

УДК 537.527

## Возбуждение и воздействие микроплазменных разрядов на металлы и сплавы в плазме сверхвысокочастотного факела

В. А. Иванов

Институт общей физики РАН, Москва, Россия

*Настоящая работа посвящена исследованию механизмов плазмообразования на металлах и сплавах, помещенных в плотную и горячую плазму, вследствие возбуждения на их поверхности микроплазменных разрядов или униполярных дуг. Изучалась связь структуры и состояния поверхности металлов с процессами, приводящими к возбуждению и локализации таких микроплазменных разрядов. Определялись критические параметры импульсного потока плазмы, превышение которых приводило к возбуждению микроразрядов на поверхности различных металлов и сплавов с высокой степенью вероятности. Исследовался характер эрозионных процессов на некоторых металлах и сплавах. Для генерации плазмы использовалось мощное (мегаваттного уровня) импульсное (длительностью 1–20 мкс) микроволновое излучение. Взаимодействие плазмы с металлами приводило к возбуждению микроразрядов на их поверхности, к плавлению локальных участков поверхности металлов и изменению структуры металла в них. Такого рода воздействия представляют интерес с точки зрения фундаментальной физики и для разработки технологии упрочнения изделий из металлов и сплавов. Процесс упрочнения в этом случае состоит в возбуждении импульсных микроплазменных разрядов, локализующихся на структурных нарушениях и микропримесях в поверхностных слоях материалов. Многократное воздействие микроразрядов на изделие из металла приводит к существенному снижению концентрации поверхностных дефектов и повышению прочности его поверхностного слоя. Направление исследований весьма актуально и открывает новые возможности практического применения.*

Первой основополагающей работой по возбуждению микроплазменных разрядов (униполярных дуг), приводящих к появлению локальных участков переплавленного материала на поверхности металлических образцов, помещенных в плазму, является работа А. Робсона и П. Тонемана [1]. В работе изложена элементарная теория униполярной дуги в плазме и реализован эксперимент по наблюдению дуг в ртутной плазме высокочастотного разряда. Теоретическая модель униполярной дуги построена на основе теории Д. Бома для приэлектродных слоев [2]. В соответствии с этой моделью металлическая пластинка, помещенная в плазму, принимает на себя поток ионов и электронов (рис. 1). Если пластинка не испускает в плазму никаких частиц, т. е. на ней отсутствуют центры эмиссии (процессами вторичной электронной и ионной эмиссии в простейшей модели пренебрегается) и отсутствуют пути ухода заряда (пластинка изолирована), то вблизи ее поверхности устанавливается баланс токов электронов и ионов из плазмы. Поскольку скорости ионов в неизотермической плазме (плазма считается неизотермической при температуре электронов  $T_e$ , существенно выше температуры ионов  $T_i$ , т. е. при  $T_e \gg T_i$ ) существенно меньше скоростей электронов, то этот баланс установит-

ся на уровне, близком по величине к ионному току. При этом вблизи пластинки возникает электрическое поле (вектор электрического поля направлен по нормали к поверхности), ограничивающее ток электронов до уровня ионного. Пластика принимает потенциал  $V_f$  (называемый плавающим) по отношению к потенциалу плазмы (обычно принимаемый за нулевой), величина которого удовлетворяет соотношению:

$$en_i v_i \approx en_e v_e \exp(-V_f/T_e),$$

где  $v_e = (T_e/2\pi m_e)^{1/2}$ ;  $v_i = (2T_e/m_i)^{1/2}$ ;

$e$ ,  $m_e$  — заряд и масса электрона, соответственно;

$m_i$  — масса ионов плазмы;

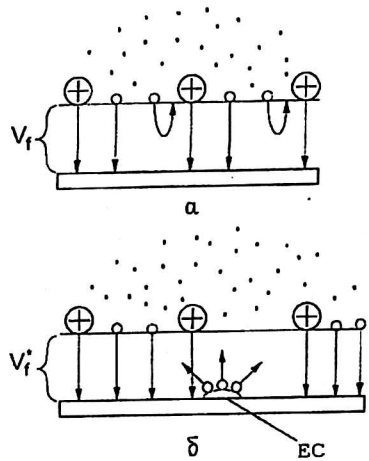
$T_e$ ,  $T_i$  — электронная и ионная температуры плазмы в энергетических единицах, соответственно;

$n_e$ ,  $n_i$  — концентрации электронов и ионов плазмы, соответственно;

$v_e$ ,  $v_i$  — скорости электронов и ионов, соответственно;

$V_f$  — плавающий потенциал, выраженный в энергетических единицах; заряд ионов плазмы для простоты принят равным заряду электрона ( $e_i = Z_i e = e$ ).

Рис. 1. Схема, поясняющая формирование потоков заряженных частиц в переходном слое между плазмой и металлической пластиной:  
а — при отсутствии эмиссии с поверхности пластины;  
б — при наличии центра эмиссии (ЕС) на поверхности пластины



Отсюда получается значение потенциала пластинки по отношению к потенциалу плазмы:

$$V_f \approx (T_e/2e) \ln(m_i/2\pi m_e).$$

Если на пластинке возникает центр эмиссии (например, катодное пятно по терминологии, применяемой в исследованиях обычных биполярных дуг, или микроплазменное образование, возникшее вследствие взрыва микроострия на поверхности пластинки в электрическом поле или другие процессы, приводящие к появлению локального центра эмиссии) или идет процесс сильной вторичной электронной эмиссии с пластинки, т. е. пластинка эмитирует в плазму электроны, то в этом случае величина потенциала пластинки  $V_f^*$  будет определяться с учетом тока эмиссии  $J_3$  и площади пластинки  $S$  следующим выражением:

$$V_f^* \approx (T_e/e) \ln(en_e v_e S/J_3 + en_i v_i S).$$

Между плазмой и пластинкой возникнет циркуляционный ток: из плазмы горячие электроны, преодолевающие задерживающий потенциал  $V_f^*$ , перено-

сят ток на пластинку, а с пластинки вследствие эмиссии “холодные” электроны переносят ток в плазму. Величина циркуляционного тока может быть оценена по формуле

$$J_c = j_e S - j_i S = e S \{ n_e v_e \exp(-V_{jf}^*/T_e) - n_i v_i \} = e n_e (T_e / 2\pi m_e)^{1/2} \{ \exp(-V_{jf}^*/T_e) - \exp(-V_{jf}/T_e) \}.$$

Здесь учтено, что  $n_e \approx n_i$ ,  $n_i v_i = n_e v_e \exp(-V_{jf}/T_e)$ , а  $j_i$  и  $j_e$  — это, соответственно, плотности токов ионов и электронов из плазмы на поверхность пластинки.

В отличие от биполярной дуги, для реализации которой необходимы два электрода и внешний источник напряжения определенной мощности для поддержания тока и напряжения между электродами, здесь не требуется внешних источников, так как источником тока и напряжения для поддержания униполярной дуги является плазма. Очевидно, что плазма должна иметь достаточно высокие параметры (концентрацию заряженных частиц и температуру электронов), чтобы быть в состоянии инициировать и поддерживать униполярный дуговой процесс. Проводя аналогию с биполярной дугой, для поддержания которой необходимы минимальные значения тока и напряжения [3] (для большинства металлов для кратковременного существования дуги и катодных пятен необходимые значения минимального тока лежат в интервале 1–20 А, напряжения ~ 20–100 В), можно сделать оценки минимальной температуры и концентрации электронов плазмы, при которых возможно существование униполярной дуги [4]. Оценки дают значения концентрации  $n_e \approx n_i \sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$  и температуры электронов  $T_e \sim 10 \text{ эВ}$ .

Дугообразование (или микроразряды) на различных материалах изучалось в работах [5–9]. В [7–9] исследования проводились при контроле состояния поверхности исследуемых материалов. Предварительно в сверхвысоком вакууме (остаточное давление воздуха не превышало  $10^{-6}$  Па) образцы металлов и сплавов подвергались очистке за счет внешнего прогрева всей установки в целом и прогрева электронным пучком непосредственно образцов [7, 8] до температуры 2000 К и более (молибден, вольфрам). В ряде исследований в целях выяснения влияния поверхностного состояния материала на дугообразование на поверхность наносились контролируемые окисные пленки [8] или другие загрязнения с последующим изучением характеристик униполярных дуг и эрозионных зон кратеров. При исследовании униполярных дуг в установках типа токамак [7] возникновение униполярных дуг на поверхности металлических образцов наблюдалось в плазме с параметрами: электронная концентрация  $\sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , температура электронов  $\sim 300 \text{ эВ}$ . При этом было обнаружено, что на чистых переплавленных в высоком вакууме металлах (например, на молибдене) процесс дугообразования затруднен. В случае нанесения локальных поверхностных “загрязнений” (например, углеродных или окисных пленок) было установлено, что образование униполярных дуг и связанных с ними эрозионных кратеров, как правило, происходит в тех локальных местах на поверхности металлов, в которых присутствуют загрязнения. В работе [7] в модельной установке с параметрами плазмы  $n_e \approx 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и  $T_e \approx 10 \text{ эВ}$  на чистом молибдене с нанесенным локальным окисным слоем

(100–1000 Å) обнаружено, что образование кратеров происходит в основном на границе пленки или в местах ее разрывов. В работе [7] предложена также модель инициации униполярной дуги при наличии ограниченной и неравномерной по толщине диэлектрической пленки. Инициирование центра эмиссии (“катодного пятна” униполярной дуги) связывалось с наличием изменений во времени потенциала плазмы и возникновением при этом потока

частиц на электрод. Поток приводит к возникновению поверхностных электрических полей, достаточных для пробоя и взрыва пленки в местах ее разрыва или на границе пленка — металл.

В работе [9] приводится материал по исследованию возникновения униполярных дуг на поверхности образцов из различных металлов и сплавов при их взаимодействии с горячей плазмой. Показано, что качество механической обработки поверхности металлов и ее чистота влияют на процесс возникновения униполярных дуг. На поверхности различных металлов исследовались эрозионные, образующиеся в местах формирования катодных пятен, униполярные дуги [6—9]. Как правило, возникающая эрозия представляет собой отдельные кратеры или скопления кратеров с явными следами плавления на поверхности металла. С помощью растрового электронного микроскопа были измерены характерные размеры эрозионных кратеров, которые образовывались в местах возникновения катодных пятен униполярных дуг. На основе микроскопических исследований в [4] выдвинуты предположения, что в области кратеров характерный размер зерен кристаллической структуры металлов уменьшается вследствие плавления и последующего быстрого охлаждения локального участка поверхности металлических образцов.

В работе [6] при изучении эрозионных зон, возникающих на поверхности металлов и сплавов в горячей плазме сверхвысокочастотного (СВЧ) разряда, обнаружено, что образование кратеров имеет определенную привязку к местам деформации поверхности материалов. На основе результатов микроструктурного анализа выдвинуто предположение о привязке областей эрозии к локальным структурным неоднородностям или включениям на поверхности исследуемых материалов. Поскольку образцы металлов и сплавов в [6] механически специальным образом не обрабатывались (полировка поверхности образцов до высокого класса чистоты не производилась), то на поверхности могли существовать микроострия микронного или субмикронного размера. Такие микронные острия в электрическом поле в приповерхностном слое плазмы могли инициировать автоэлектронную эмиссию, переходящую во взрывную электронную эмиссию [10] или термоэмиссию. Взрывная эмиссия впервые была обнаружена Г. А. Месяцем и Д. И. Проскуровским при исследовании электрического пробоя высоковакуумного межэлектродного промежутка. Взрывная эмиссия, как правило, возникает при приложении импульсного высокого напряжения между катодом и анодом, когда среднее в зазоре электрическое поле превышает величину напряженности  $\sim 10^7$  В/см. Исследования [10, 12, 24, 27] выполнялись в широком интервале значений плотности автоэмиссионных токов с импульсами длительностью от нескольких наносекунд до нескольких микросекунд. Обнаружено, что в определенный момент времени происходит разрушение автоэлектронного "острийного" эмиттера собственным автоэмиссионным током, что сопровождается резким возрастанием тока через вакуумный промежуток. Взрыв специально приготовленных микроострий или естественных микровыступов на плоском электроде сопровождается возникновением у поверхности электрода плотного плазменного сгустка, который в сильном электрическом поле в состоянии эмитировать большие токи электронов и тем самым создавать ток между электродами. В дальнейшем распространение плазмы сгустка от катода к аноду с большой скоростью ( $\sim 10^7$  см/с) приводит к полному перекрытию плазмой пространства между катодом и анодом, и, таким образом, происходит электрический пробой промежутка. Одновременно из-за быстрого разделения в плазме зарядов у поверхности электрода (катода) создается большой положительный объемный заряд, который в свою очередь является источником дополнитель-

ного электрического поля вблизи катода. Это дополнительное электрическое поле может инициировать новые центры взрывной эмиссии. Современное состояние проблемы взрывных эмиссионных процессов в сильных электрических полях наиболее полно обобщено в концепции эктонов, сформулированной в работах академика Г. А. Месяца [12].

Таким образом, большинство проведенных ранее исследований связывают возникновение центров эмиссии на металлах в плазме либо с электрической зарядкой и пробоем диэлектрических пленок или загрязнений, либо с возможностью реализации взрывных эмиссионных процессов при больших электрических полях. Наиболее интересна в этом плане работа [6], в которой на основе выполненных исследований сделано заключение о том, что, кроме поверхностных инициаторов на реальных металлах и сплавах с химическими и структурными дефектами, эти включения могут являться инициаторами центров эмиссии. Собственно эрозионная зона и ее свойства для реальных металлов и сплавов не изучены подробно. Несмотря на высказанные интересные предположения о структурных изменениях материалов вблизи кратеров и в зонах эрозии, изучение структуры металлов в этих зонах не проводилось.

Цель представленных в данной статье исследований:

- исследование механизмов возбуждения микроплазменных разрядов на поверхности металлов и сплавов при воздействии импульсного потока плазмы;
- изучение плазменных процессов, определяющих пороги возбуждения микроплазменных разрядов на поверхности металлов и сплавов;
- изучение эрозионных процессов на металлах при возбуждении на их поверхности микроплазменных разрядов;
- изучение изменений структуры и состава металлов и сплавов в зонах эрозии, возникающей в местах локализации микроплазменных разрядов;
- изучение влияния естественных примесных микровключений в поверхностных слоях металлов и сплавов на процессы локализации микроплазменных образований и формирование эрозионных кратеров;
- отработка некоторых видов диагностики для исследования эрозионных зон на металлах и сплавах.

