

ОСОБЕННОСТИ МОРФОЛОГИИ РАСПЛАВА НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПЛАЗМЫ НА УСТАНОВКЕ ПЛАЗМЕННЫЙ ФОКУС

А. А. Ерискин^{a*}, В. Я. Никулин^a, В. Н. Колокольцев^b

^a Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук
119991, Москва, Россия

^b Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова Российской академии наук
119334, Москва, Россия

Поступила в редакцию 1 декабря 2024 г.,
после переработки 30 января 2025 г.
Принята к публикации 2 февраля 2025 г.

Обнаружены тонкие нити в расплаве на поверхности разных металлов при воздействии импульсов N₂-плазмы на мишени, расположенные на близких расстояниях (≈ 25 мм) от анода установки Плазменный фокус ПФ-5 с энергозапасом ≈ 3.2 кДж (ФИАН). Задачей исследования было определение возможных причин искривления этих нитей. Установлено, что на поверхности ферромагнитной стали Ст3 и нержавеющей стали типа 12X18H10T при воздействии большого числа импульсов плазмы (≈ 50) наблюдается искривление нитей в расплаве (поворот нитей по часовой стрелке или против нее вокруг центральной оси). В случае воздействия плазмы на образцы из алюминиевого сплава типа АМг (парамагнетик) наблюдаются тонкие прямые нити в расплаве; на образцах из Cu (диамагнетик) нитей не наблюдалось. На близких расстояниях (≈ 25 мм) для всех металлов на поверхности наблюдаемую морфологическую структуру расплава можно разделить на две области, диаметры которых соответствуют диаметрам анода и катода ПФ. Эта картина исчезает с увеличением расстояния (≈ 50 мм) от анодного узла установки до мишеней. В работе обсуждаются возможные причины этих явлений.

DOI: 10.31857/S0044451025050116

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время выполняются многочисленные эксперименты по воздействию плазмы на различные материалы на установках типа Плазменный фокус (ПФ) [1, 2]. Как правило, такие исследования связаны с изучением различных аспектов взаимодействия плазмы с теплозащитной облицовкой вакуумной камеры термоядерного реактора, во время работы которого на защитные покрытия ожидается интенсивное плазменно-тепловое воздействие [3], либо с модификацией материалов [4] для придания им определенных свойств — в случае ПФ это происходит в результате комплексного воздействия нескольких факторов: теплового нагрева, ударной волны, ионной имплантации, осаждения покрытий, нейтронного и рентгеновского облучения

материалов, причем в зависимости от нужд можно по-разному комбинировать перечисленные факторы (исключать, усиливать, ослаблять).

Картина взаимодействия плазмы с мишенями на разных расстояниях от анода сложна и часто не воспроизводима из-за нестабильности параметров плазмы от импульса к импульсу. Это создает определенные трудности при подборе оптимальных режимов работы установки ПФ в экспериментах по воздействию плазмы на материалы. При отдалении мишени от анода ПФ на расстояние порядка 50 мм плазменный поток перестает попадать в центр мишени и хаотично смещается на некоторое расстояние от центра в какую-либо сторону от импульса к импульсу. Это будет видно из представленных в данной работе рисунков, на которых изображены последствия воздействия нескольких плазменных импульсов на металлы на большом расстоянии (≈ 50 мм) от анода ПФ. Несмотря на то, что вопросу стабилизации работы установок типа ПФ уделяется доста-

* E-mail: eriskinaa@lebedev.ru

точное внимание, эта проблема по-прежнему остается актуальной [5, 6]. Самое сложное — получение двух идентичных плазменных импульсов для двух отдельных образцов. Сложность заключается в том, что, если это большие образцы, для смены которых необходимо вскрывать вакуумную камеру, для следующего образца потребуются несколько пристрелочных импульсов для ввода ПФ в рабочий режим. Под рабочим режимом подразумевается режим, характеризующийся возникновением на осциллограмме производной тока достаточно большой по амплитуде «особенности» (резкого скачка на обычно синусоидально затухающей кривой) [7]. Импульсы без «особенности» практически не производят никакого воздействия на материал. Специально проводился эксперимент по их многократному воздействию на металл, и в результате визуально отличить облученный таким образом образец от необлученного невозможно. Но даже если экспериментатор уверен, что следующий импульс будет с «особенностью», нет 100-процентной гарантии того, что ее амплитуда будет равна амплитуде «особенности» импульса, которым был облучен предыдущий образец. А чем больше амплитуда особенности, тем большее воздействие оказывается на образец. Также величина воздействия регулируется расстоянием от анода ПФ до мишени: чем дальше мишень от него, тем слабее воздействие.

На установках ПФ с энергией в несколько килоджоулей, чтобы получить заметное воздействие плазменного потока на мишени, часто приходится устанавливать их на достаточно близких расстояниях от анода, около 15–30 мм [8, 9]. Однако при этом возможно влияние металлических мишеней на формирование токово-плазменной оболочки (ТПО) и плазменного импульса. Характерная картина воздействия плазмы на мишени сильно меняется. Целью работы являлось изучение изменений морфологии на поверхности металлов, расположенных на разных расстояниях от анода ПФ, в частности, определение возможных причин обнаруженного искривления нитей расплава при близком расположении мишени от анода ПФ.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Работа выполнена на установке ПФ-5 с коаксиальными электродами (ФИАН) [10]. Анод и катод установки выполнены из электротехнической меди. Диаметры анода и катода были равны соответственно 30 и 51 мм. Длина анода (z_0 на рис. 1) составляла

43 мм. Анодный наконечник имел форму полусферы диаметром 30 мм. На торце анода имелось конусное отверстие с диаметром в основании ≈ 8 мм и глубиной ≈ 6 –8 мм. Максимальная запасаемая энергия в конденсаторной батарее емкостью 20 мкФ была приблизительно равна 3.2 кДж. Облучение проводилось при начальном напряжении 18 кВ. Длительность импульса плазмы составляла ≈ 100 нс. Интервал времени между импульсами плазмы был приблизительно равен 3 мин и определялся временем охлаждения анода, в течение которого происходит фиксирование необходимых экспериментальных данных с детекторов. Рабочим газом был азот при давлении в камере ≈ 1 Торр. Разрядная камера установки ПФ-5 была изготовлена из алюминиевого сплава типа АМг. Для мишеней использовали пластинки металлов: сплава алюминия типа АМг, электротехнической меди, стали Ст3 и нержавеющей стали типа 12Х18Н10Т. Толщина пластинок была приблизительно равна 1 мм (толщина Cu — 0.7 мм, стали Ст3 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т — 1 мм, сплава АМг — 2 мм). Размер мишеней был равен $\approx 90 \times 90$ мм². Мишени устанавливались на расстоянии примерно 25 и 50 мм от анода. Число импульсов плазмы, воздействующих на мишень, изменялось от единиц до нескольких десятков. Схема облучения азотной плазмой металлических мишеней показана на рис. 1.

