

04

Измерение угла Робсона в вакуумных дугах различной длины

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

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

Поступило в Редакцию 2 августа 2012 г.

Обнаружено, что угол Робсона, определяющий направление движения катодного пятна вакуумной дуги в наклонном к катоду однородном магнитном поле определяется главным образом длиной межэлектродного промежутка. Измерена зависимость угла Робсона от угла наклона поля при разных длинах промежутка на катодах из молибдена и вольфрама. Значение угла Робсона необходимо для выбора оптимальной конфигурации магнитного поля, контролирующего динамику катодных пятен в установках для напыления различных покрытий с помощью вакуумной дуги, а также в вакуумной коммутационной аппаратуре.

Известно, что катодное пятно (КП) вакуумной дуги, помещенной в однородное тангенциальное магнитное поле B_t , движется по поверхности катода в ретроградном (или антиамперовом) направлении, т. е. в направлении, противоположном тому, в котором действует на ток, протекающий через КП, сила Ампера. При наложении на дугу однородного магнитного поля, наклоненного на угол φ к поверхности катода (т. е. магнитного поля, имеющего две компоненты — тангенциальную B_t и нормальную B_n к поверхности катода), траектория движения КП отклоняется от ретроградного направления, образуя с ним некоторый угол θ , называемый углом Робсона [1] (рис. 1, *a*). Впервые это явление было обнаружено на алюминиевом катоде в работе [2], в которой измерения выполнены в техническом вакууме. Вплоть до настоящего времени обнаруженное в [2] явление остается мало исследованным как экспериментально, так и теоретически.

Известно, что на характеристики КП и его динамику на электроде под действием магнитных полей влияют состояние поверхности (определяющее тип КП) и материал электрода, а также длина межэлектродного промежутка L [1]. В немногочисленных работах, посвященных изменению угла Робсона [2–5], в том числе в работах, в которых

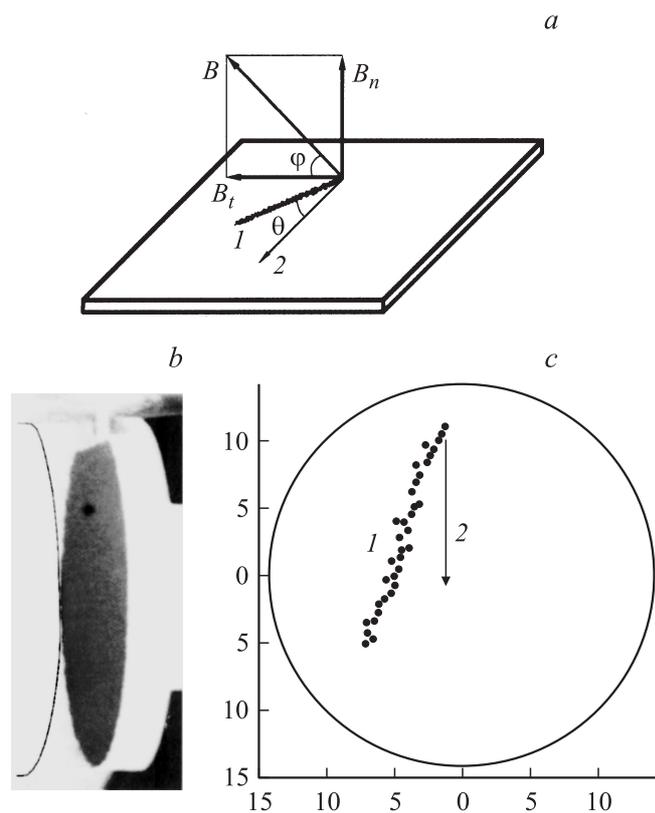


Рис. 1. *a* — определение угла Робсона: 1 — траектория КП, 2 — антиамперо направление. *b* — кадр высокоскоростной фотосъемки (негатив); справа — катод, подсвеченный вспышкой, вверху видна поджиговая игла; темное пятно на катоде — КП; слева — анод (контур анода обведен); $L = 6$ mm; съемка под углом $\sim 10^\circ$ к катоду; экспозиция $25 \mu\text{s}/\text{frame}$. *c* — результат компьютерной обработки фотосъемки движения КП: 1 — траектория движения КП, 2 — антиамперо направление.

измерения были выполнены в высоком вакууме, получены противоречивые результаты, не позволяющие судить, чем определяется угол Робсона: состоянием поверхности (типом КП), материалом электрода,

длиной дугового промежутка или в той или иной степени всеми перечисленными факторами.