### Экспериментальные условия и методы диагностики

Исследования проводились на установке ИВА [11] в условиях высокого вакуума (остаточное давление газа  $\sim 10^{-3} + 10^{-4}$  Па) в цилиндрической вакуумной камере диаметром 100 см и длиной 300 см (рис. 2). Для создания и нагрева плазмы использовался мощный импульсный поток микроволнового излучения (длина волны  $\lambda = 15$  см, импульсная мощность 1–10 МВт, длительность импульсов 1–20 мкс), который с помощью квазиоптической системы фокусировался в центре камеры в пятно с характерным диаметром 20 см. В состав фокусирующей системы входили рупор, линза и зеркало. Рупор представлял собой усеченный конус, узкая часть которого ( $\varnothing 10$  см) соединялась с переходом от волновода прямоугольного сечения  $12 \times 5,8$  см<sup>2</sup> к волноводу круглого сечения с таким же  $\varnothing 10$  см, а широкая часть вплотную подходила к двояковыпуклой линзе  $\varnothing 60$  см. Для наилучшего согласования рупора и линзы ее поверхности рассчитывались по формулам Френеля с аппроксимацией сферическими поверхностями. Установленное в камере за фокусом линзы сферическое металлическое зеркало  $\varnothing 100$  см и радиусом кри-

визны 60 см позволило дополнительно фокусировать рассеянное плазмой микроволновое излучение.

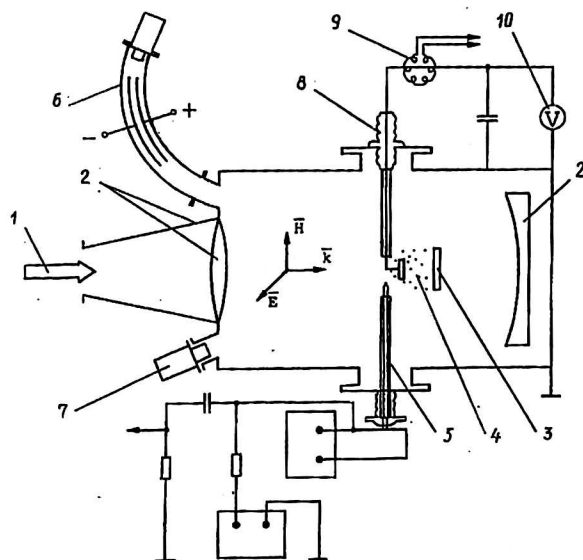


Рис. 2. Схема экспериментальной установки ИВА:

1 — поток микроволнового излучения, подводимый по волноводу; 2 — рупор, линза, зеркало — квазиоптическая система фокусировки микроволнового излучения; 3 — диэлектрическая пластинка, образующая плазму в потоке микроволнового излучения; 4 — плазма микроволнового факела; 5 — накаливаемый ленгмюровский зонд; 6 — электростатический анализатор электронов; 7 — сцинтилляционный рентгеновский датчик; 8 — высоковольтный вакуумированный ввод-держатель образцов; 9 — измеритель тока — пояс Роговского; 10 — электростатический вольтметр;  $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$  и  $\vec{k}$  — ориентация векторов электрического, магнитного полей и волнового вектора потока микроволнового излучения, соответственно

Таким образом, организованная система фокусировки микроволнового излучения в камере позволила достичь величины интенсивности этого излучения в центре фокусного пятна вплоть до значения  $20 \text{ кВт/см}^2$  при импульсной мощности генератора 10 МВт. При уменьшении полной импульсной мощности микроволнового излучения величина интенсивности в фокусе пропорционально снижалась.

Плазма в камере создавалась в условиях высокого вакуума при воздействии потока микроволнового излучения на диэлектрические материалы (кристаллы фторида лития, плексиглас, фторопласт и др.). На первых микросекундах облучения диэлектриков сначала возникал нерезонансный вторично-эмиссионный электронный разряд, который вследствие сильного возбуждения диэлектрика трансформировался в безэлектродный микроволновый пробой [13]. В результате разлета плазмы из канала пробоя и ее взаимодействия с микроволновым излучением за время около 1 мкс формировался плазменный факел [11] с характерным радиусом по уровню критической концентрации ( $n_k = \pi m c^2 / e^2 \lambda^2 \approx 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ , здесь  $m$ ,  $e$  — масса и заряд электрона, соответственно;  $c$  — скорость света в вакууме) около 10 см и с нарастающей электронной плотностью от периферии к центру факела вплоть до значений порядка  $10^{13} \text{ см}^{-3}$ . При взаимодействии микроволнового излучения с плазменным факелом вследствие проявления нелинейных эффектов до 50 % направляемая на факел микроволновая энергия преобразовывалась в энергию горячего

электронного компонента. При этом в плазме факела формировался спектр электронов, который (в зависимости от импульсной мощности микроволнового излучения 1—10 МВт) в диапазоне энергий 50—1000 эВ характеризовался эффективной температурой  $T_e = 100—300$  эВ и неравновесным распределением электронов по энергии в диапазоне 1—20 кэВ [11].

Концентрация и температура плазмы в периферийных областях плазменного факела (в диапазоне значений концентрации  $2 \cdot 10^9$  см<sup>-3</sup>– $5 \cdot 10^{10}$  см<sup>-3</sup>, в диапазоне значений температуры 1—100 эВ) измерялись накалившимся лэнгмюровским зондом по стандартной схеме [14]. Средняя концентрация факела в областях с плотной закритической концентрацией измерялась микроволновым интерферометром на длине волны 8 мм. Температура электронного компонента и энергетические спектры вылетающих из плазменного факела электронов изучались с помощью электростатических анализаторов энергии электронов нескольких типов. С помощью многоканального рентгеновского приемника-анализатора изучался спектр рентгеновского излучения плазмы, оценивались электронная температура и максимальная энергия электронов в факеле [11].

Образцы металлов с характерными размерами (от 1 до 10 см<sup>2</sup>) размещались в плотной плазме факела в тех областях, где концентрация заряженных частиц превышала критическое значение. Образцы крепились на изолированном электроде с помощью проводящего клея на основе аквадага, сопротивление которого не превышало 0,1 Ома. Электрод с закрепленным на нем образцом через подвижный высоковольтный вакуумный ввод соединялся с внешними устройствами, позволявшими измерять потенциал образцов и ток, проходящий между образцом и заземленными стенками вакуумной камеры. В качестве измерителя проходящего через образец электрического тока в некоторых экспериментах использовался калиброванный пояс Роговского, а в качестве измерителя потенциала — компенсированный высоковольтный делитель напряжения. В большинстве экспериментов по изучению локальной эрозии образцов применялась наиболее простая схема измерения тока и потенциала, а именно, во внешней цепи электрода с образцом применялась комбинация конденсатора и электростатического вольтметра типа С-50, с помощью которых можно было измерить количество заряда, протекшее через образец, и рассчитать среднюю за импульс величину тока, проходящего через металлический образец при возбуждении микроплазменных разрядов на его поверхности.

Образцы изготавливались из следующих материалов: нержавеющая сталь марки 12Х18Н9Т, титан (с концентрацией примесей менее 0,1 %), алюминиевый сплав Д16Т, железо (с концентрацией примесей менее 0,1 %). Перед установкой образцов в камеру некоторые из них шлифовались и полировались специальными пастами и доводились до 13-го класса шероховатости поверхности. Обработка поверхности требовалась для последующего микроскопического исследования до и после воздействия. Большинство образцов изготовлялось из листового материала, поверхность которого дополнительно не обрабатывалась. Качество предварительно обработанной и необработанной поверхностей образцов исследовалось на профилографе мод. 252, а также изучалось визуально и с помощью оптических микроскопов типов МБС и МИМ.

Образцы из металлов и сплавов помещали в плазму микроволнового факела, при этом велись визуальные наблюдения за процессами на их поверхности. С помощью фото- и видеоаппаратуры регистрировалось возникновение микроплазменных разрядов на поверхности образцов, проводилось измерение протекших через образец электрических зарядов и токов. Образцы подверга-

ли одно- и многократному воздействию плазмы факела. После возбуждения одного или нескольких микроплазменных разрядов на поверхности образцов они извлекались и исследовались визуально и инструментально. При однократном воздействии эрозия образцов была, как правило, локализована в отдельных областях, площадь которых существенно меньше площади всего образца. При многократном (100 импульсов и более) возбуждении микроплазменных разрядов значительная часть поверхности образцов покрывалась сплошными зонами эрозии. Площадь эрозии могла составлять несколько квадратных сантиметров, при этом на поверхности образцов могли существовать зоны, в которых эрозия полностью отсутствовала. Таким образом, на одном образце можно было одновременно изучать области эрозии по сравнению с теми областями, в которых эрозия отсутствовала.

При воздействии 1000 или более импульсов плазменного факела поверхность образца из металла или сплава, как правило, полностью покрывалась эродированным слоем. Эродированная и исходная поверхности образцов изучались с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ). Для исследования химического состава исходной и эродированной поверхностей образцов использовался метод рентгеновского флуоресцентного анализа. Суть метода состояла в том, что в РЭМ электронный пучок с энергией электронов 25 кэВ фокусировался электростатическими устройствами на поверхности образца в пятно размером около 1 мкм, при этом на образце в области воздействия пучка возбуждалось характеристическое рентгеновское излучение К-серии тех химических элементов, которые входили в состав металла образца. Рентгеновская флуоресценция регистрировалась специальным монохроматором, настроенным на линию исследуемого химического элемента [15]. Сканирование пучка в области эрозии или вне ее позволяло измерять локальные пространственные распределения химических элементов в поверхностных слоях образцов.

Для исследования кристаллической структуры поверхности некоторых образцов до и после воздействия использовался метод электронографии [16]. Скользящий по поверхности пучок электронов (угол падения составлял с поверхностью около 1 угл. град) с энергией 75 кэВ в результате дифракции на кристаллической решетке металла отражался в соответствии с законом Вульфа-Брэгга [17]:

$$2d \sin \varphi = n\lambda_d,$$

где  $d$  — кратчайшее расстояние между двумя соседними плоскостями кристаллической решетки металла;

$\varphi$  — угол скольжения, или половина угла рассеяния;

$n$  — порядок отражения;

$\lambda_d$  — длина волны де Бройля для электронов.

Учитывая конкретную геометрию электронографа ЭР-100 (рис. 3), можно получить следующие выражения для обработки результатов измерений параметров дифракции электронов на кристаллической решетке образцов [18]:

$$\lambda_d = h/mv_e = h/[m(2eV/m)^{1/2}],$$

где  $h$  — постоянная Планка;

$m$  — масса электрона;

$v_e$  — скорость электронов при ускоряющем напряжении  $V$ ;

$e$  — заряд электрона.

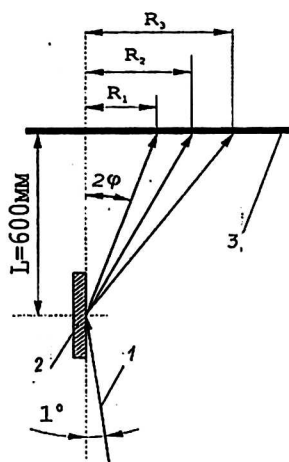
Подставляя в выражение для длины волны де Бройля для электронов константы, получим численное выражение для  $\lambda_d$  в виде

$$\lambda_d \approx 12,236 / (V^{1/2}),$$

где  $\lambda_d$  выражена в ангстремах ( $\text{Å}$ ), а значение ускоряющего напряжения  $V$  — в вольтах. Для конкретного случая, реализованного в наших экспериментах,

получаем: при  $V = 75\,000$  В,  $\lambda_d \approx 0,0447$   $\text{Å}$ . В электронографе ЭР-100 соотношение между радиусом  $R$  дифракционного кольца, регистрируемого с помощью фотопластинки, и расстоянием  $L$  от точки касания пучка на образце до фотопластинки таково, что  $R/L \ll 1$ . При этом для  $L = 600$  мм для дифракции первого порядка ( $n=1$ ) соотношение Брэгга принимает вид

$$2d \sin\varphi \approx 2d \varphi \approx 2d R/2L = dR/L = \lambda_d.$$



**Рис. 3. Схема электронографа ЭР-100:**  
 1 — электронный пучок с углом падения на поверхность металлического образца  $1^\circ$ ; 2 — исследуемый металлический образец; 3 — фотопластинка для регистрации дифракционной картины рассеяния электронов на кристаллической решетке металлического образца

Отсюда получаем выражение для межплоскостных расстояний кристаллической решетки металла в виде

$$d \approx \lambda_d L/R.$$

Соответствующее численное выражение для  $d$  в ангстремах  $\text{Å}$  с учетом конкретных значений, входящих в выражение параметров ( $L$  и  $R$  выражаются в миллиметрах), получается в виде

$$d \approx 26,82/R.$$

Измеряя полученные в эксперименте значения  $R$  и рассчитывая соответствующие им величины  $d$ , можно по табличным данным работ [18, 19] определить элементный, а в некоторых случаях и химический состав металлических сплавов в исследуемой локальной области исходной и эродированной в плазме поверхности образцов.

### Результаты экспериментальных исследований

#### Измерение зарядов и токов в микроплазменных разрядах, возбуждаемых на поверхности металлов

Измерение зарядов, переносимых токами микроплазменных разрядов (униполярных дуг), проводилось по схеме, описанной выше. Подсоединенный к образцу через высоковольтный вакуумный ввод конденсатор соединялся со стенками камеры. Величина емкости конденсатора выбиралась таким образом, чтобы при протекании через образец электронного тока плазмы

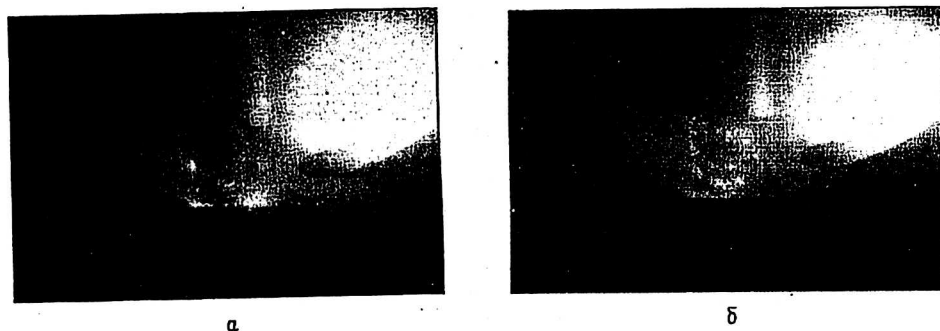
величина напряжения, возникающего на конденсаторе, была бы существенно меньше плавающего потенциала в плазме. Это соображение позволяло измерять протекший через образец заряд, пренебрегая изменением потенциала на образце. В конкретных экспериментах использовался конденсатор с емкостью  $C = 20$  мкФ. Выбор значения емкости конденсатора основывался на оценках и расчетах, приводимых ниже. Максимальная величина электронного тока из плазмы на металлический образец, находящийся под потенциалом плазмы, может быть оценена как  $J \approx en_e v_e S$  (здесь  $e$  — заряд электрона;  $v_e$  — тепловая скорость электронов плазмы;  $n_e$  — плотность электронов плазмы вблизи образца;  $S$  — площадь образца).

