

УДК 612.7.044

**Борисевич В. В., Борисевич В. К., Богуслаев В. А., Долматов А. И., Жеманюк П. Д.,
Сабакарь А. И., Скорченко И. В., Третьяк В. В.**

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ И СТРУКТУРНЫХ МИКРОПЛЕНОК В ГЕНЕРАТОРАХ КУМУЛЯТИВНЫХ СТРУЙ

Образование различных наноструктур, как-то аморфных металлических частиц, нанотрубок, фуллеренов, внедрение наноматериалов в мезопористые тела, нанесение наноматериалов на поверхности, превращение протеинов в сфероиды с внедрением во внутреннюю их часть медикаментов, возможно при использовании кавитационных явлений в жидкостях.

Исходя из сказанного в трудах исследователей, наноструктуры образуются в сильно-неравновесных процессах, поэтому определение физико-химических механизмов их образования требует решения пространственно-неоднородных на уровне нанометрового масштаба задач физической и химической кинетики.

Если обратиться к познанию подобного рода явлений, то с 1935 года известен эффект, в результате которого образуются потоки фотонов, электронов, атомов, молекул, субмикронных твердых частиц, порождаются необычные химические соединения.

Это нетепловые взрывы различных твердых тел в условиях высоких давлений и сдвиговых деформаций при наличии свободных поверхностей у них, то есть эффект Бриджмена [1].

Однако механизм физических и химических процессов при этих взрывах остается до сих пор неизвестным, несмотря на наличие в настоящее время некоторых работ, раскрывающих сущность явлений на молекулярно-кинетическом уровне [2].

Целью данной работы является исследование процесса получения наноматериалов и структурных микропленок в генераторах кумулятивных струй.

Конкретизируя эффект Бриджмена, можно сказать, что одноосное сжатие твердых тел до высоких давлений (от 0,1 до 50 мегабар) с деформацией сдвига, а в некоторых случаях и без нее, приводит ко взрывному разрушению твердых тел за время 10^{-5} – 10^{-7} с со скоростью от 200 до 2000 м/с) и выбросу высокодиспергированного до субмикронных размеров вещества.

Важно, что наряду с диспергированием вещества, эффект сопровождается эмиссией звука, разложением вещества, излучением света и жестких фотонов (при γ -излучении), эмиссией высокоэнергетических электронов.

Установлено, что в условиях эффекта Бриджмена происходят следующие явления:

1. Сверхвысокая молекулярная подвижность в твердых телах, которая соответствует коэффициентам диффузии на 10 ... 15 порядков выше по сравнению с твердым телом без нагрузок.
2. Скорости твердофазных химических реакций возрастают на 3–8 порядков, а глубина реакции и выход ее продуктов может приближаться к 100 % для гетерогенных смесей.
3. Все процессы протекают без энергии активации в изотермических условиях.
4. Реализуются эндотермические реакции со сверхбольшими скоростями.
5. Скорости всех химических реакций не зависят от температуры.
6. Время реакций гораздо меньше 10^{-5} – 10^{-6} с.
7. Процессы массопереноса и химические реакции происходят значительно быстрее, чем в жидкой фазе.
8. Эффект сопровождается образованием новых материалов различной структуры.

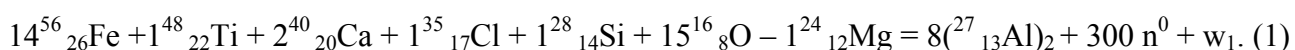
Следует отметить, что проблемы анализа экспериментов и решения соответствующих задач кинетики взрывных твердофазных превращений обусловлены пространственной неоднородностью систем, потребностью учета явлений на различных уровнях:

- микроскопическом – эмиссия фотонов, экзотическая эмиссия электронов, механические реакции;
- мезоскопическом – образование кластеров и микрочастиц, флюидизация, пластическое течение материала;
- макроскопическом – высокие давления, взрывные явления, высокоскоростной выброс вещества, волны фазовых превращений, ударные волны.

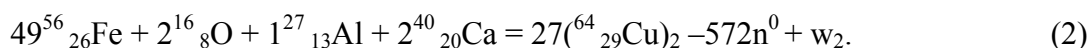
Эффект Бриджмена это получение взрыва со свободной поверхности твердого тела и образование кумулятивной струи, которая в дальнейшем преобразуется в различные структуры. Эти структуры получают из условия взрывного трансмутирования химических элементов, что является новым в технологии производства новых материалов, хотя до настоящего времени известны лазерная и электромагнитная трансмутации элементов. Так наличие достаточно известных трансмутаций позволяет разрешать много прикладных задач, например, преобразование изотопа ^{129}J с периодом полураспада 15,7 млн лет в изотоп ^{128}J с периодом полураспада 27 мин [3]. Преобразование осуществлено импульсным 360 джоулевым лазером с длительностью импульса 0,7 пс. А это может стать недорогим и достаточно эффективным методом утилизации ядерных отходов. Однако масштабы взаимопревращений химических элементов до сих пор находятся на лабораторном уровне, поэтому новый метод взаимопревращений элементов – метод взрывных трансмутаций имеет возможность преобразовать их на новом уровне. Это качественное изменение механических, оптических и электрических свойств известных материалов.