Между тем этот вопрос интересен не только с чисто физической точки зрения, но важен и для практических применений вакуумной дуги. Эффект Робсона необходимо учитывать при выборе конфигурации магнитного поля, контролирующего динамику КП в установках для напыления различных покрытий с помощью вакуумной дуги [6], а также в вакуумной коммутационной аппаратуре [7]. С целью ответа на этот вопрос в данной работе были выполнены измерения угла Робсона в высоком вакууме на двух различных металлах при различных длинах межэлектродного промежутка.

В экспериментах использовались установка, методика измерений и обработки результатов, подробно описанные в [4,8]. Эта установка позволяет исследовать вакуумные дуги и динамику их привязки к катоду (КП) в однородных магнитных полях, вектор индукции которых B и его наклон к поверхности катода может быть изменен путем независимого изменения компонент поля B_t и B_n .

В данной работе использовались плоские торцевые электроды из гранулированного молибдена и вольфрама диаметром 30 мм. Дуга питалась прямоугольными импульсами тока длительностью несколько миллисекунд. Поджиг дуги осуществлялся вблизи края катода при обрыве тока во вспомогательной цепи между катодом и поджиговой иглой. Для этой цели часть поверхности катода была сфрезерована по хорде, как это можно видеть на рис. 1, *b* справа вверху. Ток дуги мог варьироваться в пределах до $I = 350$ А. Межэлектродный промежуток составлял $L = 2$ мм и $L = 6$ мм.

Эксперименты проводились при непрерывной откачке ($p \sim 10^{-4}$ Па). Перед началом измерений проводилась очистка поверхности катода с помощью серии импульсов с током ~ 1 кА длительностью ≈ 2 мс от специального источника. В процессе измерений каждому рабочему импульсу предшествовал „чистящий“ импульс с такими же параметрами.

Для высокоскоростной фотосъемки катода использовалась установка ВФУ-1. Эта установка обеспечивает фотографирование на пленке 60 последовательных кадров. Кадры экспонируются без перерыва. Экспозиция может меняться в пределах от 25 до $3 \mu\text{s}/\text{frame}$. Фотографирование проводилось под углом $\sim 10^\circ$ к поверхности катода. Поверхность катода в процессе фотосъемки подсвечивалась сбоку фотовспышкой,

источник питания которой был переделан для увеличения длительности вспышки.

Пример результата фотографирования приведен на рис. 1, *b*. Черная точка — изображение КП (отметим, что размер почернения на фотопленке не соответствует размеру КП и определяется аппаратной функцией ВФУ-1). Результаты фотографирования с помощью пленочного сканера HP S20 вводились в компьютер, где обрабатывались по специальной программе, позволявшей определить положение КП на катоде в каждом кадре. Результат обработки одной из съемок приведен на рис. 1, *c*. Отметим, что размер точки на рис. 1, *c* произволен; точки указывают лишь положение КП. В каждом из режимов проводилось от 3 до 5 фотосъемок. При определении угла Робсона траектория движения КП аппроксимировалась прямой линией по методу наименьших квадратов. Результаты усреднялись.

На рис. 2 приведены результаты измерений угла Робсона при длинах промежутка $L = 2 \text{ mm}$ и $L = 6 \text{ mm}$. Ток дуги составлял $I \approx 60 \text{ A}$, что обеспечивало горение на катоде лишь одного КП. Для каждого значения φ измерения проводились при двух комбинациях значений B_t и B_n . Например, при $\varphi = 45^\circ$ измерения проводились при $B_t, B_n = 0.03 \text{ T}$ и $B_t, B_n = 0.05 \text{ T}$. Из рис. 2 видно, что при $\varphi < \sim 50^\circ$ зависимость $\theta(\varphi)$ может быть удовлетворительно аппроксимирована прямой линией, но при $\varphi > 50^\circ$ наблюдается тенденция к насыщению, как и в [2].

При одинаковом значении L углы Робсона для молибдена и вольфрама в пределах разброса не отличаются. Однако для дуг, горящих в межэлектродных промежутках различной длины, углы Робсона различны, причем различие выходит за пределы разброса. При $L = 2 \text{ mm}$ результаты, полученные в этой работе, дают $\theta \approx 0.5\varphi$, что совпадает с результатом, полученным в работе [5] на молибденовом катоде в аналогичных условиях, а также в работе [3]. При $L = 6 \text{ mm}$ результаты, полученные в настоящей работе, дают $\theta \approx 0.85\varphi$, что удовлетворительно согласуется с результатом $\theta \approx (0.7-0.8)\varphi$, полученным в высоком вакууме в работах [4] на катодах из меди и медь-хромовой композиции при $L = 4 \text{ mm}$, а также с результатом $\theta \approx 0.9\varphi$, полученным в [2] в техническом вакууме на алюминиевом катоде.