При воздействии импульсного сфокусированного микроволнового излучения мощностью 2 МВт и длительностью  $\tau$  до 20 мкс в плазменном факеле (вблизи критической концентрации  $n_e \approx 5 \cdot 10^{10}$  см<sup>-3</sup>) электронная температура составляет величину около  $T_e \approx 100$  эВ. В случае образования на поверхности металлического образца одного или нескольких эмиссионных центров (катодных пятен в терминологии биполярных дуг и микроплазменных образований в терминологии униполярных дуг) между плазмой и образцом может возникнуть циркуляционный ток (микроплазменный разряд или униполярная дуга). При этом ток горячих электронов из плазмы будет уходить на образец, а соответствующий ток "холодных" электронов из центров эмиссии будет приходить в плазму с поверхности образца. Этот процесс происходит до тех пор, пока поддерживается электронная температура плазмы за счет поглощения падающей на плазму микроволновой энергии. Величина этого циркуляционного тока может быть оценена как  $J \approx 1-3$  А при площади контактирующего с плазмой металлического образца  $S = 1$  см<sup>2</sup>. Ток эмиссии будет ограничиваться на уровне максимального тока электронов из плазмы. При потенциале образца, близком к потенциалу стенок камеры (что существенно ниже потенциала плазмы), в циркуляцию тока вовлекается не только сам образец, но и площадь металлических стенок вакуумной камеры. Поскольку вблизи стенок камеры концентрация плазмы и их температура существенно ниже соответствующих значений в центре плазменного факела, то вероятность формирования центров эмиссии на образце оказывается значительно выше вероятности образования таких центров на стенках камеры. В этом случае при возникновении на образце микроплазменного разряда максимальный ток эмиссии с образца будет ограничиваться лишь возникающей в микроплазменном разряде плазмой и может составлять десятки и сотни ампер. Чтобы потенциал образца существенно не изменялся при протекании тока, значение емкости подсоединенного к нему конденсатора должно быть рассчитано исходя из соотношения:  $C \gg J\tau/V_f^* \approx 1$  мкФ, тогда значение  $C = 20$  мкФ вполне удовлетворяет необходимому условию стабилизации потенциала образца в течение времени существования плазменного факела. Измеряемые потенциалы плазмы в плазменно-факельном разряде [3] достигали значений в несколько киловольт, а так как в исходном состоянии образец находился под потенциалом стенок камеры, то реально принимаемые им токи плазмы в отсутствие микроплазменных разрядов (униполярных дуг) являлись ионными токами насыщения плазмы. В нашем случае (водородно-углеродная плазма) величина ионного тока насыщения не превышала нескольких ампер, а регистрируемые токи эмиссии при возникновении микроплазменных разрядов на поверхности образцов составляли десятки и сотни ампер. Следовательно, ионные токи, приходящие из плазмы на образец, на результаты измерений проходящего через образец тока эмиссии существенно не сказывались. При

возникновении микроплазменных разрядов на металлическом образце и, соответственно, при прохождении тока эмиссии с образца в плазму ток горячих электронов может частично или полностью выходить из плазмы факела и замыкаться на стенки металлической вакуумной камеры. В этом случае, регистрируя ток и протекший заряд в цепи образца, можно по величине площади эрозии, возникшей в одном импульсе на поверхности образца, оценить величину плотности тока и на основании измерения параметров плазмы сделать заключение о механизме эмиссии с поверхности образца.

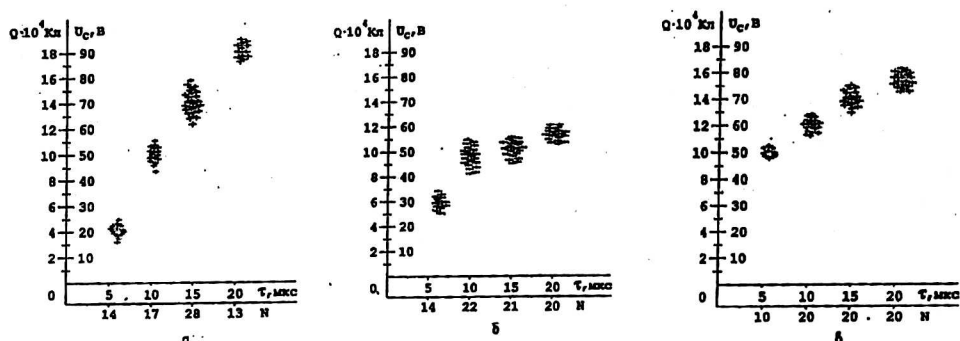
В плазме факела при возбуждении микроплазменных разрядов на поверхности образца наблюдались яркие локальные вспышки, которые фотографировались фотокамерой с телеобъективом.

На рис. 4, *а*, *б* представлены интегральные по длительности импульса фотографии образцов при возникновении на их поверхности микроплазменных разрядов. Установлено, что только при возникновении микроплазменных разрядов в электрической цепи образца возникал ток, направление которого соответствовало электронному току эмиссии с поверхности образца в окружающую плазму. При протекании тока через образец происходила зарядка соединенного с ним конденсатора. Измерялась зависимость величины напряжения на конденсаторе от длительности импульса, создающего плазму микроволнового излучения.



**Рис. 4. Фотография микроплазменных разрядов, возбуждаемых на образце:**  
*а* — из алюминиевого сплава Д16; *б* — из нержавеющей стали марки 12Х18Н9Т —  
 в микроволновом плазменном факеле (мощность импульса микроволнового излучения 2 МВт,  
 длительность импульса 20 мкс, длина волны 16 см, масштаб 1:1)

Величины экспериментальных значений напряжения на конденсаторе  $U_c$ , расчетные величины прошедшего электрического заряда  $Q = C U_c$  и среднего за импульс тока  $J_c = Q/\tau$  в микроплазменном разряде на образцах из алюминия, титана и железа при воздействии импульсного микроволнового излучения длительностью от 6 до 20 мкс приведены на диаграммах (рис. 5, *а—в*). В табл. 1 представлены расчетные величины средних значений напряжения  $U_{cp}$  на конденсаторе (усреднение проводилось по количеству импульсов микроплазменных разрядов  $N$ ), средних значений прошедшего через образец тока  $J_{cp}$  и вероятности зажигания микроплазменных разрядов  $p$  в зависимости от длительности импульса микроволнового излучения  $\tau$ .



**Рис. 5. Диаграмма экспериментальных значений потенциалов и расчетных величин электрических зарядов, протекавших через образцы:**  
*a* — из алюминиевого сплава Д16; *б* — из титана; *в* — из электротехнического железа марки Э — при возбуждении на их поверхности микроплазменных разрядов (мощность микроволнового излучения 2 МВт,  $\tau$  — длительности импульсов 6, 10, 15, 20 мкс; *N* — количество микроволновых импульсов, в которых возбуждались микроплазменные разряды на поверхности образцов)

Т а б л и ц а 1

Средние величины  $U_{cp}$ ,  $J_{cp}$  и  $p$  для различных значений параметров  $\tau$  и  $N$  при возбуждении микроплазменных разрядов на образцах из различных материалов

$\tau_{max}$ , макс	$U_{cp}$ , В	$J_{cp}$ , А	$N$	$p$
Образцы из алюминия				
6	20	70	14	0,15
10	50	100	17	0,2
15	70	95	28	0,35
20	90	90	13	0,5
Образцы из титана				
6	32	105	14	0,1
10	48	95	22	0,5
15	50	70	21	0,9
20	57	57	20	0,95
Образцы из электротехнического железа марки Э				
$\tau_{max}$ , макс	$U_{cp}$ , В	$J_{cp}$ , А	$N$	$p$
6	50	170	10	0,9
10	60	120	20	0,9
15	70	90	20	1,0
20	75	75	20	1,0

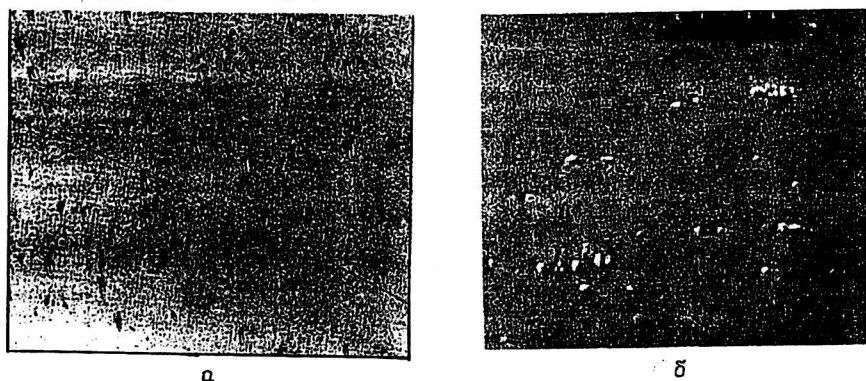
Расчет значений  $U_{cp}$  и  $J_{cp}$  проводился по импульсам, в которых наблюдались микроплазменные разряды и измерялись прошедшие через образец электрические заряды.

В расчетах вероятности  $p$  возникновения микроплазменного разряда на образцах учитывались все импульсы, включая и те, в которых такие разряды не наблюдались.

Из диаграмм (см. рис. 6, *a*–*в*) и табл. 1 следует, что средний ток в микроплазменных разрядах на образцах из алюминия, титана и железа составляет 100–170 А в первые 10 мкс существования плазменного факела. При увеличении длительности импульса микроволнового излучения от 10 до 20 мкс величина среднего тока спадает. В то же время вероятность возникновения микроплазменного разряда растет с увеличением длительности микроволнового импульса от 6 до 20 мкс и достигает значений 0,5 для образцов из чистого алюминия и практически 1,0 — для образцов из титана и железа.

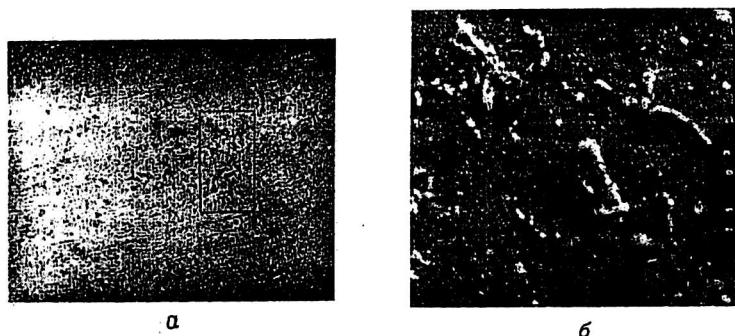
**Исследование исходного состояния структуры и химического состава образцов**

Микроскопические исследования образцов проводились визуально и с помощью оптических микроскопов типа МБС и металлографического микроскопа типа МИМ-7 с максимальным увеличением до  $\times 500$  раз. Предварительно исходные состояния поверхности образцов изучались в целях выяснения особенностей структуры образцов и характерных локальных деформаций на их поверхностях. На рис. 6—8 приведены фотографии поверхности образцов некоторых металлов до плазменной обработки. На рис. 6, а, б представлены фотографии фрагмента поверхностной структуры образца из нержавеющей стали марки 12Х18Н9Т. На фоне типичной для этого материала структуры [19] видны вкрапления микровключений поликристаллов карбидов титана и углублений неправильной формы от выкрошившихся в результате механической обработки этих микровключений. На рис. 7, а, б приведены фрагменты поверхности алюминиевого сплава Д16 в исходном состоянии, на рис. 8 — образца из технического железа марки Э перед постановкой в вакуумную камеру установки ИВА-1.



**Рис. 6. Микрофотография фрагмента исходной поверхности образца из нержавеющей стали марки 12Х18Н9Т. Фотография выполнена:**

- а — с помощью металлографического микроскопа типа МИМ с увеличением  $\times 100$ ;
- б — с помощью растрового электронного микроскопа с увеличением  $\times 300$

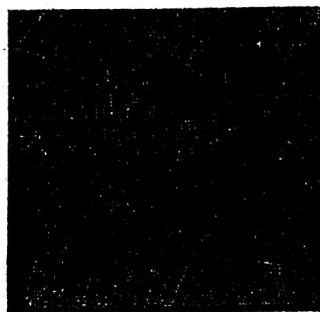


**Рис. 7. Фрагмент исходной поверхности образца из алюминиевого сплава Д16. Фотографии выполнены:**

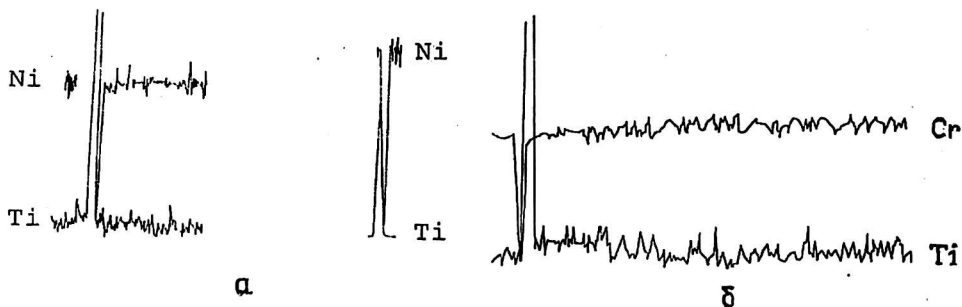
- а — с помощью металлографического микроскопа с увеличением  $\times 400$ . Темные и серые пятна (выделены в рамке) на поверхности образца представляют собой железомарганцовистые микровключения типов  $AlCuMnFe$  и  $AlSiMnFe$ , соответственно;
- б — с помощью растрового электронного микроскопа с увеличением  $\times 1000$ . Светлые пятна на поверхности образца представляют собой также железомарганцовистые микровключения типов  $AlCuMnFe$  и  $AlSiMnFe$

**Рис. 8. Фрагмент исходной поверхности образца из электротехнического железа марки Э.**

Фотография выполнена с помощью растрового электронного микроскопа с увеличением  $\times 1000$



Локальный химический состав образца из нержавеющей стали исследовался с помощью рентгеновской флуоресцентной диагностики, встроенной в растровый электронный микроскоп. Сфокусированный на образце электронный луч диаметром 1 мкм с энергией электронов 25–60 кэВ перемещался по поверхности образца и производил возбуждение атомов основного металла и атомов примесных включений. Достаточно большая энергия бомбардирующих электронов (25 кэВ) позволяла возбуждать электроны атомов, находящиеся на внутренних К-оболочках, переводя их на более высокие энергетические уровни. Последующая релаксация возбужденных состояний электронов сопровождается высвечиванием рентгеновских квантов с характерной для данного сорта атомов энергией — характеристической линией излучения химического элемента. Встроенный в растровый электронный микроскоп рентгеновский анализатор, состоящий из монохроматора рентгеновского излучения с набором кристаллов в качестве дифракционных элементов и специальным высокочувствительным полупроводниковым детектором рентгеновских квантов, настраивался на характеристические линии различных элементов. Это позволяло качественно и количественно определять химический состав в локальной области поверхности образцов с пространственным разрешением менее 2 мкм и на глубине 10–30 мкм (зависит от энергии электронного пучка и характерной энергии рентгеновских квантов). Для атомов с атомной массой более 23 (атомы натрия и более тяжелых элементов) такая диагностика после соответствующей калибровки позволяет по относительной интенсивности характеристических линий К-серии различных химических элементов изучить их относительные распределения на поверхности образцов. На рис. 9, а, б представлены типичные распределения



**Рис. 9. Распределения химических элементов:**

а — титана и никеля; б — титана и хрома на исходной поверхности образца из нержавеющей стали марки 12Х18Н9Т, полученные методом рентгеновской флуоресценции при прохождении через микровключения карбида титана.

