

03; 10

© 1991 г.

## ЭМИССИЯ МИКРОКАПЕЛЬ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ЖИДКИЙ МЕТАЛЛ ИНТЕНСИВНОГО ИОННОГО ПУЧКА

*М. Д. Габович, В. А. Хомич*

Обсуждается возможный механизм обнаруженного явления — эмиссии микрокапель металла при бомбардировке расплава интенсивным пучком ионов водорода. Экспериментальные данные согласуются с представлением о том, что ионный пучок вводит в расплав интенсивный поток атомов водорода так, что навстречу в локальном расплаве движутся газовые пузыри, выход которых в вакуум сопровождается капельной эмиссией.

Микрокапли металлов находят все более широкое применение, в основе способов их получения лежат разнообразные физические принципы. К этим способам следует отнести также получение капельной эмиссии при бомбардировке металла интенсивным ионным пучком [1, 2]. Следует заметить, что непосредственно после обнаружения этой эмиссии в отношении ее природы не было достаточной ясности. Дело в том, что полученные еще в работе [3] панорамы капиллярных волн, «замороженных» на поверхности отвердевшего расплава, подвергавшегося ранее бомбардировке ионным пучком, со всей очевидностью демонстрировали срывающиеся с некоторых гребней микрокапли. Поэтому, естественно, в работах [1, 2] обсуждалась возможность объяснения обнаруженной интенсивной капельной эмиссии срывом капель с гребней нелинейных капиллярных волн, релейской неустойчивостью или действием сильного электрического поля. Однако в настоящее время ряд соображений, а в первую очередь новые экспериментальные данные заставили пересмотреть относительный вклад перечисленных процессов. Задачей настоящей работы является выяснение основного, преобладающего механизма установленной интенсивной капельной эмиссии при ионной бомбардировке расплава. В этой связи, как оказалось, нет необходимости касаться здесь условий возбуждения капиллярных волн (одна из возможностей рассмотрена в работе [4]), а также несомненно существующего, но ограниченного по своей интенсивности процесса отрыва капель с гребней этих волн в рассматриваемых условиях.

Принципиальная схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Плотная плазма 1, генерируемая в газах или парах металлов, диффундировала из источника 2 вдоль магнитного поля в вакуумную область и позволяла извлекать из нее на мишень 3, имеющую обычно отрицательный потенциал  $U$  порядка сотен вольт, ионный поток  $I_+ = 1$  А с плотностью тока  $j_+ \approx 10$  А/см<sup>2</sup>. Мишенью служила пластинка исследуемого металла, расположенная под углом к направлению плазменного потока и в случае необходимости хорошо охлаждаемая с обратной стороны. Ионный поток с удельной мощностью до  $10^4$  Вт/см<sup>2</sup> нагревал мишень, и можно было создавать и поддерживать как тонкий поверхностный 4, так и сквозной расплавы диаметром, близким к диаметру зоны ионной бомбардировки. Испускаемые с лицевой стороны расплава капли улавливались коллектором 5 (ситалл или охлаждаемая поверхность металла), который после необходимой экспозиции обследовался с помощью оптического или растрового электронного микроскопов; количество осажденного в виде капель металла

определялось также непосредственно взвешиванием. Таким образом, можно было получать сведения об общем количестве испускаемых капель, их распределении по размерам (рис. 2), судить об угловом распределении их вылета (рис. 3); с помощью устройства, описанного в работе [1], было получено распределение испускаемых капель по скоростям, но только для капель, испускаемых обратной стороной расплава.

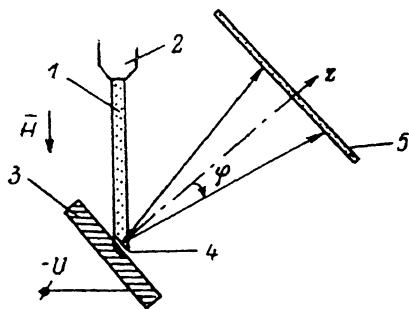


Рис. 1. Схема эксперимента.

В работе [2] уже обращалось внимание на то, что одна из возможных причин наблюдаемой интенсивной капельной эмиссии ( $\nu \approx 10^6 \text{ с}^{-1}$ ) связана со схлопыванием выходящих из расплава газовых пузырей. Ниже будут приведены аргументы в пользу того, что этот механизм является преобладающим, и потому сделаем сперва некоторые, касающиеся его оценки.

Если в расплаве скорее всего на границе с твердой фазой образуется газовый пузырь, то под действием силы  $F = \pi R^2 (d\sigma/dr)$  ( $\sigma$  — поверхностное натяжение, являющееся функцией температуры, а следовательно, и координаты в реальном сложном температурном поле расплава;  $R$  — радиус пузыря) он будет двигаться по направлению к месту максимальной температуры, локализованному в зоне, непосредственно подвергающейся ионной бомбардировке. Как

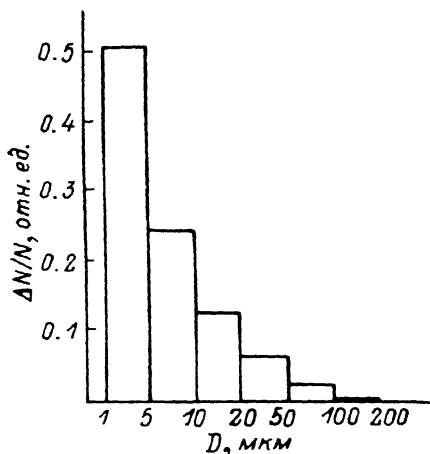


Рис. 2. Распределение капель по размерам.