Важно отметить, что в установке ПФ-5 во время эксперимента поверхность мишени может нагреться до температуры более 3000°С (оценочные данные по результату оплавления мишени из W, температура плавления которого составляет 3422°С [11]). Отметим, что кроме плазменного импульса на мишень воздействует и ударная волна (УВ) [12, 13].

Для устранения нежелательного воздействия плазмы на мишень во время тренировочных импульсов использовалась заслонка из нержавеющей стали типа 12Х18Н10Т, которая располагалась на расстоянии от анода ≈ 14 мм. Заслонка закреплялась на вакуумном штоке, позволяющем ее перемещение через боковое окно установки без нарушения вакуумных условий в камере ПФ-5.

Облученные образцы исследовались на профилометре ZYGO NewView 6k.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 2–5 показаны мишени из сплава АМг, меди, стали Ст3 и нержавеющей стали типа 12Х18Н10Т после воздействия различного числа

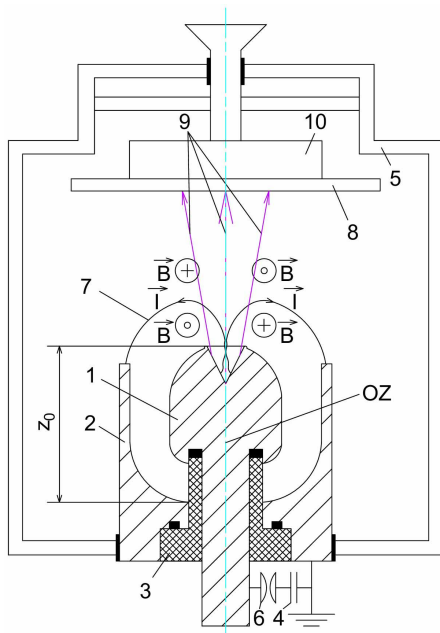


Рис. 1. Схема облучения металлических мишеней N_2 -плазмой на ПФ-5. Направление токов и магнитных полей в ситуации, когда на аноде «+». 1 — анод, 2 — катод, 3 — керамический изолятор, 4 — конденсаторная батарея, 5 — вакуумная камера, 6 — управляемый электрический разрядник, 7 — ТПО, 8 — мишень, 9 — поток плазмы, 10 — органическое стекло, z_0 — длина анода, z — центральная ось (на рисунке OZ)

импульсов азотной плазмы. Как видно из рис. 2–5, картина расплава на поверхности мишеней зависит от свойств металла, расстояния от мишеней до анода и числа импульсов. При небольшом числе импульсов плазмы (расстояние от анода до мишени ≈ 25 мм) наблюдаются области расплава в виде отдельных небольших зон повреждения (рис. 2 а, 3 а, 4 а, 5 а). Общий размер области повреждения обычно составляет примерно 8–10 мм (отмечена кольцом). Таким образом, картина расплава указывает на то, что плазменный поток не является гомогенным образованием и состоит из отдельных струй. С увеличением числа импульсов, независимо от типа металла, возникают кольцевые структуры: внешнее кольцо, соответствующее размеру катода $\phi \approx 50$ мм, и внутреннее кольцо, соответствующее диаметру анода $\phi \approx 30$ мм (рис. 2 б, 3 б, 4 б, 5 б). В случае ферромагнитного материала (сталь Ст3) и нержавеющей стали типа 12Х18Н10Т (рис. 4 б, 5 б) видны тонкие пересекающиеся нити в расплавленном металле, которые сходятся в центре пятна расплава размером ≈ 8 –10 мм, что примерно соответствует размеру основания конусного отверстия в аноде. На краю области воздействия плазмы

порядка размеров анода ($\phi \approx 30$ мм) тонкие нити расплава изгибаются. Для сплава типа АМг (парамагнетик) наблюдаются прямые пересекающиеся нити (рис. 2 б). На меди (диамагнетик) линий не наблюдалось (рис. 3 б). С увеличением расстояния от анода до мишени (≈ 50 мм) и при том же количестве импульсов плазмы (≈ 50 импульсов) картина расплава заметно меняется (рис. 2 с, 3 с, 4 с, 5 с). Область воздействия плазмы на поверхности всех металлов размывается, наблюдаются перемещения отдельных зон воздействия плазмы на значительное расстояние от центра, нитевидные структуры практически исчезают. Диаметр области возможного воздействия плазмы на расстоянии $x = 50$ мм составляет приблизительно 80 мм.

На рис. 6 представлены результаты профилометрических измерений облученных поверхностей образцов. На рис. 6 е показан образец из нержавеющей стали во время профилометрических измерений. На рис. 6 а–д слева направо изображены дополняющие друг друга результаты данных измерений для различных образцов: цветовая карта высот поверхности (размер области соответствует размерам, показанным на правом рисунке); поверхностный профиль вдоль выбранной линии (линия показана на левом рисунке и оканчивается двумя треугольниками); поверхностная 3D-карта. На всех четырех рисунках (а–д) линия, вдоль которой фиксировался поверхностный профиль, располагалась перпендикулярно радиусу зоны облучения. Работа профилометра основана на отражении белого света от исследуемой поверхности и учете его интерференции. Черные области на левых рисунках соответствуют местам, с которых отраженный свет не был зарегистрирован прибором вследствие сильного наклона исследуемых мест на поверхности образца относительно падающего света. Стоит отметить, что на подобном приборе не так-то просто поймать отраженный сигнал от металлических образцов, тем более если поверхность имеет сильно неоднородный рельеф, и к тому же образцы не являются плоскопараллельными вследствие воздействия высоких температур. Тем не менее нам удалось подобрать необходимое увеличение и добиться фиксирования сигнала с большей части исследуемой поверхности всех образцов. В результате была получена интересующая нас информация о высоте/глубине исследуемого рельефа, а также о периоде между проявленными линиями на поверхности (см. таблицу).

Все профилометрические измерения проводились приблизительно на расстоянии 10 мм от центра каждого образца.