Масштаб по горизонтали: 1 см соответствует 3 мкм

элементов, входящих в состав нержавеющей стали марки 12Х18Н9Т: Cr, Ti, Ni. Из приведенных распределений видно, что для образцов из нержавеющей стали характерным является наличие локальных пиков характеристического рентгеновского излучения титана линии  $K_{\alpha}$ . При этом, как правило, пики рентгеновского излучения линии  $K_{\alpha}$  титана соответствовали провалам интенсивности линий основных элементов, входящих в состав сплава 12Х18Н9Т (Cr, Ni). Эти данные позволили сделать предположение о том, что такие локализации титана обусловлены наличием в этих локальных участках соединений, в которых титан как составная часть структуры входит в большом количестве, например соединения типа TiC (карбид титана). При этом углерод рентгеновской флуоресцентной диагностикой не мог быть зарегистрирован в силу того, что характеристические линии флуоресценции углерода не попадают в рабочий диапазон анализатора. Специальные исследования такого рода микровключений с высоким содержанием титана проводились также на оптическом микроскопе с предварительной маркировкой области прохождения диагностического электронного луча. Маркировка места локального анализа проводилась путем многократного прохождения электронного пучка через интересующий участок образца. Эта процедура приводила к возникновению видимой в оптический микроскоп метки с измененным цветом поверхности. Наблюдения, выполненные с помощью оптического и металлографического микроскопов, подтвердили данные электронно-микроскопических исследований, а именно, основными включениями являются карбиды титана (TiC) с характерным размером от одного до нескольких десятков микрон.

Химический анализ, проведенный для образцов нержавеющей стали в исходном состоянии, дал следующие усредненные значения фактического состава элементов: Cr — 17,4 %; Ni — 8,38 %; Ti — 0,52 %; C — 0,27 %. Эти значения соответствуют паспортным данным для сплава 12Х18Н9Т. Аналогичный химический анализ образцов нержавеющей стали, проведенный после воздействия около 1000 импульсов плазмы микроволновых разрядов, показал неизменность усредненного по объему химического состава образцов. В то же время, по данным локального рентгеновского флуоресцентного анализа, концентрация микровключений карбида титана на поверхности образцов, прошедших многократное воздействие микроплазменных разрядов, снизилась на порядок.

Аналогичные исследования были проведены для исходного состояния образцов из алюминиевого сплава Д16. Химический состав матрицы следующий: основной элемент Al — 93–95 %; Cu — 3,8–4,5 %; Mg — 1,2–1,8 %; Mn — 0,3–0,7 %; Si — 0,25 %; Fe — 0,39 %; C — 0,055 %; N — 0,01 %; остальное — менее 0,01 %.

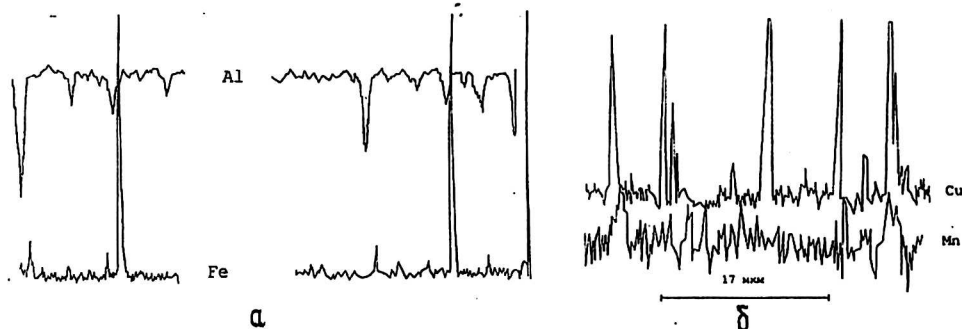
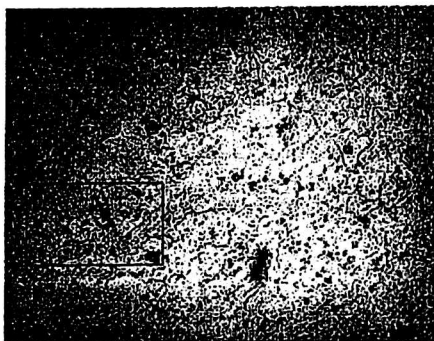
Оптические исследования поверхности образцов из алюминиевого сплава Д16 в металлографическом микроскопе с предварительной обработкой специальным раствором (реактивом Келлера, состоящим из азотной кислоты  $\text{HNO}_3$  — 2,5 мл, плавиковой кислоты HF — 1,0 мл, соляной кислоты HCl — 1,5 мл, воды  $\text{H}_2\text{O}$  — 9,5 мл) показали наличие в приповерхностных слоях образцов нерастворимых фаз локализованных микровключений железомарганцовистых соединений типа AlCuMnFe или AlSiMnFe [20].

При изучении поверхности образцов из сплава Д16, обработанных реактивом Келлера, с помощью оптического микроскопа обнаруживается, что железомарганцовистые микровключения наблюдаются на поверхности образцов в виде локальных микровключений с характерными размерами в десятки микрон (рис. 10). Рентгеновский флуоресцентный анализ образцов из алю-

миниевого сплава Д16, проведенный до плазменной обработки, показал, что микровключения Cu, Fe и Mg распределены крайне неравномерно на фоне равномерного распределения основного элемента — Al (рис. 11, а, б). В локализованных участках поверхности с характерным размером 10—30 мкм обнаруживаются вкрапления с аномально большим содержанием элементов Cu, Mn и Fe по сравнению с их содержанием в основной матрице сплава Д16 (превышение может составлять от нескольких раз до нескольких десятков раз).

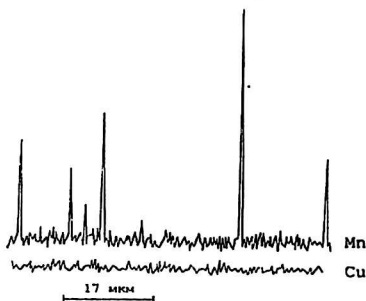
**Рис. 10. Микрофотография фрагмента исходной поверхности образца из алюминиевого сплава Д16, обработанного реактивом Келлера.**

Темные пятна на поверхности идентифицируются как железомарганцовистые микровключения соединений типа AlCuMnFe и AlSiMnFe. Фотография выполнена в оптическом микроскопе с увеличением  $\times 400$



**Рис. 11. Пространственные распределения химических элементов:**  
а — алюминия и железа; б — меди и марганца; на исходной поверхности образца из алюминиевого сплава Д16, полученные методом рентгеновского флуоресцентного анализа при прохождении электронным пучком железомарганцовистых микровключений. Масштаб по горизонтали: в 1 см 3 мкм

Образцы из технически чистого железа марки Э имели следующий химический состав: С — 0,045 %; Mn — 0,2 %; Si — 0,2 %; S — 0,03 %; P — 0,025 %; Cu — 0,15 % [19]. Эти образцы также исследовались с помощью рентгеновского флуоресцентного анализа на содержание локализованных примесей Mn и Cu. На рис. 12 представлены соответствующие распределения этих примесных элементов на поверхности образцов из железа марки Э. Примечательно, что

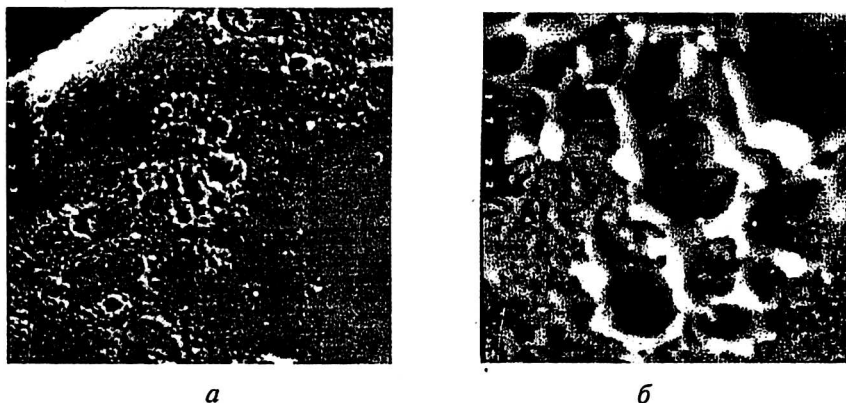


**Рис. 12. Пространственные распределения химических элементов меди и марганца на исходной поверхности образца из технического железа марки Э, полученные методом рентгеновского флуоресцентного анализа при сканировании сфокусированным электронным пучком участка поверхности 70 мкм**

в отличие от примеси меди, распределение которой практически однородно по поверхности образцов железа, примеси марганца распределены неоднородно — их распределения в поверхностных слоях железа имеют характер локализованных микровключений.

### **Исследование эрозии металлов и сплавов в результате плазменного воздействия**

При помещении металлических образцов в плазму микроволнового факела на их поверхности возбуждаются микроплазменные разряды (униполярные дуги). В результате одно- или многократного импульсного воздействия плазменного факела на образцы из металла на их поверхности обнаруживаются локальные эрозионные зоны. На основании наблюдений возникновения микроплазменных разрядов на образцах с помощью телеобъектива, а также в результате анализа фотографических изображений микроплазменных разрядов можно утверждать, что эрозионные зоны возникают в тех местах на поверхности образцов, в которых наблюдались яркие локализованные вспышки света, идентифицируемые как микроплазменные разряды. При наблюдении в оптический микроскоп с увеличением более 100 раз хорошо видно, что эрозионные зоны представляют собой отдельные кратеры (с характерными размерами от нескольких до десятков микрометров) или скопления нескольких кратеров. Кратер представляет собой локальное углубление округлой формы с оплавленными дном и краями, возвышающимися над областями вне кратера. Типичные виды эрозионных кратеров, возникших в результате возбуждения микроплазменных разрядов на поверхности металлических образцов, представлены на рис. 13, *а*, *б*. Вид эрозии позволяет предположить, что процесс микроплазменных разрядов на металлах сопровождается интенсивным плавлением и выбросом расплавленного металла из центральной части кратера на его периферию. Процесс происходит настолько интенсивно и в течение такого короткого промежутка времени (характерное время образования кратера,

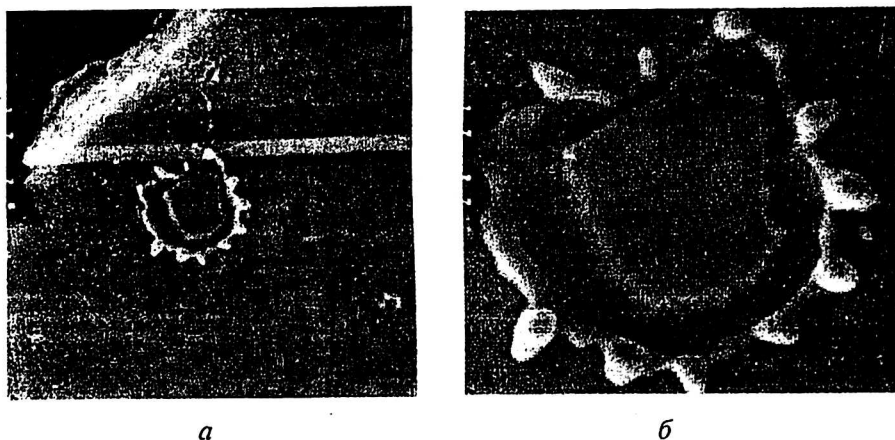


**Рис. 13. Микрофотография фрагмента эродированной поверхности образца из титана после возбуждения 10 микроплазменных разрядов в плазме микроволнового факела. Фотография получена в растровом электронном микроскопе:**

*а* — при увеличении  $\times 600$ ;

*б* — при увеличении  $\times 3600$ ; плазменный факел инициировался и поддерживался микроволновым излучением мощностью 2 МВт с длительностью импульса 20 мкс

по-видимому, порядка или заметно меньше микросекунды), что характер разрушений подобен микровзрыву. Подобный характер эрозии характерен для образцов из различных металлов и сплавов при возбуждении нескольких микроплазменных разрядов. Типичный вид кратеров на поверхности образцов из титана представлен на рис. 13, а, полученных в ходе исследования поверхности образцов с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ). Хорошо видно, что на титане образуются кратеры как относительно большого размера (например, центральный кратер в скоплении имеет диаметр  $\sim 10$  мкм), так и существенно меньшего размера – диаметром  $\sim 1$  мкм или менее. Так, на рис. 13, б с увеличением  $\times 3600$  видны кратеры, размер которых не превышает нескольких десятых долей микрометра. Характерно, что края всех кратеров в скоплении на рис. 13, б отчетливо различимы несмотря на то, что они располагаются практически вплотную. На основании этого можно предположить, что кратеры возникли практически одновременно, что позволило им сохраниться. В ряде случаев эрозионные зоны выглядят довольно экзотично. Так, на рис. 14, а, б изображен кольцевой кратер или цепочка кратеров, образующих замкнутое кольцо с отсутствием признаков

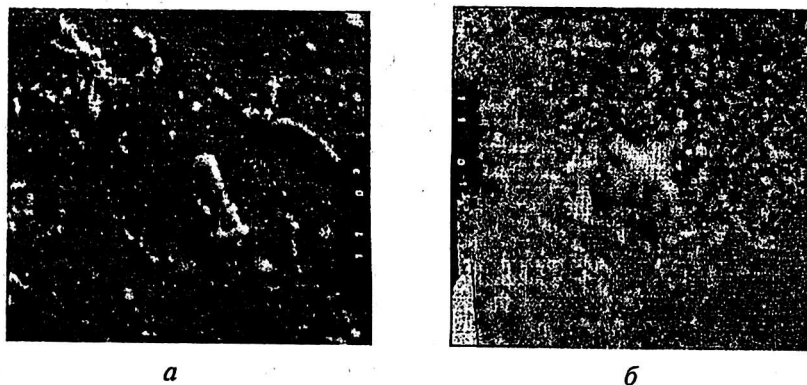


**Рис. 14.** Микрофотография фрагмента эродированной поверхности образца из титана после возбуждения одного микроплазменного разряда в плазме микроволнового факела. Фотография получена в растровом электронном микроскопе:

а — при увеличении  $\times 500$ ; б — при увеличении  $\times 2000$ ; плазменный факел инициировался и поддерживался микроволновым излучением мощностью 2 МВт с длительностью импульса 20 мкс

эрозии в его центре. Вид этой цепочки кратеров, имеющего выплески только на внешнюю сторону кольца, указывает на то, что возникновение всего кольцевого кратера и цепочки кратеров происходило или одновременно, или в течение интервала времени, существенно меньшего характерного времени для остывания металла в кратере за счет отвода тепла в глубинные слои металлического образца (1–10 мкс). При этом в процессе плавления металла в кольце во внутренней части последнего давление паров расплавленного металла было настолько велико, что не позволяло металлу выплеснуться внутрь кольца. Диаметр эрозионного кольца аномально большой (около 50 мкм) и существенно превышает средние размеры наиболее часто встречающихся одиночных кратеров, однако толщина оплавленной бороздки кольца составляет 10–15 мкм и соответствует характерному размеру отдельного кратера на многих металлах и сплавах.

