

04

Возникновение микроструктур на поверхности стали под воздействием разряда плазменного фокуса

© Д.Л. Кирко, П.П. Сидоров, О.А. Башутин, А.С. Савелов

Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“, Москва, Россия

E-mail: dmitri.kirko@gmail.com

Поступило в Редакцию 26 мая 2022 г.

В окончательной редакции 26 мая 2022 г.

Принято к публикации 16 июня 2022 г.

Изучена поверхность металлов после облучения интенсивными потоками аргоновой плазмы, возникающей в плазменном фокусе. Исследованы металлические образцы из стали, меди, вольфрама и молибдена. Зарегистрированы различные виды микроструктур. Поверхности стальных образцов содержат микропоры размером $0.1\text{--}3\ \mu\text{m}$ с формой, близкой к круглой. На медных и вольфрамовых пластинах наблюдаются мелкодисперсные структуры размером $0.5\text{--}20\ \mu\text{m}$. Обсуждаются возможные механизмы появления данных микроструктур.

Ключевые слова: плазменный фокус, интенсивные плазменные потоки, микропоры, нитевидная структура разряда.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.15.53126.19261

Установки типа плазменный фокус используются для создания плотной высокотемпературной плазмы, возникающей в результате пинч-эффекта [1–6]. При опытах на газообразном дейтерии наблюдаются значительные нейтронные выходы в результате термоядерных реакций, достигающие величины $\sim 1.5 \cdot 10^{10}$ neutron/pulse. На стадии распада пинча образуются интенсивные плазменные потоки. Было установлено, что взаимодействие частиц плазменного фокуса с поверхностью металлов приводит к появлению наноструктур [7]. Это обсуждается в литературе ввиду возможного использования для получения наноматериалов [8,9]. Проводилось исследование разряда типа плазменный фокус при разрядах в дейтерии и неоне с помощью лазерной диагностики [10]. Было сделано предположение о наличии в токовой плазменной оболочке волокнистой структуры с диаметром отдельного волокна приблизительно $100\ \mu\text{m}$ при общем количестве данных волокон около 200.

В настоящей работе электродная система содержала центральный медный анод (рис. 1), в верхней части которого размещалась исследуемая металлическая пластина в виде диска с диаметром $12\ \text{mm}$ и высотой $3\ \text{mm}$. Характерное зарядное напряжение конденсаторной батареи находилось в диапазоне $24\text{--}26\ \text{kV}$, емкость батареи $12\ \mu\text{F}$, амплитудное значение тока разряда $330\text{--}345\ \text{kA}$ при периоде тока разряда $5.0\ \mu\text{s}$. Форма импульса тока представляла собой затухающую синусоиду с количеством периодов 3–4. Рабочее давление аргона в камере составляло $1.5\text{--}1.7\ \text{Torr}$. После огибания анода токовая оболочка сходится вблизи оси камеры, образуя плотное плазменное образование — плазменный фокус. Согласно измерениям концентрации плазмы в периферийных областях разряда, плотность потока частиц принимает значения в области $10^{20}\text{--}10^{21}\ \text{atom}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ [4,5].

Изображения поверхности стальных пластин, которые устанавливались в центральной части анода, показаны на рис. 2. Для исследования микроструктуры поверхности использовались микроскопы Hitachi TM1000 и VEGA 3 SEM. На поверхности металла присутствуют отдельные участки, где находятся ступки овальной или неправильной формы размером $10\text{--}40\ \mu\text{m}$. Элементный

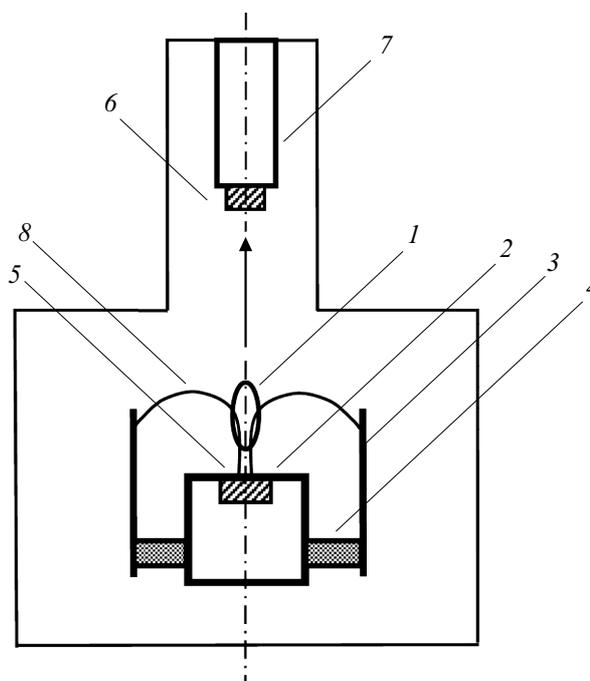


Рис. 1. Схема эксперимента по взаимодействию плазмы с металлами. 1 — плазменный фокус, 2 — анод, 3 — катод, 4 — изолятор, 5 — пластина из исследуемого металла, 6 — металлический образец, 7 — держатель, 8 — линии тока.