Таблица. Данные по профилометрии. Размерность всех величин таблицы — мкм. *PV* — расстояние от самой верхней точки рельефа до самой нижней (двойная амплитуда); *rms* — среднеквадратичное отклонение от средней величины; *Ra* — среднеарифметическое отклонение от средней величины; *T* — период повторения линий/рельефа на поверхности

| Материал | <i>PV</i> | <i>rms</i> | <i>Ra</i> | <i>T</i> |
|-----------|-----------|------------|-----------|----------|
| 12Х18Н10Т | 20 | 5 | 4 | 236 |
| Сплав АМг | 113 | 13 | 11 | 800 |
| Сталь Ст3 | 32 | 5 | 4 | 480 |
| Сu | 6 | 2 | 2 | 420 |

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 4 *b*, 5 *a*, *b* присутствуют нити расплава (нитевидные структуры), завернутые как по часовой стрелке вокруг оси *z*, так и против нее. Этот эффект поворота оказался весьма нетривиальным в плане его объяснения. В связи с этим хотелось бы описать возможные факторы, которые могли бы быть причинами возникновения обнаруженного эффекта поворота нитей расплава. Чтобы определить истинную причину наблюдаемого поворота, необходимы дальнейшие исследования.

Гипотеза 1: магнитные поля от токовых филаментов, которые образуют ТПО. Поворот может быть связан с периодическим изменением направления тока во время разряда в ПФ. На рис. 7 изображены два случая распределения магнитных полей вокруг ТПО: когда на аноде «+», когда на аноде «-». Стоит отметить, что если представить ТПО в форме равномерно распределенного тока по поверхности условного тора, то магнитное поле над ТПО должно быть равно нулю; но если ТПО состоит из отдельных токовых филаментов, между которыми есть промежутки, то через них магнитное поле от ТПО может проникать наружу и оказываться в пространстве над ТПО (вне тора), как это и изображено на рис. 7. Таким образом, можно считать, что эти магнитные поля от токовых филаментов, из которых состоит ТПО, оказывают влияние на близко расположенную к ним поверхность образца, которая сначала плавится (плазменным и ионными потоками) и испытывает ударное воздействие, затем возвращается в твердое состояние, проявляя картину находящегося рядом магнитного поля. Поскольку от импульса к импульсу меняется и коли-

чество токовых филаментов в ТПО, и их геометрическое положение вокруг центральной оси *z*, вполне логично, что такая симметричная картина со множеством нитей, как, например, на рис. 5 *b*, проявляется не сразу, а начиная с определенного количества импульсов — это обстоятельство показывает сложность (или невозможность) проявления такой картины при одиночном импульсе. То есть с увеличением числа импульсов набирается статистика по появлению филаментов по всему кругу ТПО вокруг оси *z*, которые и проявляются потом на образце.

После того как поверхность мишени нагрелась до температуры плавления, на мишень воздействует ударная волна, которая вызывает расплескивание расплава по поверхности от центра к периферии (в том же направлении, в котором распространяется ударная волна). Расплавленный металл при своем движении формирует периодически повторяющуюся структуру (видимо, это выгодно) нитей: между нитями из расплава образуется пустое пространство, размер которого равен размеру самих нитей.

Возможно, что на поверхности ферромагнетика (а также нержавеющей стали, в состав которой входит железо) имеет место ориентация нитей расплава вдоль условных силовых линий магнитного поля (совпадают по направлению с вектором магнитной индукции), которое связано с филаментами электрического тока при схождении ТПО (более детального объяснения этого момента сейчас у нас нет, но экспериментальные данные разных авторов показывают, что расплав способен реагировать на магнитное поле — см. конец статьи). Количество нитей на многократно облученном образце составляет $\approx 220\text{--}250$ шт. (для образца на рис. 5 *b* число филаментов, завернутых по часовой стрелке ≈ 250 шт., против часовой ≈ 220 шт. — подсчет проводился в области возле внутреннего кольца). Мы знаем максимальный ток разряда, равный 255 кА. Если предположить, что весь ток протекает по ТПО (нет нежелательных потерь), а также равномерное распределение тока по всем филаментам, то можно оценить величину тока в одном филаменте: $255/250 = 1.02$ кА. Как мы уже упоминали, вряд ли в каждом импульсе имеются 250 филаментов, ранее проведенные экспериментальные исследования ТПО показывают, что, как правило, ярких филаментов обычно около 10 шт. Получаем $255/10 = 25.5$ кА. Таким образом, оценки показывают, что сила тока в каждом филаменте зависит от их количества и лежит в диапазоне 1–25 кА. В то же время количество филаментов возле оси *z* меньше, чем на периферии: там одиночные филаменты рас-

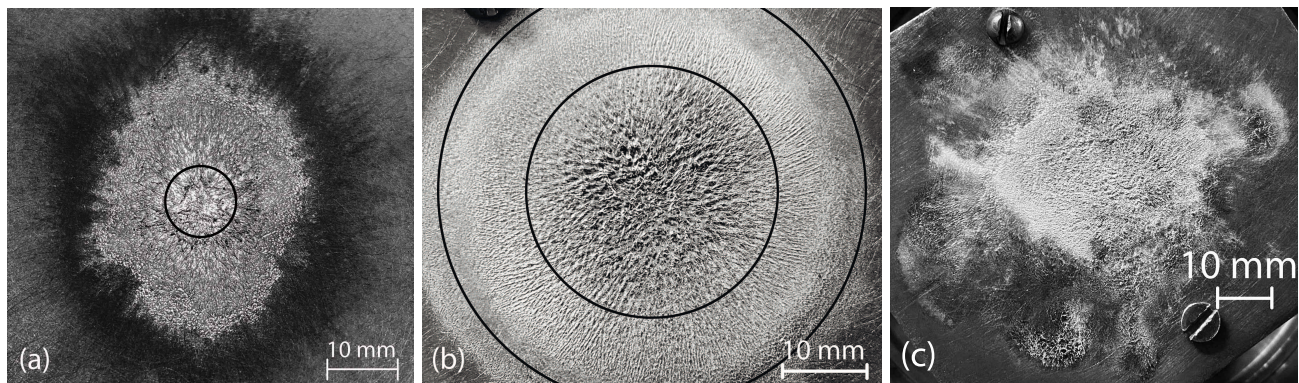


Рис. 2. Воздействие азотной плазмы на мишень из алюминиевого сплава типа АМг: *a* — число импульсов $n = 1$, расстояние от анода до мишени $x = 25$ мм; *b* — $n = 10$, $x = 25$ мм; *c* — $n = 20$, $x = 50$ мм