Влияние длины промежутка на динамику катодной привязки вакуумных дуг объясняется тесной взаимосвязью катодных и анодных процессов, характерной для коротких вакуумных дуг [9]. Известно [1], что струи плотной сильно ионизованной плазмы, источниками которых

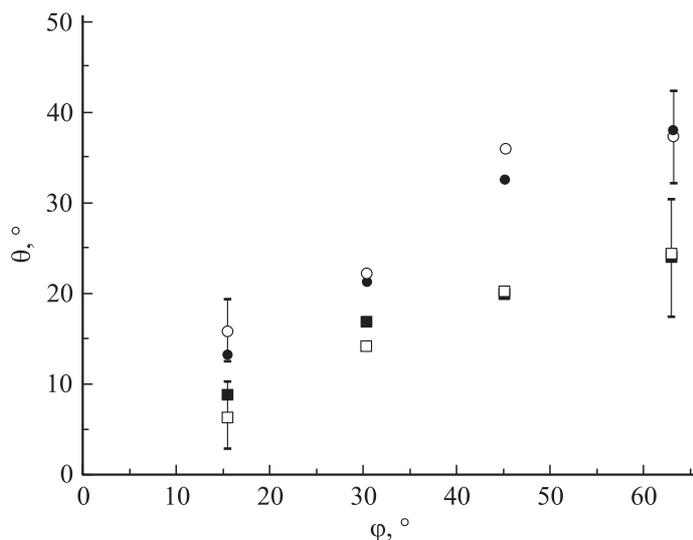


Рис. 2. Результаты измерений угла Робсона. Квадраты — $L = 2$ mm; кружки — $L = 6$ mm. Заполненные символы — молибденовый катод; пустые символы — вольфрамовый.

являются КП, в непосредственной близости от поверхности катода ускоряются до сверхзвуковых скоростей. Средняя кинетическая энергия ионов в плазменных струях КП составляет от нескольких десятков электронвольт для таких металлов, как, например, медь, до сотни и более электронвольт для тугоплавких металлов. Потoki быстрых катодных ионов, которые можно назвать первичными, бомбардируя анод, вызывают эффективную эмиссию (распыление) атомов с его поверхности. Средняя кинетическая энергия этих атомов составляет 3–5 eV, что более чем на порядок величины меньше средней кинетической энергии ионов в плазменных струях КП. Поскольку температура электронов в пространстве вакуумной дуги высокая, длина ионизации распыленных атомов мала — они ионизируются непосредственно у поверхности анода. Таким образом, вблизи поверхности анода формируется поток относительно медленных ионов, текущий в сторону катода. Эти ионы можно назвать вторичными [10].

Существующие в пространстве вакуумной дуги две группы ионов (катодного и анодного происхождения), значительно отличающиеся по энергии, практически не взаимодействуют друг с другом, так как их относительные скорости велики и соответственно мало сечение ион-ионных столкновений (это верно, как показывают оценки, и для сильноточных дуг с плотностью тока до $\sim 1 \text{ kA/cm}^2$). Поток первичных ионов со стороны катода пронизывает без столкновений облако вторичных ионов анодного происхождения, распространяющееся в сторону катода. В то же время электроны имеют единое (максвелловское) распределение по скоростям, так как при температурах, характерных для вакуумных дуг (несколько электронвольт), сечение электрон-электронных столкновений достаточно велико и длина свободного пробега электронов много меньше длины дугового промежутка.

В длинных дугах непосредственно у поверхности катода, исключая само КП и его ближайшую окрестность, концентрация первичных ионов мала, так как распределение плотности ионного тока в струях, генерируемых КП, — косинусное, в непосредственной близости от катода струи направлены по нормали к его поверхности. Концентрация вторичных ионов у поверхности катода длинной дуги также мала, так как спадает по мере удаления от источника — анодной привязки дуги. Поскольку вероятность пробоя прикатодного слоя выше там, где выше концентрация плазмы, то пробой прикатодного слоя и регенерация КП в длинных дугах происходит в ближайшей окрестности отмирающего пятна. При этом в силу симметрии относительно оси, проходящей через отмирающее КП, угловое распределение вероятности пробоя и образования нового КП однородно, предпочтительное направление отсутствует.

