

*Абдыкеримова А.С.*

**ОБ УДЕЛЬНОЙ ВВЕДЕННОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ВЗРЫВЕ И ДИСПЕРГИРОВАНИИ МЕТАЛЛОВ В ИНЕРТНОЙ АТМОСФЕРЕ И ИМПУЛЬСНОЙ ПЛАЗМЕ В ЖИДКОСТИ**

*A.S. Abdykerimova*

**ABOUT THE SPECIFIC ENTERED ENERGY AT ELECTRIC EXPLOSION AND DISPERGIRED METALS IN AN INERT ATMOSPHERE AND PULSE PLASMA IN LIQUID**

УДК: 621.365:66.046.584.1:661.961.945:543.5(575.2)(04)

*Проведено сравнение удельной введенной в проводник энергии при электрическом взрыве и диспергировании металлов в инертной атмосфере и импульсной плазме, создаваемой в расплаве серы.*

*The summary comparison of the specific energy entered into a conductor  $I_s$  lead at electric explosion and dispergiired metals in an inert atmosphere and the pulse plasma created in melt of sulfur.*

Процессы образования высокодисперсной фазы при воздействии на твердое тело энергии большой мощности изучены недостаточно. Механизм диспергирования, например, металлов из-за экстремальных условий протекания этих процессов и многофакторности изучаемых явлений более реален через изучение структуры и свойств, формирующихся при диспергировании твердого тела дисперсий [1].

Определяющим фактором регулирования дисперсности образующихся сред при электрическом взрыве металлических проволочек в инертной атмосфере является вводимая в металл энергия [1,2]. С увеличением удельной введенной энергии  $E$  от  $0,8 E_c$  до  $(1,6-1,8) E_c$  ( $E_c$  – энергия сублимации металла) дисперсность конечных продуктов растет, последующий ввод дополнительной энергии становится неэффективным. Дисперсность продуктов электрического взрыва (ЭВ) медных проводников в воздухе при одинаковом значении удельной введенной энергии ( $E/E_c = 1,5$ ) возрастает с повышением плотности мощности (скорости введенной энергии) [2].

Диспергирование металлов, проводимое автором данной статьи, протекает в импульсной плазме, создаваемой между электродами из металлов, помещенными в расплав серы. Импульсная плазма создается вводом в металлический проводник электрической энергии [3].

В целом это очень сложное физическое явление, связанное с рядом изменений физического состояния вещества. Важнейшие стадии его развития связаны с нагревом твердого

проводника, его плавлением, нагревом жидкой фракции, приводящим к парообразованию. Последнее идет как на поверхности, так и в объеме вещества, с ним сопряжено образование поперечных к току страт – чередований слоев вещества, различающихся плотностью [4]. Образование страт и приводит к электрическому взрыву проводника. После взрыва в парах продуктов развиваются ионизация и шунтирующий разряд, охватывая и возникающую внешнюю плазму. Все эти тесно взаимосвязанные процессы, как правило, слабо изучены, а имеющиеся данные вряд ли позволяют надеяться на создание какой-то универсальной модели взрыва проводника в импульсной плазме. Микровзрыв проводника проявляется в резком расширении вещества, интенсивно нагреваемого токовым импульсом, визуально он регистрируется по вспышке света (рис.1)



**Рис.1.** Микровзрыв проводника при протекании единичного импульса.

В настоящее время существует ряд попыток как-то классифицировать типы электрического взрыва проводников. В основе их лежит отношение времен развития магнитогидродинамической (МГД) неустойчивости и нарушения механизма электрической проводимости [5].

Это отношение определяется скоростью

ввода энергии, физическими и геометрическими свойствами проводника. Первая такая классификация была дана У. Чейсом [6], различавшим медленный и быстрый режимы взрыва с граничной скоростью ввода энергии 0,1 кДж/г·нс. При интенсивности  $>10^2$  кДж/г·нс ( $\sim A$  эВ/атом·нс, где  $A$  – массовое число элемента) возникает сверхбыстрый взрыв (взрывная абляция – взрывной вынос вещества проводника).

Время существования импульсной плазмы -  $10^{-3}$  –  $10^{-4}$ с, откуда интенсивность вводимой энергии  $> 10^3$  кДж/г·нс, т.е. возникает сверхбыстрый взрыв.

Процесс разрушения (абляции) единичным импульсом сопровождается термическими эффектами и механизмами деструкции проводника. Следствием является взрывное испарение материала проводника и выброс его из зоны нагрева. Абляционный процесс эффективен в том случае, если вся подводимая к проводнику энергия расходуется только на испарение заданного объема, а не на нагревание соседних участков. Однако (рис.3), образуется зона поражения за счет передачи тепла диффузией из зоны абляции в окружающие участки.

Поскольку длительность импульса можно варьировать в достаточно широких пределах (от 1 мкс до непрерывного режима), то можно управлять и глубиной поражения в широких пределах (от нескольких мкм до нескольких мм). Естественно, что длительность импульса будет зависеть от количества подводимой энергии: чем больше энергия, тем больше длительность.

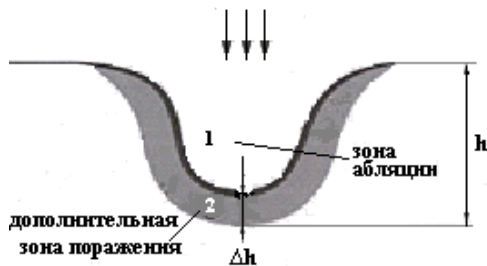


Рис.3. Зоны поражения проводника при воздействии потока электронов.