состав данных образований, как правило, содержит железо (около 80%), алюминий (около 15%) и медь (около 5%). На некоторых сгустках наблюдаются микропоры размером $0.1-0.7 \mu\text{m}$ с формой, близкой к круглой.

Рассмотрим микропоры на поверхности стальных пластин (рис. 2 и 3, *a*), имеющие размеры в диапазоне $0.1-3 \mu\text{m}$. Форма пор близка к круглой. Расположение пор является нерегулярным. Поверхность исходной стальной пластины до проведения экспериментов представлена на рис. 3, *b*. Исходный материал поверхности пластины — сталь (Ст 45) — специально не шлифовался и содержал микронеровности шириной до $3 \mu\text{m}$. Характерное число выстрелов $10-15$. Элементный состав поверхности после облучения плазмой был следующим: железо — $93-95\%$, алюминий — $5-7\%$. До облучения плазмой поверхность содержала практически 99% железа с учетом погрешности измерения. Содержание алюминия, по-видимому, связано с распылением изолятора, изготовленного из корунда, в состав которого входит алюминий.

Допустим, что на некоторых участках происходит филаментация тока на небольшие микронные токи диаметром $0.1-3 \mu\text{m}$, которые впоследствии оказывают термическое действие и приводят к образованию микропористой структуры поверхности. Для металлических поверхностей в плазме может работать механизм распыления, свойственный воздействию ионных пучков на поверхность в вакууме [11]. Предположим, что ток через стальную вставку находится в диапазоне $500-5000 \text{ A}$. При филаментации данного тока допустим количество токовых нитей в диапазоне $500-1000$. В этом случае величина элементарного тока, приходящегося на одну токовую нить, будет находиться в области $0.5-10 \text{ A}$. Время воздействия тока (или его прохождения через пластину) можно взять для оценки равным половине периода $2.5 \mu\text{s}$.

Для оценки энергии образования одной поры был взят объем железного цилиндра диаметром $1 \mu\text{m}$ и высотой

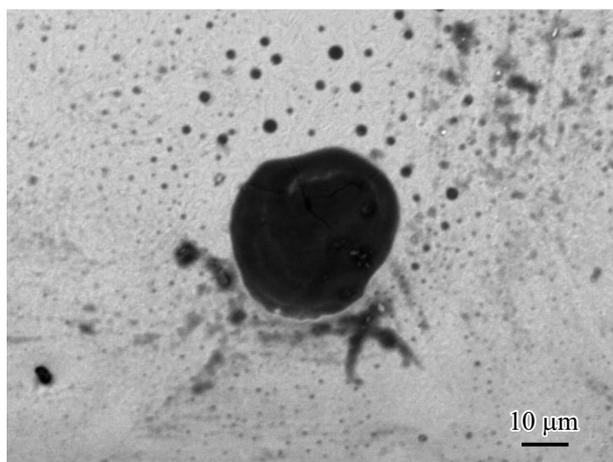


Рис. 2. Структуры на поверхности стали: овальное образование и микропоры.

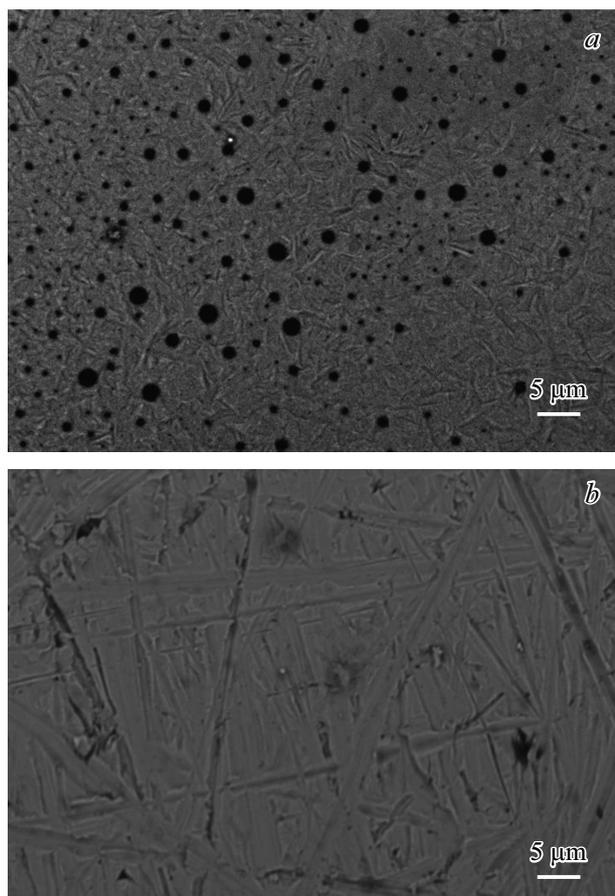


Рис. 3. Изображение поверхности стальной пластины. *a* — микропоры различного диаметра после облучения плазмой, *b* — исходная поверхность до облучения плазмой.