Мишень из Al марки АДО.

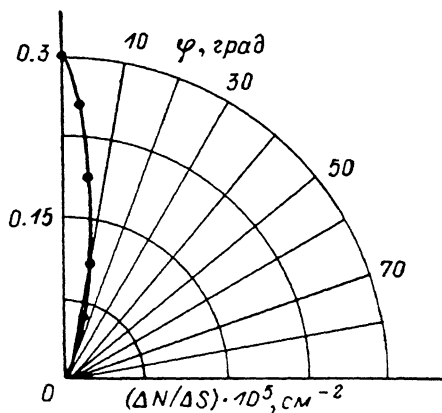


Рис. 3. Угловое распределение капель.

известно, схлопывание выходящего к границе расплав—вакуум газового пузыря представляет собой сложный нестационарный процесс, сопровождающийся, в частности, испусканием капли. Оценим газовый поток, необходимый для пополнения рождающихся пузырей в количестве, равном числу фиксируемых экспериментально капель. Число атомов в пузыре  $N = (PV)/(kT)$ , где  $V = (4/3) \pi R^3$  — объем пузыря, а  $P = P_0 + (2\sigma/R)$  — давление. В наших условиях расплав находится в вакууме, внешнее давление мало  $P_0 = 0$  и  $P = 2\sigma/R$ . Таким образом,  $N = (8\pi\sigma R^2)/(3kT)$ , поэтому при  $T = 10^3 \text{ К}$ ,  $\sigma = 1 \text{ Н/м}$  и  $R = 10^{-4} - 10^{-5} \text{ м}$  величина  $N \approx 10^{10} - 10^{12}$ . Ионный пучок с током  $I_+ = 1 \text{ А}$  несет с собой  $I_+/e \approx 10^{19}$  атомов  $\text{с}^{-1}$ , следовательно, при максимальном использовании этих атомов для образования пузырей последних было бы достаточно для возникновения  $10^9 - 10^7$  капель  $\cdot \text{с}^{-1}$ . Это верхний предел достижимой за счет данного механизма капельной эмиссии (при токе  $I_+ = 1 \text{ А}$ ). В действительности же не все вводимые в виде ионов атомы используются для образования пузырей.

При бомбардировке расплава потоком легко проникающих в металл протонов с энергией в несколько сотен эВ на глубине  $h \approx 100 \text{ \AA}$  [5] следует ожидать максимальной концентрации атомов водорода. Если движение атомов от этой зоны происходит чисто диффузионным путем, когда поток пропорционален градиенту концентрации, то лишь часть потока  $\xi \approx h/\Delta$  ( $\Delta$  — глубина расплава) может служить для заполнения пузырей; при  $\Delta \approx 10^{-1}$  см максимальное число испускаемых капель в этом случае ограничено значением  $10^5 - 10^3 \text{ с}^{-1}$ . В действительности же движение атомов растворенного водорода определяется не только диффузией, но и перемешиванием расплава при действии интенсивного ионного потока, как и при лазерном облучении [6], образуется зона расплава с значительным градиентом температуры. В связи с зависимостью  $\sigma$  ( $T$ ) на единицу поверхности действует сила  $(\partial\sigma)/(\partial x)$  (направленная от оси ионного потока к периферии бомбардируемой зоны), уравниваемая вязкой силой  $\eta (\partial v_z/\partial z)$ , где  $z$  — нормаль к поверхности расплава. В этих условиях образуется вихревое движение, при котором нагреваемый в зоне бомбардировки металл охлаждается на границе расплава с твердой фазой. Оценки приводят к значениям скорости  $v_z$ , означающим хорошее перемешивание металла. Какой-либо достоверный количественный анализ затруднителен, более убедительным является непосредственное экспериментальное установление глубинного (миллиметрового масштаба) легирования титана углеродом [7] и нержавеющей стали титаном [8] в условиях, аналогичных рассматриваемым. Таким образом, конвективное перемешивание может способствовать поступлению в глубь расплава атомов водорода, сопровождаемому возвратным их движением в виде газовых пузырей. Естественно, что все приведенные соображения указывают лишь на правоту гипотезы, предлагаемой для объяснения наблюдаемой капельной эмиссии, но решающим все же должен быть специально поставленный эксперимент.