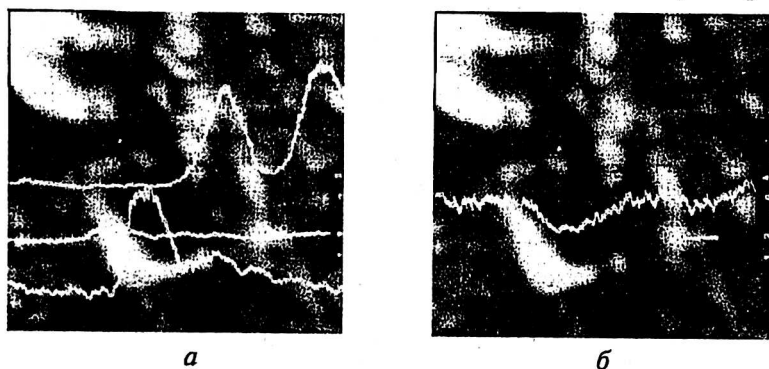
На рис. 15, *а* представлены микрофотографии (РЭМ) эрозионной зоны на образце алюминиевого сплава Д16, на рис. 15, *б* — для сравнения дан участок образца, не подверженный эрозии. На поверхности этого образца наблюдаются характерные микровключения. Соответствующие микровключения в эрозионной зоне этого же образца трудно различимы. Используя рентгеновский флюоресцентный анализ, были проведены исследования эрозионных зон в целях выявления в кратерах каких-либо аномалий химического состава сплава Д16.



**Рис. 15. Микрофотография фрагмента:**

*а* — исходной; *б* — эродированной поверхности образца из алюминиевого сплава Д16 после возбуждения 10 микроплазменных разрядов в плазме микроволнового факела. Фотография получена в растровом электронном микроскопе при увеличении  $\times 1000$ . Плазменный факел инициировался и поддерживался микроволновым излучением мощностью 2 МВт с длительностью импульса 20 мкс

Для этого в нескольких эрозионных зонах со скоплениями кратеров с характерным средним размером 10—15 мкм изучалась рентгеновская флюоресценция, возбуждаемая сфокусированным электронным пучком растрового электронного микроскопа. На рис. 16, *а*, *б* представлены фотографии эрозионных зон образцов алюминиевого сплава Д16 с наложенными на них пространственными распределениями интенсивности характеристических



**Рис. 16. Микрофотографии эрозионного кратера на поверхности образца из алюминиевого сплава Д16 после возбуждения одного микроплазменного разряда в микроволновом факеле.**

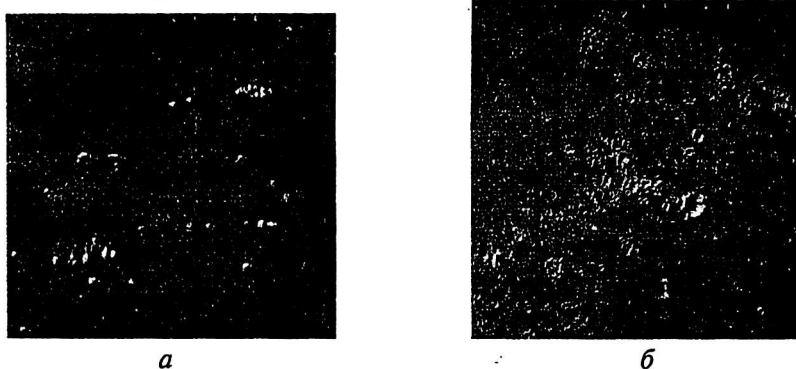
Фотографии получены в растровом электронном микроскопе при увеличении  $\times 3000$ : *а* — на фотографическое изображение кратера наложены пространственные распределения железа (верхняя кривая), никеля (средняя кривая), меди (нижняя кривая); *б* — наложено пространственное распределение химического элемента магния. Плазменный факел инициировался и поддерживался микроволновым излучением мощностью 2 МВт с длительностью импульса 20 мкс

линий рентгеновского излучения элементов, типичных для железомарганцовистых микровключений. На рис. 16, *а* приведены качественные распределения элементов: Fe (верх), Ni (середина), Cu (низ) вдоль пересекающей кратер линии сканирования электронным пучком. Распределение элемента Mg вдоль пересекающей кратер линии сканирования электронным пучком представлено на рис. 16, *б*. Для наглядности все распределения элементов наложены на фотографическое изображение кратера, полученное в этой же геометрической позиции. Следует отметить некоторые особенности регистрации рентгеновского излучения с поверхности образцов, имеющих значительные рельефные вариации. Как правило, интенсивность флюоресценции рентгеновского излучения линий  $K_{\alpha}$ -серии из углублений микронного размера на поверхности эродированных образцов оказывается заметно ниже по сравнению с интенсивностью флюоресценции рентгеновского излучения с ровной поверхности такого же химического состава. Это явление обусловлено наличием довольно сильного рельефа поверхности металла. Природа явления обусловлена тем, что значительная часть рентгеновского излучения, возбуждаемого электронным пучком на дне кратера и на его стенках, поглощается краями самого кратера и не может быть полностью зарегистрирована детектором рентгеновского анализатора. В связи с этим для некоторых химических элементов, входящих в состав образцов, соотношения интенсивностей излучения линий  $K_{\alpha}$ -серии, регистрируемые с эродированной поверхности образцов, могут не соответствовать химическому составу вещества внутри кратеров и отличаться от состава при исследовании ровной поверхности. В силу этого особое внимание было обращено на те данные локальной рентгеновской флюоресценции, в которых наблюдалось сильное излучение линий некоторых химических элементов даже из углублений кратеров. Это достоверно указывало на присутствие данного элемента в локальной области эрозии в больших количествах по сравнению с количеством элемента в областях вне кратеров. Имея в виду высказанные выше аргументы и на основании полученных распределений интенсивности элемента Cu в кратерах на образцах сплава алюминия Д16 (см. рис. 16, *а*, *б*), можно утверждать, что присутствие значительных включений меди в эрозионных кратерах установлено достоверно.

Эрозия на образцах из нержавеющей стали (сплав 12Х18Н9Т) имеет характер, сходный с эрозией на образцах из алюминиевого сплава Д16. Обычно на поверхности образцов из нержавеющей стали, не подвергавшихся воздействию плазмы, отчетливо видны микровключения карбида титана (TiC), вкрапления которых наблюдаются в оптическом микроскопе равномерно на всей поверхности образца (рис. 17, *а*). После многократного возбуждения микроплазменных разрядов на поверхности образцов из нержавеющей стали обнаруживается определенная "привязка" эрозионных зон к локальным участкам, в которых до воздействия плазмы наблюдались микровключения карбида титана. В тех областях на поверхности образцов, где до плазменного воздействия располагались микровключения карбида титана, после многократного воздействия плазмы факела и возбуждения микроплазменных разрядов обнаруживается локальная эрозия в виде одиночных кратеров или скоплений кратеров (см. рис. 17, *б*).

Таким образом, было обнаружено, что при взаимодействии образцов из нержавеющей стали с плазмой микроволнового факела микроплазменные разряды возбуждались, как правило, в местах локализации микровключений карбида титана. При этом сами микровключения в эрозионной зоне, как правило, визуально уже не наблюдались (см. рис. 17, *б*). "Привязка" места возникновения кратеров к микровключениям карбида титана позволяет сделать предположение, что эти микровключения являются инициаторами воз-

буждения микроплазменных разрядов на поверхности образцов из нержавеющей стали в плазме микроволнового факела. В то же время локализация микроплазменных разрядов в местах расположения микровключений карбида титана приводит к образованию эрозионных зон с переплавленной поверхностью вокруг микровключения, при этом последние практически полностью “выгорают” в микроплазменном разряде. Известно, что температура плавления карбида титана [21] около  $3200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , следовательно, можно сделать заключение о том, что минимальная температура на поверхности металла в микроплазменном разряде превышает это значение. Реально же температура поверхности может быть значительно выше, так как карбид титана практически полностью испаряется.



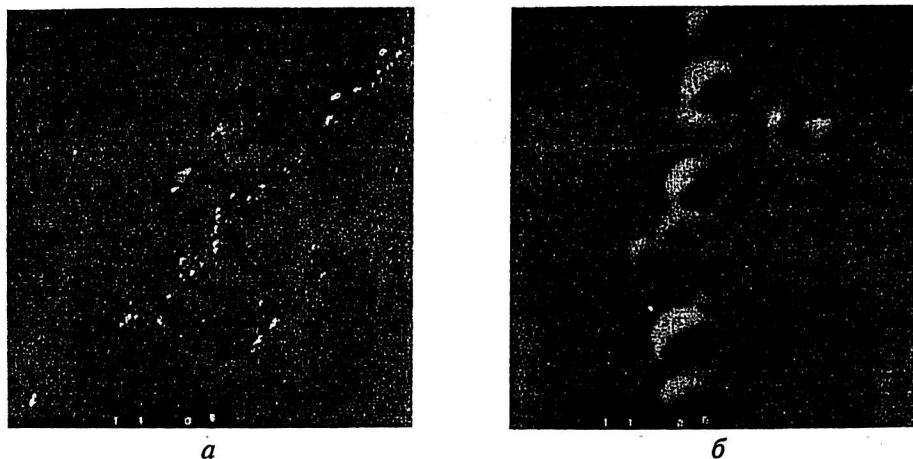
*Рис. 17. Микрофотографии поверхности образца:*

*a* — исходной; *b* — эродированной из нержавеющей стали марки 12Х18Н9Т после возбуждения 10 микроплазменных разрядов в микроволновом факеле. Фотографии получены в растровом электронном микроскопе при увеличении  $\times 300$ . Плазменный факел инициировался и поддерживался микроволновым излучением мощностью 2 МВт с длительностью импульса 20 мкс

Образцы из технически чистого железа, помещенные в плазму микроволнового факела, при тех же начальных условиях подвергались заметно меньшему эрозионному воздействию микроплазменных разрядов. При воздействии около 100 импульсов микроволнового плазменного факела площадь эрозии на образцах из чистого железа заметно меньше по сравнению с площадью эрозии на образцах из алюминиевого сплава Д16 и из нержавеющей стали 12Х18Н9Т. При сходных условиях воздействия количество кратеров на поверхности образцов из железа мало по сравнению с количеством кратеров на других металлах и сплавах. Как правило, сплошных зон переплавленной поверхности не встречается. Кратеры обычно образуют цепочки, при этом расстояние между кратерами в цепочке существенно больше их размера. Характерные размеры кратеров существенно меньше тех, что образуются на других металлах и сплавах. Их средний размер составляет  $\sim 1\text{--}3\text{ мкм}$  или меньше. Характерная цепочка кратеров на железе представлена на рис. 18, *a, б*.

Помимо эрозионных кратеров, на некоторых образцах металлов и сплавов наблюдается вид эрозии, который характеризуется тем, что на поверхности образцов возникают протяженные, оплавленные участки (зоны) металла, не имеющие традиционной округлой формы, характерной для кратеров или их скоплений (см. рис. 19, *a, б*). Размеры этих эрозионных зон существенно больше характерных размеров одиночных кратеров ( $1\text{--}5\text{ мкм}$ ) и составляют величины более  $10\text{--}30\text{ мкм}$ . Как показали детальные исследования, природа возникновения этих эрозионных зон и их структурные отличия обусловлены, по-видимому, тем, что они имеют “привязку” к участкам первоначальной

деформации образцов. Для экспериментальной проверки этого наблюдения на образцы из алюминиевого сплава Д16 предварительно были нанесены риски твердосплавным инструментом.

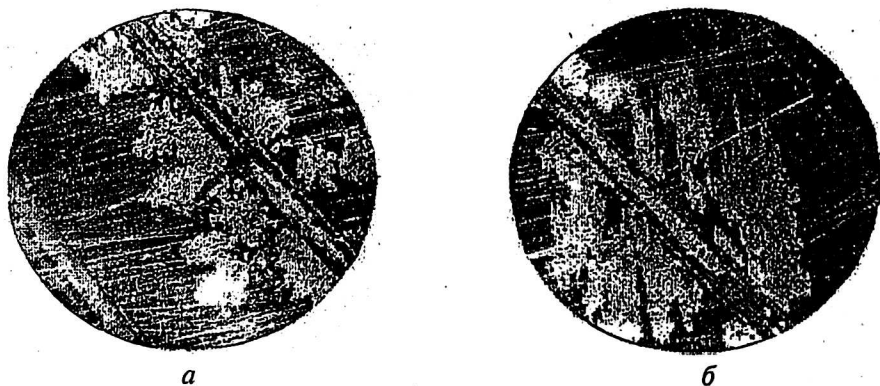


**Рис. 18.** Микрофотографии фрагментов эродированной поверхности образца из технического железа марки Э после возбуждения 10 микроплазменных разрядов в плазме микроволнового факела.

Фотография получена в растровом электронном микроскопе:

*а* — при увеличении  $\times 300$ ; *б* — при увеличении  $\times 3000$ .

Плазменный факел инициировался и поддерживался микроволновым излучением мощностью 2 МВт с длительностью импульса 20 мкс



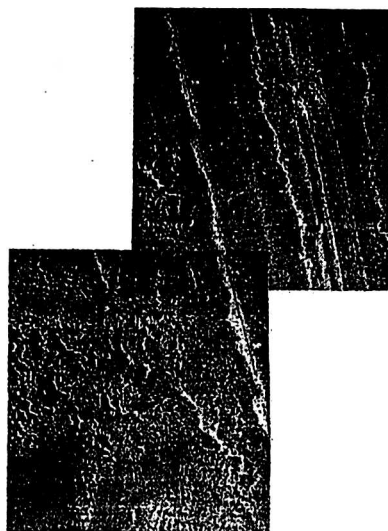
**Рис. 19.** Микрофотографии фрагментов эродированной поверхности образца из алюминиевого сплава Д16 после возбуждения 10 микроплазменных разрядов в плазме микроволнового факела.

