно в десять раз более слабое поле $B = 0.04$ Т, наклоненное под углом $\alpha > \alpha^*$, влияет значительно сильнее, а при $\alpha = \pi/2$ увеличивает среднее по распределению значение I_s более чем в пять раз (материал электродов — CuCr30) и почти в два раза (материал электродов — Cu).

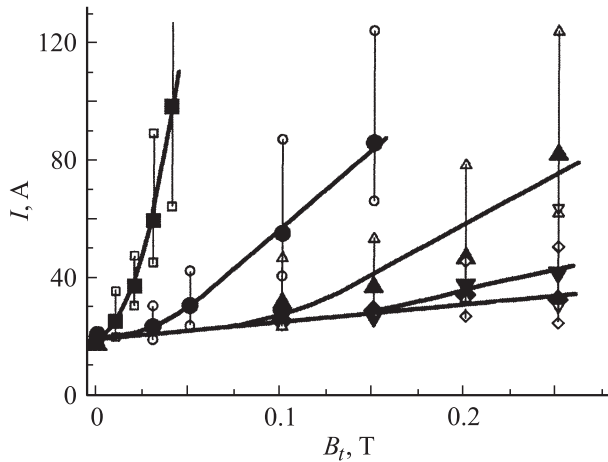


Рис. 8. Зависимость среднего по распределению значения I_s от магнитного поля. Материал электродов CuCr30. ■ — $B_n = 0$, ● — 0.05, ▲ — 0.1, ▼ — 0.2, ◆ — 0.35 Т. Пустые символы вверх и вниз отмечают значения $I_s^{(1)}$ и $I_s^{(2)}$, для которых соответственно вероятность $I_s > I_s^{(1)}$ и $I_s < I_s^{(2)}$ составляет 90%.

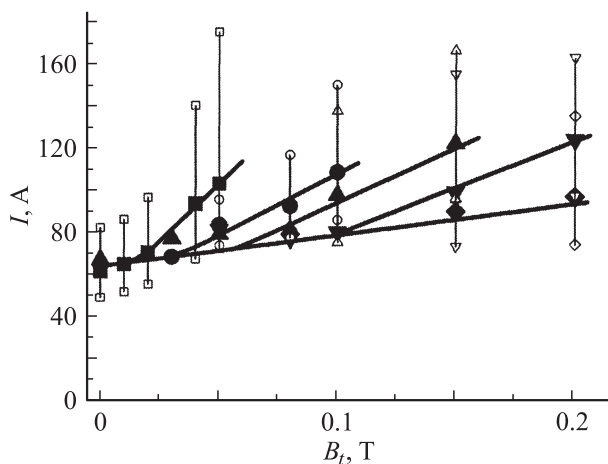


Рис. 9. Зависимость среднего по распределению значения I_s от магнитного поля. Материал электродов Cu. ■ — $B_n = 0$, ● — 0.05, ▲ — 0.1, ▼ — 0.2, ◆ — 0.35 Т. Пустые символы вверх и вниз отмечают значения $I_s^{(1)}$ и $I_s^{(2)}$, для которых соответственно вероятность $I_s > I_s^{(1)}$ и $I_s < I_s^{(2)}$ составляет 90%.

Необходимо отметить, что некоторое увеличение среднего значения I_s в сильных магнитных полях, наклоненных под малыми углами ($\alpha < \alpha^*$), может быть кажущимся. Нельзя исключить, что при больших значениях B_n пространственное разрешение, обеспечиваемое использованной нами аппаратурой, оказывается недостаточным. Следуя [17], можно предположить, что характерное расстояние между КП с ростом B_n уменьшается, и рассчитанное количество КП может быть занижено. Исследования с более высоким пространственным разрешением остаются актуальными.

Результаты, полученные в настоящей работе, позволяют объяснить явление, неоднократно наблюдавшееся нами при исследовании сильноточных вакуумных дуг, стабилизированных аксиальным магнитным полем (АМП) и, в частности, при проведении работ [9,18].