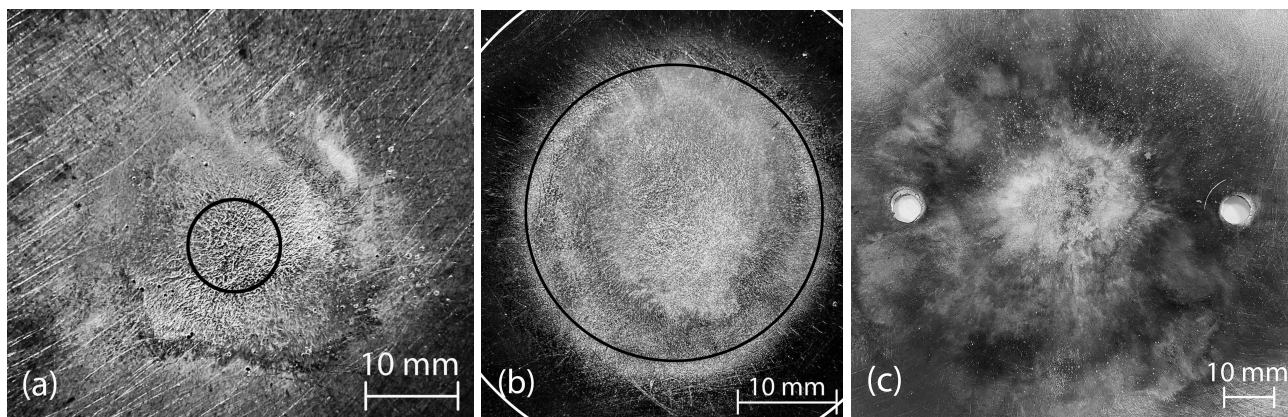


Рис. 3. Воздействие азотной плазмы на мишень из меди: *a* — $n = 2$, $x = 25$ мм; *b* — $n = 60$, $x = 25$ мм; *c* — $n = 60$, $x = 50$ мм

щепляются на несколько штук (расщепление можно наблюдать на рис. 4 работы [14], похожее расщепление претерпевает ток в сферических плазменных лампах [15] возле внешней сферы).

При близком расположении мишени (25 мм) из стали Ст3 или из нержавеющей стали 12Х18Н10Т магнитное поле от филаментов проникает в металл и ориентирует капли расплава по полю (вдоль условных силовых линий магнитного поля), что и определяет наблюдаемую картину разлета капель расплава при воздействии плазмы. Для парамагнетиков (исключение — нержавеющая сталь) и диамагнетиков такой картины не наблюдается. Собственно, роль плазмы сводится к плавлению поверхности металла и частичному испарению некоторого количества мелких фракций металла. Формирование же картины воздействия определяется внешними магнитными полями. Таким образом, условные силовые линии магнитного поля от токовых филаментов (образующих ТПО) визуализируются рас-

плавленными каплями металла, обладающего достаточной магнитной проницаемостью. По этому объяснению есть некоторые замечания, а именно: почему эффект усиливается с увеличением числа импульсов (при учете изменения числа филаментов и их расположения картина поверхности должна быть сглажена)? Возможно, образованные во время первых импульсов плазмы нити на поверхности мишени притягивают к себе ближайшие токовые филаменты, возникающие при следующих импульсах, тем самым не позволяя картине смазаться. Еще одно замечание о том, что поворот магнитного диполя по полю не объясняет отклонения этого диполя от прямолинейного движения: возможно, что в данном случае имеет место прецессия магнитного диполя вокруг аксиального магнитного поля (направленного вверх, т. е. перпендикулярно поверхности мишени). Это возможно, но возникают трудности в объяснении того, что поворот нитей наблюдается только в кольце на определенном удалении от оси z , а

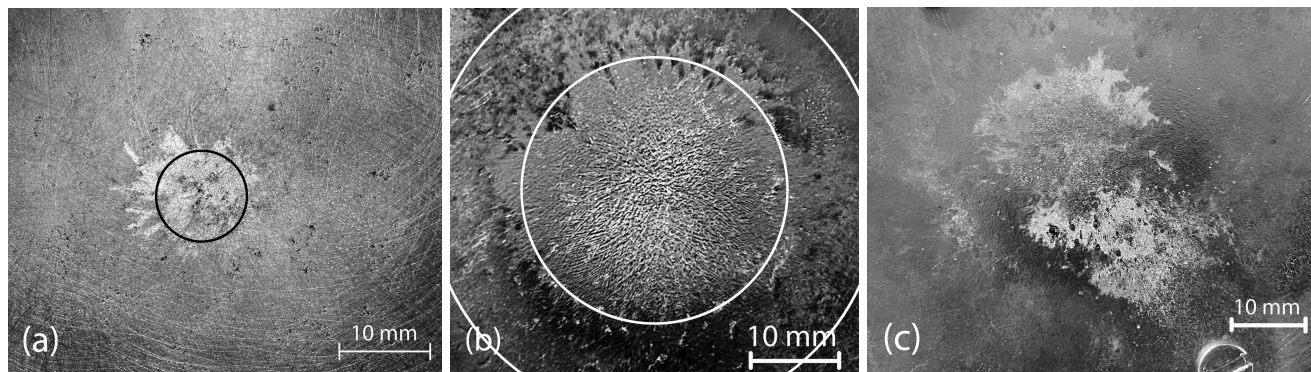


Рис. 4. Воздействие азотной плазмы на мишень из стали Ст3: $a - n = 1, x = 25$ мм; $b - n = 12, x = 25$ мм; $c - n = 20, x = 50$ мм