Фотография получена:

*а* — в оптическом микроскопе типа МБС при увеличении  $\times 20$ ; *б* — также в микроскопе МБС при увеличении  $\times 20$ . Плазменный факел инициировался и поддерживался микроволновым излучением мощностью 2 МВт с длительностью импульса 20 мкс

На помещенных в плазму микроволнового факела образцах с нанесенными рисками деформации наблюдалось возбуждение микроплазменных разрядов. После возбуждения нескольких микроплазменных разрядов на образцах возникающая на поверхности эрозия изучалась в растровом электронном микроскопе. В результате микроскопических исследований была обнаружена "привязка" возбуждения микроплазменных разрядов к локальным участкам местной деформации на поверхности образцов из Д16 (рис. 20). Аналогичное явление было обнаружено на образцах из технического чистого железа. Детальное исследование та-

кого рода деформации на образцах железа, не подвергнутых воздействию микроплазменных разрядов, показало, что в областях с локальной деформацией на поверхности образцов, как правило, наблюдается и присутствие “загрязнений” субмикронного размера, химический состав которых расшифровать не удалось.



*Рис. 20. Микрофотографии фрагментов эродированной поверхности образца из алюминиевого сплава Д16 после возбуждения 10 микроплазменных разрядов в плазме микроволнового факела.*

Фотографии получены в растровом электронном микроскопе при увеличении  $\times 100$ . Плазменный факел инициировался и поддерживался микроволновым излучением мощностью 2 МВт с длительностью импульса 20 мкс



*Рис. 21. Профилограмма исходной (левая часть рисунка) и эродированной (правая часть) поверхности образца из нержавеющей стали марки 12Х18Н9Т при возбуждении микроплазменных разрядов в микроволновом плазменном факеле.* Плазменный факел инициировался и поддерживался микроволновым излучением мощностью 2 МВт с длительностью импульса 20 мкс.

Масштабы: по горизонтали — в 1 см 100 мкм, по вертикали — в 1 см 20 мкм

Довольно часто в местах с локальной деформацией обнаруживаются пленки окислов металла, а также выступающие над поверхностью образцов микроострия с размерами от 1 до 20 мкм (рис. 21). Такие микронного размера микроострийные образования на поверхности металлических образцов могут представлять собой эффективные инициаторы возникновения электронных эмиссионных центров, которые в сильном электрическом поле на границе плазма—металл трансформируются в эктоны, центры взрывной эмиссии и микроплазменные разряды на металле [12].

### **Изучение изменений кристаллической структуры на поверхности металлов в результате плазменного воздействия**

Исследования кристаллической структуры металлов в зонах эрозии, возникающей в результате плазменного воздействия, проводились на образцах из титана с помощью электронографа ЭР-100.

Предварительно исследовались образцы, не подвергавшиеся плазменному воздействию. Характерные электронограммы таких образцов даны на рис. 22, а.

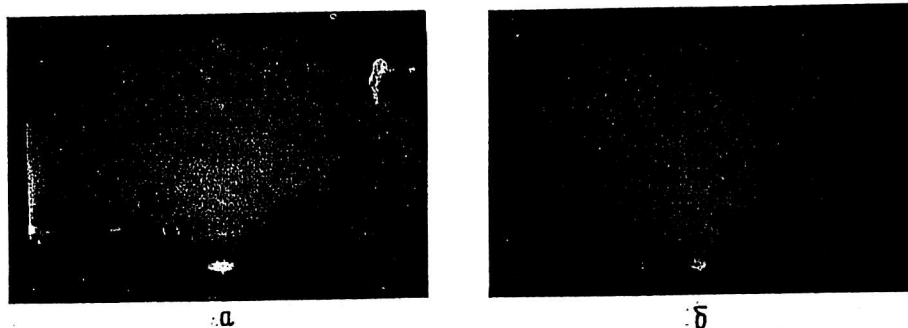


Рис. 22. Электронограммы образцов из титана при скользющем падении на поверхность образца электронного пучка:

*a* — электронограмма исходной поверхности образца из титана; *б* — электронограмма поверхности образца из титана, эродированной в микроплазменном разряде, возбуждаемом плазмой микроволнового факела при микроволновой мощности 2 МВт и длительности импульса 20 мкс

На фотографиях видны характерные полукольца, возникающие на фотопластинке в результате дифракции электронов на кристаллической решетке металла при скользющем падении электронов на поверхность образца. Из измеренных экспериментальных значений радиусов  $R$  полуколец дифракционной картины по формуле для конкретного электронографа ЭР-100 можно рассчитать величины характеристик решетки металла  $d$ , в поверхностном слое которого происходила дифракция электронов пучка [16—18]

$$d = 0,0447 \times 600/R,$$

где  $R$  — измеряется в миллиметрах,  $d$  — в ангстремах).

Данные о характеристиках ( $d_{\text{экс}}$ ) кристаллической решетки на поверхности металлических образцов, полученные из количественной обработки электронограмм, приведены в табл. 2. Там же даны эталонные значения электронографических характеристик для титана и его соединений ( $d_{\text{эт}}$ ), приведенные в работах [17, 18]. Из сравнения экспериментальных  $d_{\text{экс}}$  и эталонных  $d_{\text{эт}}$  значений электронографических линий для образцов из титана видно, что большинство характерных линий идентифицируется как линии кристаллического титана или его окислов ( $\text{TiO}$ ,  $\text{Ti}_2\text{O}$ ). Наличие в спектре электронограммы характеристических значений  $d_{\text{экс}}$ , соответствующих окислам титана, вполне объяснимо, так как предварительная обработка поверхности образцов и транспортировка экспонированных в плазме образцов проводилась в воздушной атмосфере, и их поверхность частично оказалась окисленной.

Таблица 2

Характерные экспериментальные значения радиусов  $R$  дифракционных колец электронограмм, экспериментальные значения характеристических линий  $d_{\text{экс}}$  и эталонные линии  $d_{\text{эт}}$  для исходных образцов из титана

$R$ , мм	$d_{\text{экс}}$ , Å	$d_{\text{эт}}$ , Å
8,9	3,013	
9,9	2,709	
11,1	2,416	2,40 (TiO)
11,5	2,332	2,32 (Ti)
12,5	2,145	2,24 (Ti)
15,1	1,776	1,76 (TiO, Ti <sub>2</sub> O)
17—18	1,577—1,49	
19,8	1,354	1,34 (Ti)
21,1	1,271	
28	0,95	0,948 (Ti)

Исследования методом электронографии образцов из титана, на которых возбуждались микроплазменные разряды, показали, что в тех областях поверхности образцов, в которых наблюдаются эрозия и оплавленные участки, электронограммы существенно изменяются. На рис. 22, б представлены фотографии электронограмм, полученных при скользящем падении электронного пучка на поверхность образца с эрозионной зоной, образовавшейся в результате микроплазменного разряда. Существенное отличие электронограмм, эродированных в плазме образцов, от электронограмм образцов без эрозии — усиление интенсивности диффузного рассеяния электронов, на фоне которого практически не выделяются дифракционные кольца, характерные для кристаллического состояния металлического титана (см. рис. 22, а, б). Только

измеренные значения  $d_{\text{экс}} \approx 2,23 \text{ \AA}$  и, возможно,  $d_{\text{экс}} \approx 1,12 \text{ \AA}$  на фоне диффузных электронограмм могут быть идентифицированы как характеристические линии кристаллического титана (табл. 3).

Таблица 3  
Характерные экспериментальные значения радиусов  $R$  дифракционных колец электронограмм, экспериментальные характеристические линии  $d_{\text{экс}}$  образцов из титана после плазменной обработки и эталонные линии  $d_{\text{ст}}$  для кристаллического титана

$R$ , мм	$d_{\text{экс}}$ , $\text{\AA}$	$d_{\text{ст}}$ , $\text{\AA}$
5,5	4,85	
12	2,23	2,23, 2,24 (Ti, Ti)
23	1,12	1,16 (Ti)

Отличительная особенность дифракционных колец электронограмм, полученных на образцах с эрозионными зонами, созданными микроплазменными разрядами, — их аномально большая ширина, величина которой на порядок превышает соответствующие значения ширины колец для образцов, не подвергавшихся плазменному воздействию. Эта характеристика электронограмм указывает на то, что в эрозионных зонах структура поверхностного слоя металла претерпевает существенные изменения, которые выражаются в том, что утрачивается в значительной степени регулярность кристаллической решетки металла. Изменения кристаллической структуры металла образцов, помещенных в горячую плазму микроволнового факела, происходят в результате плавления и быстрого охлаждения локальных участков поверхностного слоя металлического образца при возбуждении на нем микроплазменных разрядов.

### Обсуждение результатов

Взаимодействие импульсной горячей плазмы микроволнового факела с металлами и сплавами, как было показано экспериментально, приводит к быстрому локальному разогреву, плавлению и выбросу вещества образца из локальных областей на поверхности металлов в результате возбуждения и развития в них микроплазменных разрядов. Характер эрозии свидетельствует о чрезвычайно сильном воздействии плазмы микроволновых разрядов на металлы и сплавы, поверхность которых плавится и эродирует. Это воздействие сравнимо с воздействием мощного лазерного излучения [25] с энергией импульса, соизмеримой с полной импульсной энергией микроволнового излучения, падающего на плазму (10–20 Дж). При этом имеется существенное отличие: сфокусированное лазерное излучение с энергией в импульсе

10—20 Дж создает эрозию в виде кратера с характерным размером, соизмеримым с размером фокального пятна (как правило, это десятки микрометров), в котором интенсивность излучения достигает значения  $10^7$ — $10^9$  кВт/см<sup>2</sup>. Микроволновое излучение с энергией в импульсе около 10 Дж, сфокусированное в пучок с характерным диаметром пучка 20 см и интенсивностью до 10 кВт/см<sup>2</sup>, создает сначала горячую и плотную плазму факела, воздействие которого на металлы имеет сильно локализованный характер вследствие возбуждения микроплазменных разрядов на поверхности металлов. Такое “двухступенчатое” воздействие приводит к образованию кратеров эрозии с характерными размерами 1—20 мкм. При этом характерные размеры микроволнового пучка и плазменного факела на четыре или пять порядков превышают характерные размеры эрозионных кратеров. Средние потоки энергии из плазмы микроволнового факела на поверхность металла являются настолько малыми, что не могут существенно увеличить температуру поверхности металлических образцов в плазме даже при максимальных значениях подводимой микроволновой мощности 10 МВт и длительности импульса до 20 мкс.

Обнаруженная в экспериментах сильно локализованная эрозия поверхности металлов, помещенных в плазму микроволнового факела, обусловлена такими процессами в плазме, которые приводят к концентрации энергии плазмы на локальных участках поверхности металла. Процессы локального плавления в поверхностных слоях различных металлов и сплавов указывают на то, что в местах эрозии плотность потока энергии достигает значений, соизмеримых с соответствующими значениями в луче мощного лазера.

Таким образом, взаимодействие горячей плазмы микроволнового факела с металлами реализуется посредством возбуждения микроплазменных разрядов, в которых развиваются эффективные процессы концентрации энергии плазмы (и, следовательно, энергии поглощаемого плазмой микроволнового излучения) на локальных участках металлической поверхности, что и обуславливает процессы эрозии металлов и сплавов.

Рассмотрим несколько возможных механизмов воздействия плазмы микроволнового факела на металлические образцы, а именно, радиационный, тепловой, микроплазменный.

**Радиационный механизм воздействия плазмы** на металлы связан с бомбардировкой поверхности металлов тяжелыми частицами плазмы (ионами, быстрыми нейтральными атомами перезарядки, нейтронами) с энергиями порядка 100 кэВ и выше. Такое воздействие приводит к накоплению дефектов и локальным разрушениям кристаллической решетки металла [22] без существенного нагрева поверхности и объема металла. Измерения параметров исходной плазмы показали, что в микроволновом плазменном факеле ионов и нейтральных атомов перезарядки с энергиями выше 10 кэВ не существует. Измерения энергетических спектров тяжелых частиц плазмы, выполненные в аналогичных условиях на данной установке [11], показали, что имеется поток быстрых ионов с максимальными энергиями не выше 6 кэВ. Ионы с такими энергиями ускоряются в микроволновом плазменном факеле на скачке потенциала, формирующемся вблизи критической концентрации плазмы вследствие процессов усиления электрической компоненты микроволнового поля и локального ускорения электронов [11]. Направление вылета ионов в сторону разреженной плазмы и их низкие энергии не могут вызвать сколь угодно значительных радиационных разрушений в металле образцов, размещаемых в плотной сверхкритической плазме микроволнового факела. Исследования поверхности образцов, проведенные с помощью электронного микроскопа с увеличением до 3000 раз, не выявили специфический тип эрозии

металлов — блистеринги или “пузыри”, характерные для радиационного механизма воздействия [22].

**Тепловой механизм воздействия** обусловлен наличием высокоинтенсивного теплового потока из плазмы на поверхность твердого тела, переносимого электронами, тяжелыми частицами плазмы или излучением плазмы. При этом средняя энергия тяжелых частиц плазмы и электронов может быть небольшой (менее 100 эВ), но за счет высокой плотности плазмы поток энергии на поверхность может быть несколько значительным по величине. При достаточно высокой интенсивности и большой длительности потока энергии из плазмы на поверхность металлического образца его воздействие может привести к сильному нагреву и плавлению поверхностного слоя металла [22, 25].

Возможность реализации теплового механизма можно оценить по известным параметрам плазмы. При умеренных значениях температуры плазмы микроволнового факела ( $T_e \leq 300$  эВ) и невысоких значениях концентрации заряженных частиц ( $n_e \leq 10^{13}$  см<sup>-3</sup>) интенсивность излучения в плазме существенно ниже интенсивности потока энергии, обусловленного бомбардировкой поверхности образца электронами и ионами плазмы. Максимальный поток энергии, переносимый плазмой на поверхность, можно оценить из выражения

$$I_T \approx 1/3 (n_e T_e v_e), \quad (1)$$

где  $n_e$  и  $T_e$  — концентрация электронов в плазме и их температура, соответственно;

$v_e$  — тепловая скорость электронов плазмы.