При наложении на дугу тангенциального магнитного поля угловое распределение вероятности образования нового КП становится неоднородным. Вероятность образования нового КП оказывается выше в так называемом ретроградном направлении от отмирающего КП [1]. Это и определяет динамику катодной привязки дуги.

При укорачивании дуги концентрация анодных ионов у поверхности катода возрастает. Поэтому укорачивание дуги влияет на пробойные процессы, обеспечивающие регенерацию КП, и тем самым на динамику КП и вызывает развитие процесса, называемого группированием КП [9].

Наложение на дугу, помимо тангенциального, еще и нормального магнитного поля изменяет форму плазменной струи, генерируемой КП,

и направление ее распространения. Струя приобретает цилиндрическую форму и на расстоянии $Z_0 \sim (1-2)$ mm от катода разворачивается вдоль силовых линий результирующего поля (при $Z < Z_0$ развороту струи препятствует инерция ускоренных в КП ионов). Привязка дуги к аноду — источник вторичных ионов — становится компактной. Ее положение на поверхности анода определяется в основном углом наклона результирующего поля и длиной дуги [11].

В дугах длиной $L < Z_0$ анодная привязка расположена практически напротив КП, являющегося источником плазменной струи, и потому поток вторичных ионов слабо искажает угловое распределение концентрации вокруг действующего КП (а значит, и угловое распределение вероятности возникновения нового КП). В дугах длиной $L > Z_0$ вследствие разворота струи вдоль магнитного поля анодная привязка существенно смещена относительно катодной. Угловое распределение концентрации плазмы вокруг действующего КП оказывается искажено сильнее. Возможно, это и является причиной более сильного отклонения траектории КП от направления ретроградного движения, т.е. увеличения угла Робсона при удлинении дуги.

Полученные в данной работе результаты показывают, что основным фактором, влияющим на соотношение между углом Робсона и углом наклона магнитного поля, является длина межэлектродного промежутка. Другие факторы, такие как материал электрода и состояние его поверхности (тип КП), оказывают заметно меньшее влияние, которое трудно охарактеризовать количественно, так как результаты измерений угла Робсона дают большие разбросы, в том числе и в ультравысоком вакууме на отожженных и подвергнутых дуговой очистке электродах [3].

Список литературы

- [1] Handbook of Vacuum arc Science and Technology. Fundamentals and Applications / Eds R.L. Boxman, D.M. Sanders, P.J. Martin. NP, Park Ridge, N.-Jersey, USA. 1995. Part I. Chapt. 3. P. 73–264.
- [2] Robson A.E. // Proc. IV Int. Conf. Phen. Ionized Gases. Uppsala, 1959. IIb. P. 346–349.
- [3] Juttner B. Cathode processes of electric discharge in vacuum // Thesis B. Acad. Sci. Berlin, Germany, 1983.
- [4] Zabello K.K., Barinov Yu.A., Chaly A.M., Logatchev A.A., Shkol'nik S.M. // IEEE Trans. Plas. Sci. 2005. V. 33. N 5. P. 1553–1559.

- [5] *Chaly A.M., Minaev V.S., Myatovich S.U., Zabello K.K.* // Proc. XXIV. ISDEIV. Braunschweig, 2010. V. 2. P. 316–319.
- [6] *Sanders D.M., Boercker D.B., Falabella S.* // IEEE Trans. Plas. Sci. 1990. V. 18. P. 883–894.
- [7] *Chaly A.M.* // IEEE Trans. Plas. Sci. 2005. V. 33. N 5. P. 1497–1503.
- [8] *Забелло К.Л., Логачев А.А., Чалый А.М., Школьник С.М.* // ЖТФ. 2009. Т. 79. В. 6. С. 58–66.
- [9] *Chaly A.M., Logatchev A.A., Shkol'nik S.M.* // IEEE Trans. Plas. Sci. 1999. V. 27. N 4. P. 883–894.
- [10] *Shkol'nik S.M.* // IEEE Trans. Plas. Sci. 2003. V. 31. N 5. P. 832–846.
- [11] *Zabello K.K., Myatovich S.U., Logachev A.A., Shkol'nik S.M.* // Proc. XXV ISDEIV. Tomsk, 2012. V. 1. P. 277–280.