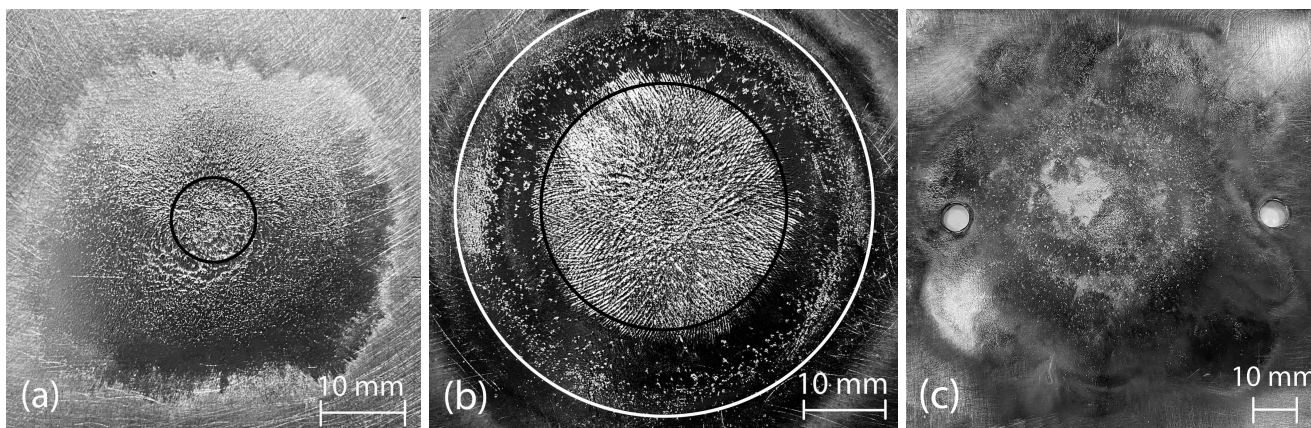


Рис. 5. Воздействие азотной плазмы на мишень из нержавеющей стали типа 12X18H10Т: $a - n = 1, x = 25$ мм; $b - n = 60, x = 25$ мм; $c - n = 60, x = 50$ мм

ближе к центру, где магнитное поле сильнее, нити прямые.

Что в данном случае является причиной возникновения именно нитей расплава: предполагается, что наблюдаемые нити расплава (направленные от центра к краю мишени, прямые у центра и с возможным поворотом на периферии) формируются в результате воздействия на расплав ударной волны, распространяющейся от центра к краю мишени.

Механизм возникновения ударной волны описан в работе [16]: после разрыва пинча возникает плазменный сгусток,двигающийся от анода вверх, создающий волну ионизации и ударную волну. Скорость УВ равна $2 \cdot 10^7$ см/с; электронная плотность плазмы в УВ достигает $4 \cdot 10^{17}$ см⁻³.

Гипотеза 2: ток через образец. Из представленных результатов видно, что на близких расстояниях от анода, около 25 мм, металлические мишени

оказывают сильное влияние на формирование ТПО и плазменного потока. Как показано на рис. 8, токи могут касаться образца и частично протекать через него. Для тока более длинный путь от образца по штоку, а затем по крышке и боковым стенкам разрядной камеры ПФ менее выгоден (большая индуктивность) по сравнению с более коротким путем по уже пробитому и ионизированному промежутку между образцом и катодом (также этому способствует высокое сопротивление оргстекла, на много порядков превышающее сопротивление пробитого промежутка). Таким образом, мы наблюдаем круговые следы (линии/нити) от токовых филаментов, составляющих ТПО. На ферромагнетике (рис. 4 *b*), как и на нержавеющей стали (рис. 5 *a, b*), наблюдаются ровные, направленные из центра вдоль радиуса нити в расплаве, завернутые на периферии по часовой стрелке или против нее вокруг оси z . На парамагнитной мишени (образцы АМг, представленные