Такое значение потока может быть реализовано только на такой объект, который находится под потенциалом плазмы. В случае сильной электронной эмиссии с поверхности металлического образца его потенциал становится близок к потенциалу плазмы, и с поверхности образца будет достигать полный поток плазмы, определяемый выражением (1). При этом энергия потоков электронов и ионов плазмы на поверхность металла может проявиться в поверхностном нагреве металла. Поскольку глубины пробега электронов и ионов плазмы в металле малы (даже при энергиях электронов около 1 кэВ их пробеги не превышают величину 0,1 мкм, пробеги ионов — на несколько порядков меньше), то температура поверхности и глубина прогрева будут определяться балансом между подводимым из плазмы потоком энергии и отводимым потоком энергии от поверхности в глубинные слои металла вследствие его высокой теплопроводности. В случае взаимодействия плазмы микроволнового факела с металлическими образцами реализуется импульсный поток энергии из плазмы на металл с характерным временем существования  $\tau$ , приблизительно равном длительности импульса микроволнового излучения. Величина прироста температуры  $T_s$  на поверхности металлического образца может быть оценена из соотношения [25]

$$T_s \approx (2I_T / c\rho\pi^{1/2})(\tau / \chi)^{1/2}, \quad (2)$$

здесь  $\chi$  — температуропроводность металла образца;

$c, \rho$  — удельная теплоемкость и массовая плотность металла образца, соответственно,

тогда глубина прогрева  $a$  за время действия потока плазмы  $\tau$  оценивается по формуле [25]

$$a \approx (\tau \chi)^{1/2}. \quad (3)$$

В экспериментальных условиях взаимодействия плазмы микроволнового факела с образцами из железа характерные значения параметров плазмы и

металла были следующими:  $n_e \approx 6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ;  $T_e = 300 \text{ эВ}$ ;  $\chi = 0,1 \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$ ;  $c = 0,5 \text{ Дж/град}$ ;  $\rho = 7,8 \text{ г/см}^3$ ;  $\tau = 10^{-5} \text{ с}$ . Подставляя в формулы (1), (2) и (3) экспериментальные значения параметров плазмы и характеристики металла образцов, получаем максимальную оценку значения прироста температуры поверхности металла  $T_s \leq 20 \text{ }^\circ\text{C}$  и глубину прогрева  $a \approx 10^{-3} \text{ см}$ . Эти оценки температуры почти на два порядка ниже температуры плавления металла образцов, что указывает на невозможность реализации механизма теплового поверхностного разрушения металла в результате воздействия потоков частиц из плазмы микроволнового факела на образцы.

**Микроплазменный механизм** (возбуждения униполярных дуг) обусловлен прежде всего наличием значительной напряженности электрического поля величиной  $10^6 - 10^7 \text{ кВ/см}$  [23] в приграничном слое между плотной и горячей плазмой микроволнового факела и металлом. Столь сильные электрические поля могут вызывать взрывную эмиссию электронов с локальных участков поверхности металла. Дальнейшее развитие во времени взрывных эмиссионных процессов на металлическом образце в плазме приводит к возникновению микроплазменных разрядов в локальных участках поверхности образца с температурой выше температуры плавления металла. Поддержание микроплазменных разрядов на металлах требует довольно значительных электрических токов ( $J_{\min} \sim 10 \text{ А}$ ), циркулирующих между плазмой и образцом. Проходящий через микроплазменный разряд электронный ток эмиссии из образца замыкается током горячих электронов из плазмы на металл или на стенки вакуумной камеры. Это условие поддержания тока микроплазменного разряда возможно в плазме с достаточно высокими значениями температуры электронов  $T_e$  и электронной плотности  $n_e$ :  $T_e > 10 \text{ эВ}$ ,  $n_e > 10^{12} \text{ см}^{-3}$  [1, 8, 9]. При этих параметрах плазмы максимальное значение плотности электронного тока из плазмы на образец может превысить  $20 \text{ А/см}^2$ , и для образца с площадью поверхности несколько квадратных сантиметров минимальное значение тока для поддержания микроплазменного разряда будет выше.

Таким образом, в условиях микроволнового плазменного факела параметры плазмы значительно превосходят минимально необходимые значения для поддержания микроплазменного разряда и, следовательно, реализация микроплазменного механизма воздействия на металлические образцы возможна и может привести к наблюдаемым экспериментам локальным эрозионным явлениям.

Рассмотрим более подробно условия реализации микроплазменного механизма воздействия на металлы. Величина электрического поля плазмы вблизи поверхности металлического образца, помещенного в плазму микроволнового факела, может быть рассчитана по формуле [14]

$$E^2 \approx 8\pi n_e T_e [1 - (m_i/m_e)^{-1/2}] [(m_i/m_e)^{1/2} - 1]. \quad (4)$$

Оценка величины напряженности электрического поля на поверхности металла, помещенного в водородно-углеродную ( $m_i/m_e \approx 1860$ ) плазму с параметрами  $n_e = 6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ,  $T_e = 100 \text{ эВ}$  дает значение напряженности  $E \approx 2 \cdot 10^6 \text{ В/см}$ .

Наличие электрического поля большой величины на поверхности металла в плазме может вызвать процесс автоэлектронной эмиссии из металлического образца с плотностью тока, определяемой из выражения [24]

$$j \approx 1,55 \cdot 10^{-6} (E^2/\phi) \exp\{-6,85 \cdot 10^7 \phi^{3/2} E^{-1} \theta(3,62 \cdot 10^{-4} \phi^{-1} E^{1/2})\}, \quad (5)$$

где  $j$  — плотность тока автоэлектронной эмиссии,  $\text{А/см}^2$ ;

$E$  — электрическое поле на поверхности металла,  $\text{В/см}$ ;

$\phi$  — работа выхода электрона с поверхности металла в вакуум, эВ;  
 $\theta(y)$  — функция Нордгейма ( $\theta(y) = 0,95 - 1,03y$ ;  $y = 3,62 \cdot 10^{-4} \phi^{-1} E^{1/2}$ ).

Формула (5) справедлива для температуры поверхности металла  $T = 0$  К.

При температуре металла выше нулевой  $T \gg 0$  К имеет место заметный вклад в эмиссионный ток из металла в вакуум как туннельного автоэмиссионного механизма, так и термоэмиссионного.

Для относительно высоких температур ( $T \gg 1000$  К) и небольших значений напряженности электрического поля ( $E \ll 10^7$  В/см) реализуется термо-, автоэлектронная эмиссия ( $T$ — $E$  эмиссия), при этом величина плотности тока эмиссии может быть рассчитана по формуле [24]:

$$J(T_{ЭГ}) \approx 32\pi^4 m e k^2 T_{ЭГ}^2 h^{-3} \exp\{(e^{3/2} E^{1/2} - \phi) / k T_{ЭГ}\} [\lambda_1 / \sin \lambda_1], \quad (6)$$

здесь  $T_{ЭГ}$  — температура электронного газа в металле;

$k$  — постоянная Больцмана;

$h$  — постоянная Планка;

$\phi$  — работа выхода электрона из металла;

$\lambda_1 = h e^{1/4} E^{3/4} / 4\pi^2 m^{1/2} k T_{ЭГ}$ .

Для промежуточного случая умеренных полей ( $E \sim 10^7$  В/см) и температур ( $T \sim 1000$  К) величина плотности тока термо-, автоэлектронной эмиссии определяется выражением [24]

$$J(T_{ЭГ}) \approx 4\pi m e k^2 T_{ЭГ}^2 h^{-3} (\pi t / 2)^{1/2} \lambda_2 \exp\{-\phi / k T_{ЭГ} - \lambda_2 / 24(3/t^2 - 2\theta/t^3)\}, \quad (7)$$

где  $t(y) \approx 1$ ,  $\lambda_2 = h^2 e^2 E^2 / 4\pi^2 m k^3 T_{ЭГ}^3$ .

Для случая сильных полей ( $E \gg 10^7$  В/см) и относительно низких температур ( $T < 1000$  К) (или  $E$ — $T$  эмиссия) выражение для плотности тока с поверхности металла в вакуум имеет вид [24]

$$J(T_{ЭГ}) \approx (e^3 E^2 / 8\pi h^2 \phi) \exp\{-(8\pi(2m)^{1/2} \phi^{3/2} \theta) / 3ehE\} (\pi T_{ЭГ} / 2T) / \sin(\pi T_{ЭГ} / 2T), \quad (8)$$

где  $T = ehE / 8\pi(2m)^{1/2} t k \phi^{1/2}$  — температура инверсии.

Физический смысл температуры  $T$  связан с изменением режима охлаждения и нагревания эмиттера [24].

При  $E \rightarrow 0$ , т. е. при “чистой” термоэлектронной эмиссии, эмиттер охлаждается на величину  $2kT_{ЭГ}$  при каждом элементарном акте эмиссии электрона; при  $T_{ЭГ} \rightarrow 0$  эмиттер разогревается каждым эмитированным электроном на величину  $2kT$ ; при  $T_{ЭГ} = T$  калориметрический фактор исчезает, а если  $T_{ЭГ} > T$  — эмиттер охлаждается.

Для использовавшихся в экспериментах металлов табличные значения работы выхода металлов находятся в интервале значений  $\phi = 3,95 - 4,5$  эВ [21]. Оценка плотности тока для механизма авто-, термоэлектронной эмиссии ( $E$ — $T$  эмиссия), (8) дает значения на несколько порядков меньше, чем наблюдаемые в эксперименте плотности тока. Наблюдаемые средние значения токов в микроплазменных разрядах на образцах металлов в плазме микроволнового факела составляют значения около  $J_{ср} \approx 100$  А, а соответствующие им размеры областей эмиссии — кратеров имеют характерные диаметры около  $\phi \approx 10$  мкм. На основе микроскопических исследований показано, что одновременно могут возникать несколько кратеров (в некоторых случаях в одном импульсе возникают до ста кратеров  $n=100$ ). В этом случае плотности токов можно оценить из выражения

$$j \approx J_{ср} / (\eta \pi \phi^2 / 4) \approx 10^5 \div 10^6 \text{ А/см}^2. \quad (9)$$

В отдельных экспериментах наблюдались максимальные токи в несколько раз большие (до 200–300 А), а размеры кратеров — на порядок меньшие ( $\phi \sim 1$  мкм).

Таким образом, отдельные экспериментальные значения плотности тока достигают очень больших значений, т. е. порядка  $10^7$ – $10^8$  А/см<sup>2</sup>. Как легко рассчитать из формулы (8), такие высокие значения плотности тока не могут быть достигнуты при значениях температуры  $T_{эп} \sim 2000$  К и тех значениях напряженности электрических полей в плазменном слое вблизи металлических образцов, которые могут реализоваться в эксперименте ( $E \sim 10^6$  В/см).

Рассмотрим физические причины, которые могут привести к усилению плазменного электрического поля вблизи поверхности металла в плазме и, следовательно, к увеличению тока эмиссии с поверхности образца. Как было показано при микроскопических исследованиях исходных и эродированных в плазме образцов, их поверхность имеет множество микровыступов или “микроострий”, размеры которых можно приблизительно оценить по профилограммам, а также из данных исследования поверхности с помощью растрового электронного микроскопа. Оценки коэффициента усиления  $\beta$  электрического поля на микровыступах вблизи поверхности металлического образца могут быть рассчитаны по формулам, приведенным в [27]. Например, для микровыступа в виде эллипсоида вращения, расположенного на металлической плоскости, величина коэффициента усиления электрического поля  $\beta$  определяется формулой

$$\beta = \xi h/r_3 + 1, \quad (10)$$

где  $\xi = 1-0,4$ ;  $r_3$  — радиус вершины микровыступа;  $h$  — его высота.

Для микровыступа в форме конуса со сферической вершиной радиусом  $r_3$  и углом конуса 5–10 град формула для  $\beta$  имеет вид

$$\beta = 0,5h/r_3 + 5. \quad (11)$$

Для микровыступа в форме цилиндра со сферической вершиной радиусом  $r_3$  и высотой  $h$  формула для  $\beta$  имеет вид

$$\beta = h/r_3 + 2. \quad (12)$$

Локальная напряженность электрического поля  $E_{\text{макс}}$  вблизи острия микровыступа может быть существенно выше среднего плазменного поля  $E_{\text{ср}}$  в переходном слое у плоской поверхности образца  $E_{\text{макс}} \approx \beta E_{\text{ср}}$ .

Изучения профилограмм и рельефа поверхности в электронном микроскопе показали, что на поверхности исследовавшихся исходных и эродированных в плазме металлических образцов микровыступы имеют характерные соотношения  $h/r_3 \approx 10$ . Следовательно, на металлических образцах в плазме коэффициент усиления электрического поля  $\beta$  не превышает значения  $\beta \leq 10$ . Учет такого усиления поля дает максимальные значения электрического поля  $E_{\text{макс}} \approx 10^7$  В/с, что недостаточно для получения из выражения (8) необходимых значений плотности тока порядка  $10^7$  А/см<sup>2</sup>.

Таким образом, увеличение максимального значения электрического поля за счет микроострий не приводит к согласию с экспериментальными данными по плотности тока автоэлектронной эмиссии с поверхности образцов, а следовательно, к сильному локальному выделению тепла и переходу в термоэлектронную эмиссию [24].

Параметром, значение которого существенно влияет на величину плотности тока (при относительно умеренных значениях среднего электрического поля в плазменном слое на поверхности металлических образцов), является работа выхода электрона из металла в вакуум  $\phi$ . Работа выхода  $\phi$  определяет

величину энергетического барьера для электронов, выходящих из металла в вакуум. Плотность тока эмиссии с поверхности металла в сильном электрическом поле определяется квантовым явлением подбарьерного проникновения электронов. Изменения величины работы выхода сильно влияют на конечное значение плотности тока авто-, термоэлектронной эмиссии (в (8) величина работы выхода  $\phi$  входит в показатель экспоненциального множителя). В случае присутствия на поверхности металла локальных мест с пониженным значением работы выхода они существенно не могут повлиять на средний ток автоэлектронной эмиссии со всей поверхности металлического образца. В то же время присутствие локальных микрообразований с низким значением работы выхода электронов может существенно повлиять на взрывоэмиссионные процессы и на процессы формирования микроплазменных разрядов на металлических образцах в плазме.

Можно предположить, что в горячей плазме микроволнового факела протекают процессы, при которых реализуются аномально низкие значения работы выхода электронов из локальных участков поверхности металла в плазму ( $\phi \sim 1$  эВ). К таким процессам в плазме можно отнести явление сильного возбуждения электронной подсистемы твердых тел (диэлектрических кристаллов) при их бомбардировке электронами вторично-эмиссионного микроволнового разряда с характерными энергиями около 1 кэВ и плотности тока около 1 А/см<sup>2</sup> [13]. При таких невысоких значениях энергии электронов и плотности тока в приповерхностном слое диэлектрических кристаллов возникает сильное возбуждение электронной подсистемы. При этом в приповерхностном слое диэлектриков происходят образование и накопление высокой концентрации короткоживущих центров окраски ( $N \sim 10^{19}-10^{20}$  см<sup>-3</sup>). В дальнейшем быстрая релаксация этих короткоживущих центров окраски приводит к образованию высокой концентрации электронов в зоне проводимости диэлектриков и возникновению сильнонеоднородной наведенной электрической проводимости в их приповерхностном слое [13]. Появляющиеся в результате релаксации короткоживущих центров окраски свободные электроны в зоне проводимости диэлектрического кристалла могут иметь энергии, соизмеримые с величиной работы выхода (1—3 эВ), что означает эффективное снижение энергетического барьера для выхода электронов в вакуум [13].