$5 \mu\text{m}$. Количество теплоты, переданное одной поре при среднем элементарном токе 2 A , ввиду джоулева нагрева при этом составляет около $7.6 \cdot 10^{-5} \text{ J}$. В качестве оценки энергии связи атомов в кристалле железа для рассмотренного объема вещества можно получить значение около $2.06 \cdot 10^{-6} \text{ J}$ [12]. Данная энергия может быть затрачена при полном распылении частиц вещества объема поры. Для одной поры оценка для джоулева тепла превосходит оценку энергии связи приблизительно в 37 раз, что можно связать с потерями энергии при распылении частиц поры.

При исследовании взаимодействия потоков аргоновой плазмы с медными пластинами *б*, закрепленными в держателе *7* (рис. 1), наблюдаются следующие виды образований: мелкодисперсные капли размером $0.1-1 \mu\text{m}$ с формой, близкой к сферической, и сгустки неправильной формы размером $1-20 \mu\text{m}$. Для образцов из вольфрама и молибдена при облучении аргоновой плазмой наблюдается возникновение капель овальной и неправильной формы размером $0.5-4 \mu\text{m}$.

При воздействии интенсивных потоков аргоновой плазмы, создаваемой с помощью плазменного фокуса, на поверхности стальных образцов наблюдается воз-

никновение микропор. Предполагается, что появление данной микропористой структуры происходит при филаментации тока разряда на отдельные микронные нити с диаметром $0.1\text{--}3\ \mu\text{m}$ и величиной тока $0.5\text{--}10\ \text{A}$. Распыление вещества поры представляет собой специфический механизм, который требует дальнейшего подробного изучения.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] U. Shumlak, J. Appl. Phys., **127** (20), 200901 (2020). DOI: 10.1063/5.0004228
- [2] Ч. Мезонье, ПМТФ, № 4, 23 (1975).
- [3] Н.В. Филиппов, в кн. *Измерение рентгеновского излучения на установке плазменный фокус. Диагностика плазмы* (Энергоатомиздат, М., 1963), с. 21.
- [4] И.В. Ильичев, В.И. Крауз, М.Г. Левашова, В.С. Лисица, В.В. Мьялтон, А.М. Харрасов, Ю.В. Виноградова, Физика плазмы, **46** (5), 419 (2020). DOI: 10.31857/S0367292120050042 [I.V. Pichev, V.I. Krauz, M.G. Levashova, V.S. Lisitsa, V.V. Myalton, A.M. Kharrasov, Yu.V. Vinogradova, Plasma Phys. Rep., **46** (5), 506 (2020). DOI: 10.1134/S1063780X20050049].
- [5] О.А. Башутин, А.С. Савелов, Письма в ЖТФ, **41** (2), 1 (2015). [O.A. Bashutin, A.S. Savjолоv, Tech. Phys. Lett., **41** (1), 54 (2015). DOI: 10.1134/S1063785015010216].
- [6] Д.Л. Кирко, А.С. Савелов, Изв. вузов. Физика, **57** (11), 3 (2014). [D.L. Kirko, A.S. Savelov, Russ. Phys. J., **57** (11), 1455 (2015). DOI: 10.1007/s11182-015-0404-1].
- [7] В.И. Крауз, Л.Н. Химченко, В.В. Мьялтон, В.П. Виноградов, Ю.В. Виноградова, В.М. Гуреев, В.С. Койдан, В.П. Смирнов, В.Е. Фортон, Физика плазмы, **39** (4), 326 (2013). [V.I. Krauz, L.N. Khimchenko, V.V. Myalton, V.P. Vinogradov, Yu.V. Vinogradova, V.M. Gureev, V.S. Koidan, V.P. Smirnov, V.E. Fortov, Plasma Phys. Rep., **39** (4), 289 (2013). DOI: 10.1134/S1063780X13040053].
- [8] M.Z. Khan, Y.S. Ling, I. Yaqoob, N.N. Kumar, L.L. Kuang, W.C. San, Sci. World J., **2014**, 240729 (2014). DOI: 10.1155/2014/240729
- [9] R.S. Rawat, J. Phys.: Conf. Ser., **591**, 012021 (2015). DOI: 10.1088/1742-6596/591/1/012021
- [10] М.М. Орлов, А.П. Терентьев, В.А. Храбров, Физика плазмы, **11** (10), 1268 (1985).
- [11] R. Behrisch, W. Eckstein, *Sputtering by particle bombardment. Experiments and computer calculations from threshold to MeV energies* (Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg, 2007).
- [12] Ч. Киттель, *Введение в физику твердого тела* (Наука, М., 1978). [C. Kittel, *Introduction to solid state physics* (John Wiley & Sons, Inc., New Caledonia, USA, 2005).