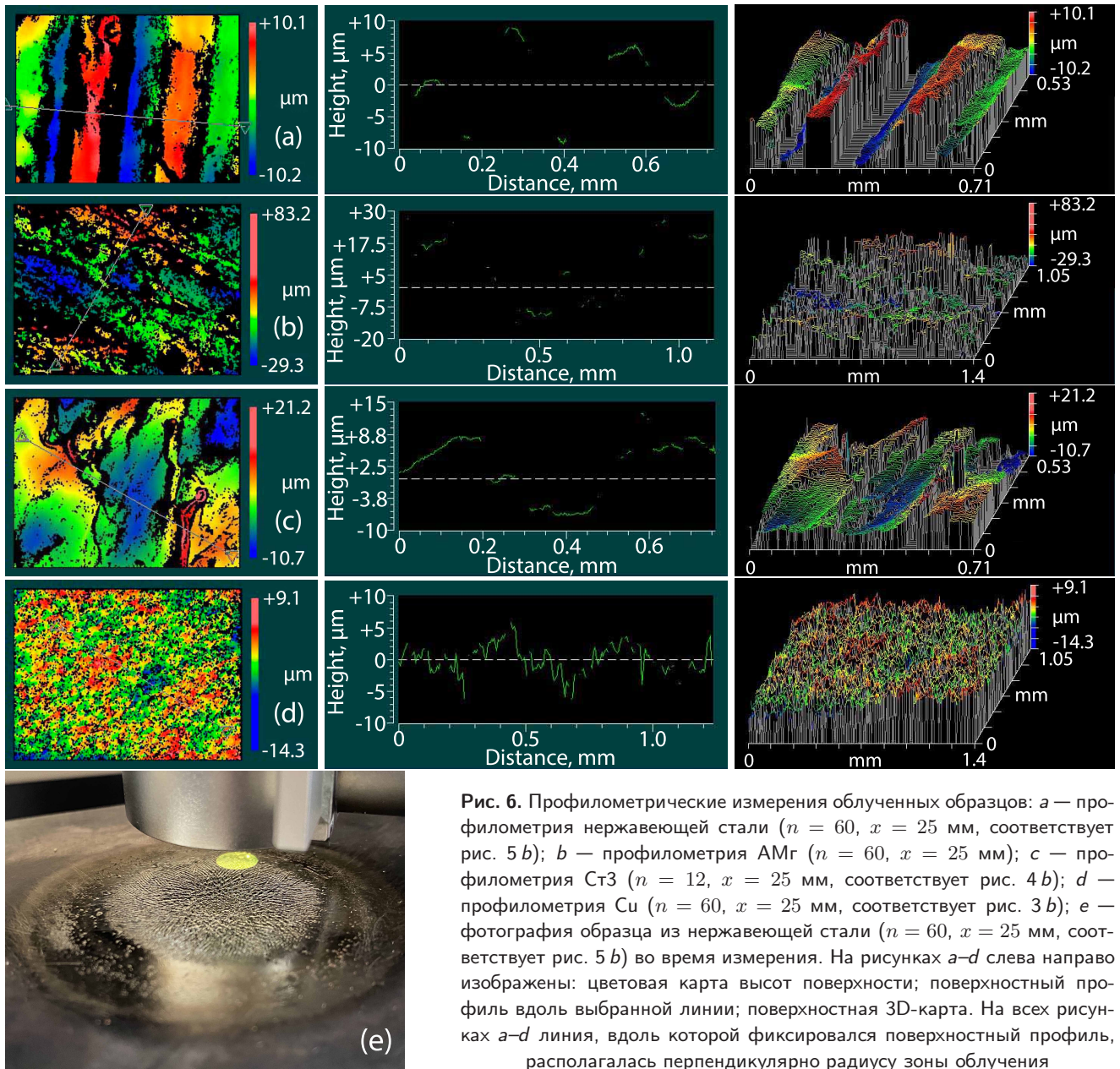


Рис. 6. Профилометрические измерения облученных образцов: *a* — профилометрия нержавеющей стали ($n = 60$, $x = 25$ мм, соответствует рис. 5 *b*); *b* — профилометрия АМг ($n = 60$, $x = 25$ мм); *c* — профилометрия Ст3 ($n = 12$, $x = 25$ мм, соответствует рис. 4 *b*); *d* — профилометрия Cu ($n = 60$, $x = 25$ мм, соответствует рис. 3 *b*); *e* — фотография образца из нержавеющей стали ($n = 60$, $x = 25$ мм, соответствует рис. 5 *b*) во время измерения. На рисунках *a–d* слева направо изображены: цветовая карта высот поверхности; поверхностный профиль вдоль выбранной линии; поверхностная 3D-карта. На всех рисунках *a–d* линия, вдоль которой фиксировался поверхностный профиль, располагалась перпендикулярно радиусу зоны облучения

на рис. 2 *a, b*) видны прямолинейные следы (без поворота на периферии). Таким образом, можно сделать вывод, что нити в расплаве металла формируются токовыми филаментами, которые под действием аксиального магнитного поля (направленного вертикально, т.е. перпендикулярно поверхности образца) заворачиваются. Ферромагнетик увеличивает напряженность этого поля и тем самым усиливает эффект искривления нитей (в нашем случае плавится только поверхностный слой мишени, оставшаяся нерасплавленной часть сохраняет свои ферромагнитные свойства). Аксиальное магнитное

поле в ПФ образуется за счет турбулентных процессов в плазме [17].

Остается открытым вопрос: каким образом нержавеющая сталь может усиливать напряженность магнитного поля так же, как ферромагнетик?

Гипотеза 3: поворот плазмы. При протекании тока разряда в окрестности анода вокруг оси z формируется вихревое магнитное поле (возникающее при протекании тока разряда через металлическую мишень и ТПО), которое сжимает плазменный поток и вызывает его вращение. Эти соображения подтверждаются экспериментально при наблюдении

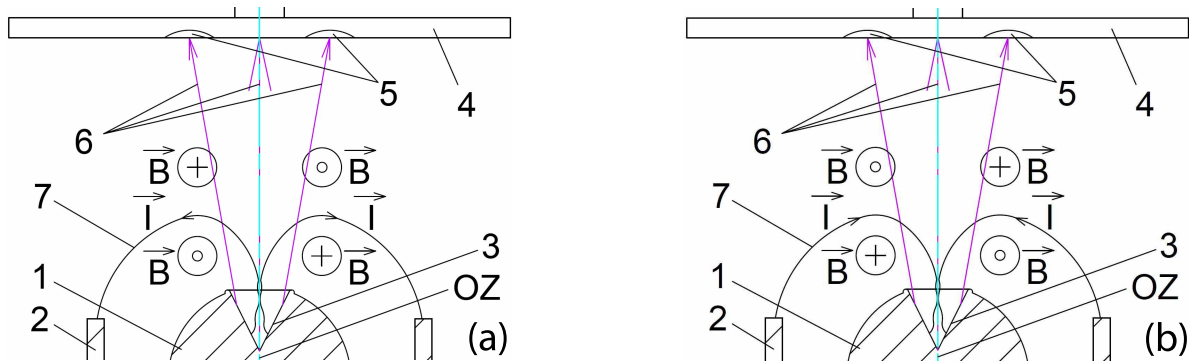


Рис. 7. Изменение направления тока в ТПО: *a* — одно направление тока (когда на аноде «+»), *b* — противоположное направление тока (когда на аноде «-»): 1 — анод, 2 — катод, 3 — конусное отверстие в аноде, 4 — мишень (образец), 5 — кольцевая зона (отмечена дугами на мишени), находящаяся напротив вершины изогнутой ТПО, именно в этой зоне отчетливее всего проявляется поворот расплава вдоль линий магнитного поля, 6 — импульс (поток) плазмы, 7 — ТПО (разрядный ток)

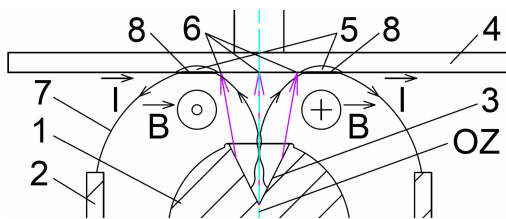


Рис. 8. Замыкание части разрядного тока через металлическую мишень: обозначения 1–7 аналогичны представленным на рис. 7; 8 — скин-слой, по которому протекает ток, который также может протекать по вылетевшей из мишени плазме. Направления токов в ТПО и магнитных полей между анодом и образцом в условиях, когда на аноде «+»

интегральной картины свечения плазмы с помощью электронно-оптического преобразователя [14]. Как видно из рис. 9, плазменный поток может иметь правое и левое вращение.

Здесь мы хотели рассмотреть влияние плазмы на металл: могут ли частицы закрученной плазмы оставлять такие следы, как на рис. 4 *b*, 5 *a*, *b*. Скорее всего, не могут, так как то, что мы видим на рис. 9 *a* или на рис. 9 *b* — интегральная картина одного разряда, и если многократное чередование право- и левозакрученных импульсов могло бы объяснить рис. 4 *b*, 5 *b*, то результат воздействия одиночного импульса, показанный на рис. 5 *a*, нельзя объяснить воздействием одного импульса, закрученного в одну сторону.

Таким образом, наблюдаемое искривление нитей расплава в случае металлов, обладающих ферромагнетизмом, может быть связано с захватом частиц

расплава магнитным полем. В случае парамагнитных металлов капли расплава не взаимодействуют с магнитным полем и их разлет наблюдается в виде тонких прямых нитей (исключение — нержавеющая сталь). Как отмечалось выше, для некоторых металлов наблюдается характерная картина пересечения нитей расплава (рис. 4 *b*, 5 *a*, *b*). Сначала, когда достигается максимальный ток разряда, формируется магнитное поле одного направления. За счет синусоидальной формы зависимости тока (или производной тока) от времени, в определенный момент направление тока меняется на противоположное, а вместе с этим изменяет свое направление и магнитное поле. Возможно, по этой причине пересечение нитей расплава на образце из нержавеющей стали 12X18H10T наблюдается даже при воздействии одного импульса плазмы (рис. 5 *a*).