В этих работах исследовались дуги, стабилизированные АМП с индукцией до 1.2 Т, питаемые импульсом тока амплитудой 5–50 кА, по форме близким к прямоугольному (передний фронт ~ 0.5 ms, плато ~ 5 ms). Дуги поджигались вблизи центра катода с помощью дополнительного электрода. Длительность развития дуги (расширения катодной привязки) составляла 2–3 ms (таким образом, большая часть процесса развития дуги происходила при постоянном токе). Дуги фотографировались с помощью высокоскоростной фотографической установки ВФУ-1. Фотографирование проводилось под углом $\sim 10^\circ$ к поверхности катода, как и в настоящей работе.

При не слишком больших значениях индукции АМП на стадии развития дуги обращает на себя внимание большое различие в размерах изображений КП, расположенных в различных точках катодной поверхности (рис. 10, а). Изображения КП, расположенных на периферии расширяющейся привязки, превосходят изображения КП, расположенных в приосевой области. По мере увеличения диаметра привязки это различие уменьшается и даже исчезает совсем. Структура привязки становится однородной (рис. 10, б).

При малых значениях индукции АМП различия изображений КП, расположенных на разных расстояниях от оси, сохраняются и в развившейся дуге (т.е. в дуге, диаметр катодной привязки которой равен диаметру электрода). При больших значениях индукции описанное явление трудно различимо на фотографиях, так как имеет место только, пока диаметр привязки мал, и соответственно структура ее плохо различима из-за большой плотности изображения и высокой степени его почернения в целом. Диапазон значений индукции АМП, в котором явление выражено наиболее ясно, зависит от тока дуги и диаметра электродов.

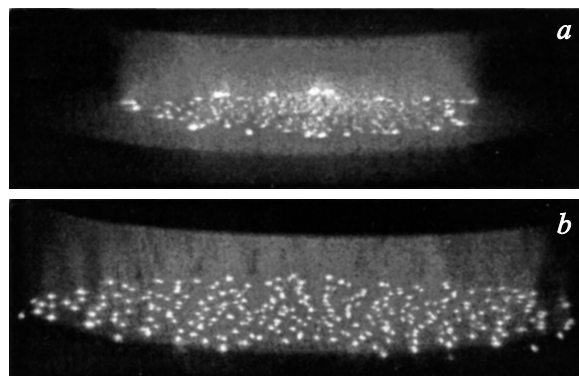


Рис. 10. Фотографии сильноточной вакуумной дуги, стабилизированной АМП (позитив). Электроды CuCr30, $D = 30$ mm. Экспозиция кадра $25 \mu\text{s}$. $I = 7.5$ kA; $B_n = 0.11$ Т; $h = 6$ mm. а — стадия развития дуги; б — квазистационарное состояние.

Как было указано выше, если пленка надлежащим образом экспонирована, обработана и просканирована, то размер изображения КП определяется в основном аппаратной функцией ВФУ-1. Информации об истинных размерах КП у нас нет, все пятна следует рассматривать как точечные источники света. Съемка, фрагменты которой показаны на рис. 10, а также обработка и сканирование пленки были сделаны таким образом, чтобы обеспечить пригодные для компьютерной обработки (достаточно контрастные) изображения поверхности катода дуги, находящейся в квазистационарном состоянии. Поэтому на стадии развития изображения дуги оказались „пересвечены“, т. е. изображения всех КП на негативе достигли максимального почернения. В этом случае более интенсивно излучающий точечный объект выглядит более крупным. Таким образом, различие в размерах КП на рис. 10, а на самом деле есть различие в интенсивности излучения из этих КП. КП на периферии расширяющейся привязки заметно ярче, чем находящиеся внутри. Как именно интенсивность излучаемого КП света связана с характеристиками КП — вопрос сложный. Можно думать, что более интенсивно излучающие КП пропускают больший ток.