-Чем меньше объем  $V$ , в котором выделяется энергия, тем больше нагревается проводник, т.е. тем выше  $T$ ;

-Чем больше глубина проникновения единичного импульса в проводник  $h$  (больше объем нагреваемого проводника, тем меньше температура  $T$ );

-Объем нагреваемого проводника, следовательно, и температуру можно регулировать вариацией диаметра пятна  $d_0$ ;

-Затрачиваемая на нагрев проводника энергия  $E$  может регулироваться, емкостью конденсаторов в электрической цепи, т.е. может регулироваться диаметр пятна  $d_0$ , вследствие этого объем  $V$ , температура  $T$  [3].

Исходя из изложенного выше, для диспергирования металлов с целью получения наиболее дисперсных систем нами были выбраны наиболее низкие энергии импульсной плазмы ( $I=6A$ ,  $U=220V$ ,  $C=4$  мкФ). В единичном импульсе при этом достигается энергия – 0,0968 кДж.

Величина удельной введенной в тугоплавкие переходные металлы энергии  $E/E_c$  (где  $E$  – количество электрической энергии, введенной в проводник при единичном импульсе,  $E_c$  – энергия сублимации металла), необходимой для их диспергирования в расплаве серы с использованием импульсной плазмы (табл.) находится в пределах значений, полученных авторами [1, 2].

Таблица 1

Me	$E_c$ удельная теплота сублимации кДж/г- атом [ ]	Атом- ная масса металл а	Масса Разру- шенного мате- риала электро- дов моль/имп- $10^6$	$E$ Подве- денная энергия кДж/г- атом	$E/E_c$
Ti	469,3	47,90	0,166	583	1,24
Zr	612,1	91,22	0,118	820	1,33
Hf	611,3	178,49	0,110	880	1,43
V	515,8	50,942	0,076	1382	2,68
Nb	722,2	92,91	0,068	1423	1,97
Ta	782,5	180,95	0,064	1512	1,93
Cr	397	52,00	0,159	608	1,53
Mo	664,5	95,94			
W	847,8	183,85	0,048	2016	2,37

Закономерно было бы ожидать формирование частиц таких же микронных размеров, как и в случае электрического взрыва металлических проволок в инертной атмосфере [1,2]. Но оказалось, что при диспергировании даже таких тугоплавких металлов, как металлы подгрупп титана, ванадия и хрома в расплаве серы с использованием энергии импульсной плазмы формируются наночастицы сульфидов данных металлов. Это достигается благодаря тому, что 90% вводимой в проводник энергии капсулируется в дисперсии образующейся при разрушении проводника в импульсной плазме. Избыточная энергия при этом тратится на формирование большой удельной поверхности частиц дисперсии, т.е. достигается высокая дисперсность частиц.

Фазовый анализ с использованием химии-

ческого, рентгенографического анализов и анализа спектров малоуглового рентгеновского рассеяния позволил установить, что при диспергировании, например, титана в расплаве серы образуется новый трисульфид титана со структурным типом трихлорида хрома со слоистой структурой. Атомы серы образуют деформированную плотнейшую кубическую упаковку. Часть октаэдрических пустот занята атомами титана: один слой пустой, а в соседнем 7/8 всех позиций заселены атомами металла. Атомы титана связаны в слоях таким образом, что образуются бесконечные зигзагообразные цепочки, расстояния между атомами титана в цепочках и между слоями имеют наноразмеры, то есть налицо образование наноструктур, кроме того, что частицы в продукте диспергирования титана имеют наноразмеры – 40-50 нм.

Таким образом, при одном и том же значении удельной введенной энергии дисперсность частиц, полученных в импульсной плазме достигает наноразмеров, в то время как при электрическом взрыве проволочек в инертной атмосфере формируются частицы микронных размеров, т.е. в нашем случае достигается

дисперсность частиц на три порядка выше. Кроме того, при диспергировании металлов с использованием энергии импульсной плазмы в жидкости возможно формирование наноструктур.

#### Литература:

1. М.И.Лернер, В.В. Шаманский. Формирование наночастиц при воздействии на металлический проводник импульса тока большой мощности. //ЖСХ, 2004.-Т.45.-Приложение.- С.112-115.
2. О.Б.Назаренко. Процессы получения нанодисперсных тугоплавких неметаллических соединений и металлов методом электрического взрыва проводников. Автореферат докт. дисс. Томск, 2006.
3. С.К.Сулайманкулова, У.А.Асанов. Энергонасыщенные среды в плазме искрового разряда. Бишкек, 2002.-263 стр.
4. Иваненков Г.В. О процессах «Холодного старта» в пинчевых разрядах через проволочные нагрузки. Препринт 13. ФИАН РАН. М.: 2006.
5. В.А.Бурцев, Н.В.Калинин, А.В.Лучинский. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. М.: Энергаториздат, 1990.
6. W.G.Chase, H.K.Moor, editors. Exploding wires.: Plenum press. V.1, 1959; V.2, 1964; V.3, 1965; V.4, 1968.

*Выражаю глубокую благодарность в проведении экспериментов, обсуждении результатов и консультации д.х.н. Сулайманкуловой С.К.*