Гипотеза 4: магнитные поля от вертикальных ионных и электронных потоков. Стоит отметить, что при расстоянии между анодом и образцом 25 мм установка ПФ также выходила в режим с яркой особенностью (амплитуда «особенности», описанная во Введении, была сравнима по величине с амплитудой синусоидального сигнала производной тока). А наличие особенности говорит нам о возникновении электронного и ионных вертикальных потоков между анодом и образцом. Магнитные поля от этих потоков могут влиять на токи, протекающие по ТПО и по поверхности образца при близком его расположении возле анода, и отталкивать эти токи от анода к образцу силой Лоренца. Поворот в плоскости образца это никак не объясняет. К тому же «особенность» строго ограничена в узком временном промежутке (десятки наносекунд) и в это вре-

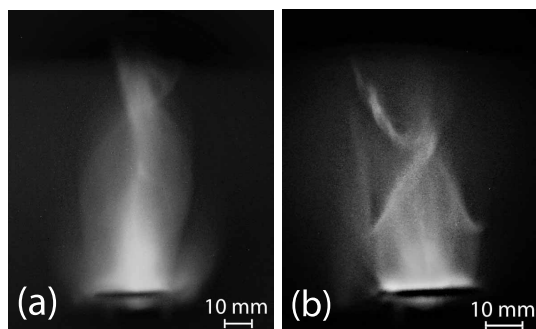


Рис. 9. Вращение плазменного потока в собственном магнитном поле, индуцированном током разряда на установке ПФ-4 [14] (ФИАН): *a* — левое вращение; *b* — правое вращение

электронный и ионные пучки не меняют своего направления на противоположное. Но мы наблюдаем поворот расплава как по часовой стрелке, так и против нее, поэтому вряд ли электронный и ионные пучки могут являться причиной поворота расплава на поверхности облученных образцов. Они лишь могут внести существенный вклад в нагрев анода и образца.

Магнитные поля, создаваемые ионными или электронными пучками, направленными вертикально, будут ослаблять магнитные поля, находящиеся выше ТПО, и усиливать магнитные поля от ТПО, находящиеся между ТПО и наконечником анода.

Конечно, бывают случаи со множественными «особенностями» во время одного импульса (как, например, в случае образца из Cu на рис. 3*a*), но, например, в случае нержавеющей стали, показанном на рис. 5*a*, во время первого импульса наблюдалась единственная «особенность» и при этом наблюдается поворот расплава в обоих направлениях вокруг центра. Это подтверждает предположение о том, что электронный и ионные пучки не влияют на поворот расплава сразу в обе стороны вокруг оси.

Практическое применение обнаруженного поворота нитей в расплаве. По обнаруженному эффекту были получены два патента: № 2793615 от 15.03.2022 (Способ определения распределения магнитного поля) и № 2793610 от 17.06.2022 (Способ определения магнитных свойств материала).

Похожие результаты в литературе. Наиболее близкими к нашим результатам оказались результаты работы [18], в которой расплавленный диск металла принимал различные фиксированные геометрические формы в зависимости от параметров воздействующего на него магнитного поля. В частности, автор этой работы исследовал изменение

формы расплавленного диска металла в зависимости от величины тока в индукторе, создающем это внешнее магнитное поле, и частоты внешнего магнитного поля, и показал, что изначально имеющий круглую форму расплавленный диск металла с увеличением тока индуктора и частоты внешнего магнитного поля изменяет свою форму сначала в однолепестковую, потом в двух-, трех- и четырехлепестковую, при дальнейшем повышении параметров капля распадается на две и более отдельные капли, также имеющие форму из различного количества лепестков. Кроме того, говорится о том, что лепестки могут быть завернуты либо по часовой стрелке, либо против нее: при одних и тех же условиях все лепестки могут быть повернуты в одном направлении либо в противоположном, а также совершенно в произвольном направлении (разнонаправлены относительно друг друга). Причем не установлено, от чего зависит поворот лепестков по часовой стрелке или против нее. Высказано предположение о возможном влиянии соприкосновения жидкого расплава с ограничивающими его в пространстве материалами (в частности — стеклом).

Еще один близкий по форме, но не по причинам, результат приведен в работе [19]. В этой работе представлена поверхность кремния после воздействия на нее излучения с поляризацией различной формы. В частности, на рис. 8*c* в [19] можно увидеть похожую структуру поверхности с нитями, завернутыми по спирали вокруг центра, полученную в результате облучения поверхности кремния излучением со спиральной поляризацией. Несмотря на то, что морфология поверхности имеет схожую структуру с той, которая описана в нашей работе, причина, ее вызывающая, совершенно иная.

Интересные результаты представлены в работе [20], в которой поверхность металлов (W , сталь, Nb , Cu , Al) подвергалась примерно на 2 порядка более мощному плазменному воздействию (на установке КСПУ-Т, энергозапас ≈ 600 кДж), чем у нас (ПФ-5, 3.24 кДж). Хотя аналогичных завернутых нитей расплава в работе [20] и не было обнаружено (либо из-за колоссальной разницы во вносимой в мишень энергии, либо из-за отсутствия магнитного поля в области мишени), зато интересны фотографии, показывающие разлет каплей расплава от мишени в окружающее пространство. Видно, что разлет каплей зависит от типа материала, и важно то, что капли от Al -мишени разлетаются симметрично из центра воздействия и летят по прямым траекториям, а капли от стальной мишени разлетаются более хаотично.

Еще одна работа [3], проведенная на той же установке КСПУ-Т, интересна тем, что на поверхности нержавеющей стали были получены похожие завернутые нити расплава, но в данном случае поворот нитей связан с вращающейся с постоянной скоростью мишенью (с центробежной и кориолисовой силами — как следствие вращения). Авторы определили скорость и ускорение расплава на различных расстояниях от оси плазменного потока.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучена морфология расплава на поверхности металлических мишеней: алюминиевый сплав типа АМг, медь электротехническая, сталь Ст3 и нержавеющая сталь типа 12Х18Н10Т, облученных импульсами азотной плазмы на установке ПФ-5. Обнаружено, что картина воздействия плазмы на мишени существенно зависит от свойств металла, расстояния от анода до мишени и числа импульсов плазмы. На близких расстояниях (≈ 25 мм) морфология расплава существенно зависит от свойств металла (ферромагнетик, парамагнетик и др.).