Можно предположить, что описанные особенности структуры катодной привязки сильноточной вакуумной дуги являются проявлением обнаруженной и исследованной в настоящей работе зависимости среднего тока I_s , пропускаемого КП, от магнитного поля и угла его наклона к оси дуги. Действительно, как уже было отмечено во Введении, результирующее магнитное поле, под действием которого находится некоторое КП в привязке сильноточной вакуумной дуги, является суммой внешнего аксиального поля и собственного поля дугового тока. Поэтому амплитуда и угол наклона результирующего поля, а значит и средний ток, пропускаемый КП, зависят от положения КП на поверхности катода.

Оценим условия, в которых оказываются КП, расположенные в приосевой области привязки и на ее периферии, в режимах, фотографии которых приведены на рис. 10. Дуга поджигалась на электродах из композиции CuCr диаметром $D = 30$ мм и была стабилизирована однородным АМП с индукцией $\mathbf{B}_n = 0.11$ Т. Радиус катодной привязки в момент времени, к которому относится фотография на рис. 10, а, составлял $r_1 = 1.0$ см, а на рис. 10, б — $r_2 = 1.5$ см. Ток дуги $I = 7.5$ кА. Привязка примерно осесимметрична. На ее оси $\mathbf{B}_t = 0$, поэтому угол наклона результирующего магнитного поля, действующего на КП, расположенное в приосевой области, $\alpha_0 = 0$. Значение угла наклона ($\arctg \mathbf{B}_t / \mathbf{B}_n$) на краю привязки получим, считая, что значение \mathbf{B}_t можно оценить, используя формулу для индукции поля, создаваемого длинным прямым проводником. Когда весь ток протекает через привязку радиусом r_1 , угол наклона результирующего магнитного поля на периферии $\alpha_1 \approx 54^\circ$, а когда через привязку радиусом r_2 — угол наклона $\alpha_2 \approx 42^\circ$. В соответствии с результатами, полученными в настоящей работе, критический угол для дуги на электродах из медь-хромовой композиции $\alpha^* = 45^\circ$.

Поскольку $\alpha_1 > \alpha^*$, а $\alpha_2 < \alpha^*$, то ток, пропускаемый КП, расположенными на периферии привязки радиусом r_1 , должен превосходить ток, пропускаемый КП на периферии привязки радиусом r_2 , причем, согласно данным, приведенным на рис. 8, примерно в полтора раза.

Ранее нами была разработана методика расчета распределения плотности тока на катоде сильноточной вакуумной дуги, стабилизированной АМП, в квазистационарном состоянии [19]. Эффективность использования этой методики, в том числе в исследованиях прикладного характера, была продемонстрирована в [9].

Методика основана на компьютерной обработке результатов высокоскоростного фотографирования поверхности катода в процессе горения сильноточной дуги. Обработка позволяет определить плотность распределения КП на поверхности катода. Переход от плотности КП к плотности тока очень прост, если предположить, что каждое КП пропускает один и тот же ток. Это предположение представляется вполне разумным, если используется большой массив фотографий дуги в квазистационарном состоянии, а ток, пропускаемый КП, предполагается независимым от положения КП на катоде. Правильность последнего предположения в интересных для практики режимах горения дуги ранее [9,19] было обосновано некоторыми качественными соображениями. Результаты настоящей работы количественно обосновывают это утверждение, поскольку оценки показывают, что в практически интересных режимах на всей поверхности катода выполняется условие $\alpha < \alpha^*$.

Выводы

1. При фиксированном токе количество КП в привязке вакуумной дуги как к медному катоду, так и к катоду из композиционного материала CuCr30, распределено по нормальному закону во всем исследованном диапазоне изменения результирующего магнитного поля.

2. Параметры распределений зависят от материала катода и магнитного поля. Зависимость от материала — сильная. Зависимость от магнитного поля существенно проявляется лишь при превышении некоторого критического значения угла наклона α^* , которое определяется материалом катода и составляет $\alpha^* \approx 45^\circ$ (материал электродов CuCr30) и $\alpha^* \approx 30^\circ$ (материал катода — бескислородная медь). При $\alpha > \alpha^*$ появляется сильная зависимость параметров распределения от угла наклона, но зависимость от амплитуды магнитного поля $|B|$ остается слабой. Лишь при $\alpha \rightarrow \pi/2$ ($\mathbf{B}_t / \mathbf{B}_n \gg 1$) амплитуда поля начинает оказывать сильное влияние на распределение.