Как показали наши экспериментальные исследования, привязка мест интенсивной эрозии и, следовательно, локальной электронной эмиссии обусловлена наличием структурных дефектов или примесей в виде диэлектрических или полупроводниковых микровключений в основную структуру металлов и сплавов. Так, для сплава из нержавеющей стали типа 12Х18Н9Т характерны микровключения карбида титана, который является поликристаллическим материалом, обладающим свойствами как диэлектриков, так и полупроводников. Взаимодействие таких диэлектрических и полупроводниковых микровключений как карбид титана с потоками горячих электронов микроволнового плазменного факела может быть соизмеримо по интенсивности с воздействием электронов микроволнового вторично-эмиссионного разряда.

Как показано в работах [28, 29], вторично-эмиссионный электронный микроволновый разряд (при концентрации электронов около  $10^{10}$  см<sup>-3</sup> и характерной энергии 1 кэВ) создает возбуждения в поверхностном слое кристаллов фторида лития на уровне плотности энергии 500 Дж/см<sup>3</sup>. В плазме микроволнового факела при концентрации электронов около  $10^{12}$  см<sup>-3</sup> и температуре электронов 100 эВ (в присутствии быстрого электронного

компонента с характерной энергией 10 кэВ) удельный энерговклад в поверхностном слое металла и диэлектрических и полупроводниковых микровключений оказывается на один или два порядка выше.

Таким образом, процессы возбуждения микровключений в плазме микроволнового факела могут идти значительно эффективнее по сравнению с вторично-эмиссионным электронным разрядом. Эти процессы могут привести к возникновению горячих свободных электронов в зоне проводимости диэлектрических микровключений, появлению наведенной электрической проводимости в диэлектрических микровключениях на металле и снижению работы выхода электронов из металла в плазму.

Как установлено экспериментально, микровключения, как правило, играют существенную роль в иницировании микроплазменных разрядов, формировании локальных центров эмиссии и возникновении эрозии в виде кратеров. Аналогичные процессы наблюдаются на электротехническом железе: локализация микрократеров происходит в областях поверхности с микропримесями марганца и в образцах сплава алюминия Д16, на поверхности которых микроплазменные разряды концентрируются на железомарганцовистых микропримесях. В связи с тем, что в местах локализации микропримесей нарушается структура кристаллической решетки металла или сплава, это может также привести к существенным изменениям в структуре энергетических зон на границе примесей и основной матрицы, что потенциально может снизить работу выхода в локальной области поверхности. Наличие диэлектрических (окисных пленок) и полупроводниковых микровключений (TiC), локальных участков деформации, как следует из известных ранее и проведенных нами экспериментов, может существенно повлиять на процесс возбуждения микроплазменных разрядов на поверхности металлов и сплавов. В случае существенного изменения величины работы выхода оценки дают величины плотности тока, достаточные для перехода в термоэлектронную эмиссию. Действительно, по данным [24] и из формулы (8), автоэмиссионные токи порядка  $10^7$  А/см<sup>2</sup> оказываются достаточными для перехода за короткие времена (~1 нс) в режим термоэлектронной эмиссии с температурой разогрева локального участка поверхности в несколько тысяч градусов.

Величину скачка температуры  $\Delta T$  на поверхности металла при протекании тока термоэлектронной эмиссии с учетом теплопроводности металла и отвода тепловой энергии в глубинные слои образца можно оценить из формулы [26]

$$\Delta T \approx 2 I (\chi/\tau)^{1/2} / c\rho^{1/2}, \quad (13)$$

где  $c$  и  $\rho$  — удельные теплоемкость и плотность материала образца, соответственно;

$\chi$  — температуропроводность материала;

$\tau$  — время действия импульса тока;

$I$  — плотность потока энергии в локальном участке поверхности, где происходит процесс эмиссии, расплавляется металл и образуется кратер.

Поскольку в области прохождения тока эмиссии наблюдаются интенсивное плавление материала и выброс расплава из кратера, то можно заключить, что температура в кратере существенно превосходит температуру плавления металла. Например, для наиболее тугоплавкого образца из титана величина достигаемой температуры в кратере должна превышать значения температуры плавления и, возможно, температуры кипения (соответственно,  $T_{пл} \approx 1700$  °С,  $T_{кип} \approx 3230$  °С). Отсюда величина скачка температуры в области прохождения тока эмиссии может быть оценена как  $\Delta T \approx 3000$  К. Следовательно, величина интенсивности потока энергии в центре эмиссии может быть оценена как

$$I \approx 1/2 \Delta T \text{ ср} \pi^{1/2} (\chi/\tau)^{-1/2}. \quad (14)$$

Для титана имеем значения  $c \approx 0,523$  кДж/кг·К;  $\rho \approx 22,065$  Вт/м·К;  $\chi \approx 0,1$  см<sup>2</sup> с<sup>-1</sup>; тогда для  $\tau \approx 10^{-6}$  с<sup>-1</sup> получаем значения плотности потока энергии  $I \approx 2 \cdot 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>.

Исходя из полученных значений плотности потока энергии, легко рассчитать величины плотности тока, необходимые для обеспечения таких значений плотности потока энергии за счет омического нагрева. Оценим необходимые для этого плотности токов и значения температуры из выражений

$$I = j^2 / \sigma, \quad j = (\sigma I)^{1/2}, \quad (15)$$

где  $j$  — плотность тока;

$\sigma$  — электропроводность металла.

Для металлического титана с учетом температурного коэффициента электропроводности имеем значение  $\sigma \approx 2,5 \cdot 10^5$  Ом<sup>-1</sup>см<sup>-1</sup>, тогда из формулы (15) получаем значения плотности тока  $j \approx 2 \cdot 10^6$  А/см<sup>2</sup>, которое находится на уровне экспериментальных значений и согласуется с расчетными плотностями тока для термоэлектронной эмиссии. При этом оценка максимального размера эрозионного кратера (в предположении, что за все время прохождения тока область эмиссии не смещается), выполненная из характерного значения теплопроводности металла ( $Ti$ ), дает по порядку величины размер диаметра кратера на уровне  $\phi \approx 2(\chi\tau)^{1/2} \sim 10$  мкм.

Полученные оценки находятся в удовлетворительном согласии с экспериментальными средними размерами кратеров и плотностью тока в микроплазменном разряде на поверхности металлов и сплавов.

Таким образом, оценки и расчеты авто- и термоэлектронных эмиссионных процессов на реальных металлах в горячей плазме микроволнового факела удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными по величине плотностей тока и характеру эрозионных процессов на поверхности металлов и сплавов. Совокупность экспериментальных данных и результатов теоретических оценок позволяют сделать заключение о возможности реализации авто- и термоэмиссионных процессов при возбуждении и поддержании микроплазменных разрядов на поверхности металлов и сплавов в горячей плазме микроволнового разряда.

### Заключение

В результате проведенных исследований изучены процессы возбуждения микроплазменных разрядов на поверхности металлов и сплавов. Разработаны методы диагностики импульсной высокоэнергетичной плазмы; развиты методы изучения эрозии поверхности металлов и сплавов в результате их взаимодействия с плазмой микроволнового факела. Разработаны и усовершенствованы методы электронографии и рентгеновского флюоресцентного анализа для диагностики и исследования эрозионных зон на металлах и сплавах.

Установлено, что взаимодействие горячей плазмы микроволнового факела с металлами реализуется посредством возбуждения микроплазменных разрядов, в которых развиваются эффективные процессы концентрации энергии плазмы (и, следовательно, энергии поглощаемого плазмой микроволнового излучения) на локальных участках металлической поверхности, что и обуславливает процессы эрозии металлов и сплавов.

Показано, что микровключения в структуре поверхности металлов и сплавов играют существенную роль в процессах, определяющих локализацию микроплазменных разрядов и формирование эрозионных кратеров.

Изучены связь структуры и состояния поверхности металлов с процессами, приводящими к возбуждению и локализации микроплазменных разрядов на поверхности металлов и сплавов. Исследован характер эрозионных процессов на металлах (титане, железе) и сплавах (алюминиевом сплаве Д16 и нержавеющей стали 12Х18Н9Т).

Изучены изменения структуры и состава этих металлов и сплавов в эрозионных областях, возникающих в местах локализации микроплазменных образований в плазме микроволновых разрядов.

Выполненные работы представляют собой значительный шаг в понимании фундаментальных физических процессов возбуждения микроплазменных разрядов на металлах, а также серьезное продвижение на пути разработки физических основ новой микроплазменной технологии упрочнения металлов и сплавов.

### Литература

1. *Robson A. E., Thonemann P. C.* An arc maintained on an isolated metal plate exposed to a plasma//Proc. Phys. Soc., 1959, № 73. P. 508.
2. *Bohm D.* The characteristic of Electrical Discharge in magnetic fields. — New-York, McGraw-Hill, ch. 3. 1949.
3. *Кецаев И. Г.* Катодные процессы электрической дуги. — М.: Наука, 1968.
4. *Hothker K., Bieger W., Hartwig H., Hiutz E., Katzik K.* Plasma induced Arcs in RF-Discharge: 4th Int. Conf. on Plasma surface Interaction in Controlled Fusion Devices. — Garmisch-Partenkirchen 1980.//J. Nucl. Material, 93&94, 1980. P. 785—790.
5. *McCracken G. M., Stott P. E.* Plasma-Surface interaction in tokamaks: Preprint UKAEA, Cutham Laboratory, Abindon Oxfordshire, 1979.
6. *Алдохин В. Н., Батанов Г. М. и др.* Униполярные дуги в горячей плазме СВЧ-разряда//Физика плазмы. 1982. Т. 8, № 1. С. 182—188.
7. *Jakubka K., Juttner B.* In the influence of surface conditions on initiation and spot types unipolar arcs in a tokamak//Journal of Nuclear Materials, 1981. № 102. P. 259—266.
8. *Ivanov V. A., Juttner B., Pursch H., Sismroth P.* Initiation and maintenance of unipolar arc-charges by a microsecond pulse plasma/Academie der Wissenschaften der DDR Zentral Institute fur Electronenphysik.
9. *Mioduszewski P.* Unipolar arcing in Fusion devices//Comments Plasma Phys. Count. Fusion. 1980. V. 6. № 1. P. 7—20.
10. *Месяц Г. А., Проскуровский Д. И.*//Письма в ЖЭТФ. 1971. Т. 13. № 1. С. 7.
11. *Батанов Г. М., Иванов В. А.* Плазменно-факельное преобразование энергии СВЧ-волн дециметрового диапазона в энергию квазистационарного электрического тока//В сб. Генерация нелинейных волн и квазистационарных токов в плазме. — М.: Наука, 1988. С. 46—79: Тр. ИОФАН. Т. 16. ISBN 5-02-000751-X.
12. *Месяц Г. А.* Эктоны. Ч. I—III. — Екатеринбург: УИФ "Наука". 1993. ISBN 5-02-007393-8.
13. *Батанов Г. М., Иванов В. А., Коньжеев М. Е.* Микроволновый пробой ионных кристаллов, инициированный вторично-эмиссионным разрядом//Письма в ЖЭТФ. 1994. Т. 59. № 10. С. 655—658.
14. *Козлов О. В.* Электрический зонд в плазме. — М.: Атомиздат, 1969.
15. *Блохин М. А.* Физика рентгеновских лучей. — М.: Госиздат технико-теоретич. лит-ры, 1953. С. 297.
16. *Вайнштейн Б. К.* Структурная электронография — М., 1956.
17. *Эндрюс К., Дфйсон Д., Кюон С.* Электронограммы и их интерпретация. — М.: Мир, 1971.
18. *Горелик С. С., Расторгуев П. Н., Сканов Ю. А.* Рентгенографический и электронографический анализ. — М.: Металлургия, 1970.
19. ASTM, Index (Inorganic). The Powder Diffraction File. 1969. Published the American Society for testing and materials.
20. *Гуляев А. П.* Металловедение. — М.: Металлургия, 1977; *Мальцев М. В.* Металлография промышленных цветных металлов и сплавов. — М.: Металлургия, 1970.
21. Таблицы физических величин: Справочник/Под ред. И. К. Кикоина.
22. *Готт Ю. В.* Взаимодействие частиц с веществом в плазменных исследованиях. — М.: Атомиздат, 1978.
23. *Hantzsch E.* Unipolar Arcs XV Intern: Conference of Phenomena in ionized gases. — Minsk, 1981. P. 184—193.

24. Королев Ю. Д., Месяц Г. А. Автоэмиссионные и взрывные процессы в газовом разряде. — Новосибирск: Наука, 1982.

25. Действие лазерного излучения//Сб. статей/Под ред. Ю. П. Райзера. — М.: Мир, 1968.

26. Фридрихов С. А., Мовнин С. М. Физические основы электронной техники. — М.: Высш. шк., 1982.

27. Месяц Г. А., Проскуровский Д. И. Импульсный электрический разряд в вакууме. — Новосибирск: Наука, 1984.

28. Батанов Г. М., Иванов В. А., Конышев М. Е., Летунов А. А. Люминесценция короткоживущих центров окраски, наведенных в кристаллах LiF-импульсным микроволновым разрядом// Письма в ЖЭТФ. 1997. Т. 66. № 3. С. 163—167.

29. Batanov G. M., Ivanov V. A., Konyzhev M. E. Luminescence of short-lived color centers in LiF-crystals excited by secondary-electron emission microwave discharge//In: Strong Microwaves in Plasmas. V. 1. P. 401—406. Ed. A. G. Litvak. Nizhny Novgorod: Institute of Applied Physics, 1997.

---

*Работа выполнена при поддержке международного проекта РФФИ-ННАО № 99-02-04030, и частично в рамках проектов ФРГ DFG 436RUS113544 и Ju227/8-1.*

## **Excitation and effect of microplasma discharges on metals and alloys in a microwave plasma torch**

*V. A. Ivanov*

General Physics Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*The present work is devoted to research of mechanisms of plasma ignition on metals and alloys located in dense and hot plasma owing to of microplasma discharges or unipolar arcs on the surface of metals and alloys. The link of structure and status of a surface of metals with processes resulting in to excitation and localization of such microplasma discharges was studied. The critical parameters of pulse stream of plasma which exceeding result to the excitation of microplasma discharges on a surface of different metals and alloys with a high scale of probability were defined. The character of erosive processes on some metals and alloys was researched. For generation of plasma a high pulse (duration 1—20  $\mu$ s) power (more than 1 MW) microwave radiation was used. The interaction of dense and hot plasma with metals gives in the result excitation of microplasma discharges on their surface, a melting of local parts of a surface of metals and modification the structure of metals in the locations. Such effects are of interest both from the point of view of fundamental physics, and for development of the technology of hardening of surfaces of metal goods. The process of hardening in this case consists of the excitation of pulse microplasma discharges localized on structural violations and microimpurities in surface layers of materials. The multiple effect of microplasma discharges on metal goods gives in the result the essential lowering of concentration of surface defects and rise of strength of its surface layer. The direction of researches is rather actual and the scientific results of these investigations open new possibilities of practical application.*