Для ферромагнетика (сталь Ст3) наблюдается искривление линий разлета капель расплава вблизи края зоны воздействия плазмы. Аналогичная картина наблюдается и для нержавеющей стали 12Х18Н10Т (интересно, что ни до, ни после облучения образец из нержавеющей стали не проявлял магнитных свойств — не магнитился к ферритовому магниту размерами $120 \times 80 \times 16$ мм³). Для Al (парамагнетик) сохраняется картина прямолинейного разлета капель расплава. На поверхности Cu (диамагнетик) нитей не наблюдалось. Это связано с тем, что порог плавления нержавеющей стали меньше, чем у меди (0.3 МДж/м² у нержавеющей стали и 0.6 МДж/м² у меди) [3], несмотря на то, что температура плавления у нержавеющей стали выше, чем у меди ($\approx 1400^\circ\text{C}$ и 1085°C соответственно). Следы от разлетающихся из центра к краю частиц прямые, изгибов нет. Возможно, что для возникновения подобных нитей расплава на поверхности меди необходимо более мощное воздействие.

В статье описаны возможные причины, приводящие к образованию изогнутых тонких нитей расплава на поверхности ферромагнетиков.

Результаты эксперимента позволяют заключить, что на установках ПФ существует оптимальное расстояние от анода до мишени, когда импульсы плазмы сосредоточены вблизи оси z установки. Именно на таком расстоянии можно получить схожие кар-

тины поворота расплава, представленные в данной работе. Также именно на этом расстоянии целесообразно проводить эксперименты, требующие повторяемости или сравнения между собой. Для установок ПФ-4 и ПФ-5 (ФИАН) это расстояние около 30 мм и менее. При этом область наиболее интенсивного воздействия плазмы приблизительно 10 мм. На других установках это расстояние следует определять экспериментально.

При удалении мишени на расстояния около 50 мм и более влияние типа металла на морфологию расплава практически отсутствует; общая зона воздействия плазмы на поверхности мишеней увеличивается, появляются новые области (от разных импульсов), расположенные хаотично по всей поверхности мишени.

Для всех металлов при большом числе импульсов плазмы наблюдается постоянный размер кольца внешней области воздействия ≈ 50 мм (примерно соответствует диаметру катода, см. внешнюю кольцевую метку на рис. 2 b, 3 b, 4 b, 5 b). Ядро области воздействия плазмы ≈ 30 мм (примерно соответствует диаметру анода, см. внутреннюю кольцевую метку на рис. 2 b, 3 b, 4 b, 5 b). Это означает, что наблюдаемая картина взаимодействия тесно связана с геометрическими размерами анодно-катодного узла установки и с процессами электрического разряда, происходящими между анодом и катодом.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Н. Г. Борисенко (ФИАН) за предоставленную возможность работы на профилометре ZYGO NewView 6k.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. И. Иванов, В. Н. Пименов, В. А. Грибков, ФХОМ **1**, 23 (2009).
2. R. S. Rawat, J. Phys.: Conf. Ser. **591**, 012021 (2015).
3. И. М. Позняк, В. М. Сафронов, В. Ю. Цыбенко, ВАНТ, сер. Термоядерный синтез **39**, 15 (2016).
4. В. Н. Колокольцев, В. Я. Никулин, П. В. Силян и др., Физика плазмы **50**, 306 (2024).
5. С. Ф. Гаранин, Г. В. Карпов, В. И. Мамышев и др., XXXI Звенигор. конф. по ФП и УТС (2004).
6. А. В. Ивановский, А. Е. Калинычев, Г. В. Карпов, Физика плазмы **47**, 109 (2021).
7. А. А. Ерискин, *Воздействие высокотемпературной импульсной плазмы на физико-механические*

- свойства композиционных структур*, Дисс. ... канд. техн. наук, Москва, НИУ «ВШЭ» (2017).
8. V. A. Evtikhin, I. E. Lyublinsky, A. V. Vertkov et al., *Nukleonika* **46**, 113 (2001).
 9. S. P. Eliseev, V. Ya. Nikulin, A. V. Oginov, and A. A. Tikhomirov, *Prob. Atom. Sci. Technol., Ser.: Plasma Phys.* **12**, 147 (2006).
 10. V. D. Ivanov, V. A. Kochetov, M. P. Moiseeva et al., *Plasma Phys. Control. Nucl. Fusion Research, IAEA* **2**, 161 (1981).
 11. *Физические величины. Справочник*, Энергоатомиздат, Москва (1991).
 12. А. Л. Великович, М. А. Либерман, *Физика ударных волн в газах и плазме*, Наука, Москва (1987).
 13. V. Ya. Nikulin, P. V. Silin, A. A. Eriskin et al., in *Int. Conf. on Research and Applic. of Plasma*, 56 (2019).
 14. В. Я. Никулин, С. Н. Полухин, А. А. Тихомиров, *Физика плазмы* **31**, 642 (2005) [V. Ya. Nikulin, S. N. Polukhin, and A. A. Tikhomirov, *A Simple Criterion for the Snowplowing Efficiency of the Working Gas in a Kj Plasma Focus*, *Plasma Phys. Rep.* **31**, 591 (2005), DOI:10.1134/1.1992586].
 15. *Википедия: плазменная лампа* [Электронный ресурс], https://ru.wikipedia.org/wiki/Плазменная_лампа (дата обращения: 21.01.2025).
 16. С. Н. Полухин, А. Е. Гурей, А. А. Ерискин и др., *Кратк. сообщ. по физике ФИАН* **6**, 30 (2017) [S. N. Polukhin, A. E. Gurei, and A. A. Eriskin, *Observation of the Ionization Wave and the Shock Wave Ahead of the Plasma Jet Generated in the Plasma Focus Discharge*, *Bull. of the Lebedev Physics Institute* **44**, 173 (2017), DOI:10.3103/S1068335617060057].
 17. S. K. H. Auluck and A. B. Blagoev, *Fund. Plasma Phys.* **4**, 100012 (2023).
 18. M. Conrath, *Dynamics of Liquid Metal Drops Influenced by Electromagnetic Fields*, Dissertation for the Degree of Phd, Mechanical Engineering Faculty, Techn. Univ. Ilmenau (2006–2007).
 19. J. Bonse and St. Graf, *Laser Photon. Rev.* **14**, 2000215 (2020).
 20. И. М. Позняк, Н. С. Климов, В. Л. Подковыров и др., *ВАНТ, сер. Термоядерный синтез* **4**, 23 (2012).