3. Определены статистические характеристики распределения I_s — среднего тока, пропускаемого КП, в магнитных полях различной ориентации относительно нормали к плоскости катода. Значение I_s слабо зависит от магнитного поля, если $\alpha < \alpha^*$.

4. Структура катодной привязки сильноточной вакуумной дуги, стабилизированной АМП, в квазистационарном состоянии однородна, если индукция АМП

достаточно велика, так что на всей поверхности катода угол наклона результирующего магнитного поля $\alpha < \alpha^*$. В противном случае, а также на стадии развития дуги, будут существовать КП, пропускающие сильно отличающиеся токи.

Список литературы

- [1] *Mesyats G.A.* Cathode phenomena in a Vacuum Discharge: The Breakdown, the Spark and the Arc. Moscow: Nauka, 2000. 400 p.
- [2] *Juttner B., Puchkarev V.F., Hantzsche E., Beilis I.* Handbook of Vacuum Arc Science and Technology. Noyes Publications. Park Ridge. NJ. USA, 1995. P. 73–281.
- [3] *Robson A.E.* // Proc. IV Int. Conf. Phen. Ionised Gases. Uppsala. 1959. Vol. IIb. P. 346–349.
- [4] *Gundlach H.C.W.* // Proc. VII ISDEIV. Albuquerque. NM, 1978. P. A. 2. 1–11.
- [5] *Juttner B.* Cathode processes of electric discharge in vacuum. Thesis B. Academy of Sciences. Berlin, 1983.
- [6] *Agarwal M.S., Holms R.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 1984. Vol. 17. P. 757–767.
- [7] *Watanabe K., Kaneko E., Yanabu S.* // IEEE Trans. Plas. Sci. 1997. Vol. 25. N 4. P. 609–616.
- [8] *Chaly A.M.* // IEEE Trans. Plas. Sci. 2005. Vol. 33. N 5. P. 1497–1503.
- [9] *Shkol'nik S.M., Afanas'ev V.P., Chaly A.M., Logatchev A.A., Malakhovsky S.I., Poluyanova I.N., Zabello K.K.* // IEEE Trans. Plas. Sci. 2005. Vol. 33. N 5. P. 1511–1518.
- [10] *Djakov B.E., Holmes R.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 1971. Vol. 4. P. 504–508.
- [11] *Перский Н.Е., Сысун В.И., Хромой Ю.Д.* // ТВТ. 1989. Т. 24. № 6. С. 1060–1067.
- [12] *Zabello K.K., Barinov Yu.A., Chaly A.M., Logatchev A.A., Shkol'nik S.M.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2005. Vol. 33. N 5. P. 1553–1559.
- [13] *Chaly A.M., Logatchev A.A., Zabello K.K., Shkol'nik S.M.* // IEEE Trans. Plas. Sci. 2007. Vol. 35. N 4. P. 946–952.
- [14] *Juttner B.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2001. Vol. 34. N 17. P. R103–R123.
- [15] *Chaly A.M., Logatchev A.A., Shkol'nik S.M.* // IEEE Trans. Plas. Sci. 1997. Vol. 25. N 4. P. 564–570.
- [16] *Shkol'nik S.M.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2003. Vol. 31. N 5. P. 832–846.
- [17] *Кесаев И.Г.* Катодные процессы электрической дуги. М.: Наука, 1968. 244 с.
- [18] *Chaly A.M., Logatchev A.A., Zabello K.K., Shkol'nik S.M.* // IEEE Trans. Plas. Sci. 2007. Vol. 35. N 4. P. 939–945.
- [19] *Afanas'ev V.P., Chaly A.M., Logatchev A.A., Shkol'nik S.M., and Zabello K.K.* // IEEE Trans. Plas. Sci. 2001. Vol. 29. N 5. P. 695–699.