Мишень	H+	N+	Cu+	e
	Количество капель, осевших на коллектор за 1 с			
Cu	$2 \cdot 10^6$	$1.5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$
Sn	$3 \cdot 10^5$	$1.5 \cdot 10^3$	—	$4 \cdot 10^2$
Ag	$4 \cdot 10^5$	$10^3$	—	20
Al	$10^5$	—	—	3—4

Основной эксперимент, результаты которого представлены в таблице, состоял в сопоставлении числа испускаемых капель при бомбардировке различных мишеней потоками ионов водорода, азота, меди и также электронов. Мощности перечисленных потоков регулировались так, чтобы обеспечить идентичность зоны расплава, капельная эмиссия которой определяется в различных условиях.

Как и можно было ожидать, ввиду лучшей проникающей способности протонов число капель максимально при бомбардировке ионами водорода. При бомбардировке ионами азота число капель снижается примерно на два порядка. Особый интерес представляет наблюдение капельной эмиссии при бомбардировке мишени (меди) ионами меди или электронами, когда введение ионов газа в расплав исключено. Капельная эмиссия снижается при этом почти на три порядка. При переходе от бомбардировки алюминия ионами водорода к электронной бомбардировке капельная эмиссия снизилась на четыре порядка. Все эти результаты вполне согласуются с гипотезой о том, что наибольшее количество капель, получаемых при бомбардировке ионами водорода, связано с проникновением последних в глубь расплава и образованием пузырей. Остаточная эмиссия (при бомбардировке ионами меди либо электронами) связана опять-таки с образованием газовых пузырей (вакуумное обезгаживание расплава) либо с каким-то иным механизмом, например со срывом капель с гребней капиллярных волн. Следует заметить, что замороженные капиллярные волны наблюдались как при бомбардировке ионами водорода, так и при бомбардировке ионами азота, меди и электронами

Важным результатом экспериментов является отсутствие капельной эмиссии из глубокого расплава (получаемого, например, с помощью дополнительного источника тепла) даже при бомбардировке ионами водорода. Эмиссия наблюдается лишь при локальном, неглубоком расплаве, когда вблизи зоны бомбардировки существует граница твердой и жидкой фазы. Что касается распределения капель по размерам (рис. 2), то, по-видимому, при уменьшении глубины расплава исключается образование крупных капель.

Наконец, образование газовых пузырей может быть показано со всей очевидностью следующим образом. Если на металлическую пластинку посадить несмачивающую ее медную каплю миллиметрового масштаба и подвергнуть последнюю бомбардировке ионами водорода, то капля начинает заметно на глаз увеличиваться в размерах с характерным временем порядка секунд, а затем лопается, как пузырь, и уменьшается в размерах до прежней величины. Из формулы  $N = (8\pi\sigma R^2)/(3kT)$  следует, что газовый пузырь с радиусом  $R = 10^{-1}$  см должен содержать  $\sim 10^{15}$  атомов. Это количество атомов вполне могло поступить из пучка ионов водорода с током  $I_+ = 1$  А ( $\sim 10^{19}$  атомов  $\cdot$  с $^{-1}$ ) даже с учетом того, что большая часть атомов возвращается в вакуум диффузионным путем, не достигая пузыря, который в этих условиях был единственным и существовал, увеличиваясь в размерах, несколько секунд.

Приведенные выше эксперименты и соображения позволяют заключить, что пучком ионов водорода с током 1 А можно вызвать эмиссию металлических капель микронного масштаба в количестве  $\sim 10^6$  с $^{-1}$ . Эта эмиссия связана с внедрением атомов водорода внутрь расплава и образованием газовых пузырей, схлопывающихся при выходе из расплава с появлением капель. Лишь не более одного процента образующихся капель может быть связано с существованием структур, напоминающих капиллярные волны [1, 2], или с другими причинами.

В заключение стоит остановиться на сборе капель коллектором. При бомбардировке мишени из алюминия (АДО) в течение 50 мин пучком ионов водорода с током 1 А на охлаждаемой медной поверхности образовался слой капель весом около 1 г.

#### Список литературы

- [1] Габович М. Д., Хомич В. А. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. Вып. 20. С. 1225—1228.
- [2] Габович М. Д., Хомич В. А. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. Вып. 11. С. 673—677.
- [3] Габович М. Д., Порицкий В. Я. // Письма в ЖЭТФ. 1981. Т. 33. Вып. 6. С. 320—324.
- [4] Владимиров В. В., Головинский П. М. // ЖЭТФ. 1982. Т. 82. Вып. 5. С. 1464—1469.
- [5] Готт Ю. В., Яелинский Ю. М. Взаимодействие медленных частиц с веществом и диагностика плазмы. М.: Атомиздат, 1973. 128 с.
- [6] Веденов А. А., Гладуш Г. Г. Физические процессы при лазерной обработке материалов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 208 с.
- [7] Патон Б. Е., Габович М. Д. и др. // ДАН СССР. 1978. Т. 239. № 3. С. 576—578.
- [8] Патон Б. Е., Габович М. Д., Гуревич С. М. и др. // ДАН СССР. 1983. Т. 273. № 1. 104 с.

Институт физики АН УССР  
Киев

Поступило в Редакцию  
30 января 1990 г.