В подтверждение этому можно привести работу И. В. Курчатова, в которой отражены опыты термоядерного превращения легких элементов при помощи электромагнитного воздействия на вещество.

Применительно к взрывной трансмутации элементов можно привести эффективные опыты по преобразованию химических элементов. Так согласно основным теоретическим положениям [4] в данной работе, в частности, при взрывном преобразовании при объяснении учета процентного содержания элементов сплава из алюминия формула их взаимодействия будет иметь вид:



Для сплава из меди формула взаимодействия такая:



Из этих уравнений видно, что компоненты образуются из целого числа кластеров алюминия и меди соответственно при выделении 300 «недостающих» и 572 «избыточных» нейтронов. Как те, так и другие нейтроны образуются из плотной плазмы. Взаимопревращение взрывных трансмутированных химических элементов происходит с выделением энергии w_1 и w_2 .

Краткое освещение эффекта Бриджмена позволило развить его с разных позиций, предусматривающих осуществление всех явлений с учетом геометрии преобразуемого твердого тела. Оказалось, что все явления воспроизводятся при взрыве бризантного взрывчатого вещества (БВВ) в условиях дальнейшего обтекания фронта ударной волны пустотелого конуса [5], вершина которого взрывается в сторону основания. При этом в плотную плазму и жидкий металл превращается, в зависимости от угла при вершине пустотелого конуса, от 6 % до 11 % твердой кумулятивной оболочки [6]. Отразим этот интервал превращения

в жидкий металл при помощи тригонометрической интерполяции [7]. Тогда, если представим m значений функции $y(x_k) = y_k$ ($y_0 = 11, y_1 = 8,5, y_2 = 7,6, y_3 = 7,3, y_4 = 6$) при $x_k = kT/m$ ($k = 0, 1, \dots, m-1$) на интервале $(0, T = 90^\circ)$ тригонометрическим полиномом, получаем такую формулу:

$$y(x) = \frac{1}{2} A_0 + \sum_{j=1}^2 \left(A_j \cos j \frac{2\pi x}{T} + B_j \sin j \frac{2\pi x}{T} \right) \text{ при } 0 \leq j < \frac{m}{2} \quad (3)$$

с условием минимизации отклонений в виде:

$$\sum_{k=0}^{m-1} [y(x_k) - y_k]^2.$$

В формуле (3) коэффициенты определяются из соотношений:

$$A_j = \frac{2}{m} \sum_{k=0}^{m-1} y_k \cos j \frac{2\pi k}{m}; \quad B_j = \frac{2}{m} \sum_{k=0}^{m-1} y_k \sin j \frac{2\pi k}{m}.$$

Как видно из опытов [5], в расчет принимается только жидкое состояние части кумулятивной оболочки, так как фотоны, электроны и плотная плазма по массе составляют небольшую часть от веса жидкой составляющей (по толщине образований 8–30 $\mu\text{м}$ по сравнению с 10–15 нм).

Отсюда, согласно проведенной электронной микроскопии, массы свидетелей и образцов по Al и Cu можно определить по формуле:

$$m = \pi \rho \mu y_k (r_0^3 - r_1^3) / \text{tg } \alpha / 2, \quad (4)$$

где ρ – плотность элемента [8];

μ – процентное содержание элемента в свидетеле или образце;

y_k – процентное содержание элемента в жидкой фазе согласно (3);

r_0 – наружный радиус основания полого конуса кумулятивной оболочки;

r_1 – внутренний радиус основания полого конуса кумулятивной оболочки;

α – угол при вершине полого конуса.

Следует отметить, что, в отличие от отложения плотной плазмы в виде сплошной пленки наноматериалов, структурная микропленка из элементов преобразуется на подложке в виде расплюснутых остывших капель.

Поэтому и имеется превышение масс процесса (см. табл. 1)

Таблица 1

Характеристика образцов

Свидетель при $\alpha = 60^\circ$, г	Al	Al	Si	Fe	Mg	Cu	Ca	Ti	Cl	B	O	сумма, г	Образец/свидетель, %
	Cu	3,38	0,03	0,09	0,02								
Образец при $\alpha = 60^\circ$, г	Al	1,28	0,18	1,08			0,45	0,37	0,21		0,12	3,69	4,83
	Al	2,22	0,06	1,48			0,05	0,04	0,01		0,28	4,14	17,61
	Cu	0,01	0,01	1,33			4,68	0,07		0,01	0,21	0,07	6,39

Как видно из табл. 1, явление синтеза более устойчиво, чем явление разложения и получаемые нано- и микропленки наносятся равномернее по площади, распределяясь на подложке.

Как синтез, так и разложение элементов таблицы Д. И. Менделеева сопровождаются в значительной мере наличием образованных различных наноструктур. Это аморфные металлические наночастицы, нанотрубки, внедрение наноматериалов в мезопористые тела, нанесение наноматериалов на керамические поверхности и др. Все это возможно при использовании кавитационных явлений в жидкостях (сонохимия).

В то же время описание эффекта Бриджмена на микроскопическом уровне приводит к рассмотрению пластической деформации твердого тела с учетом дислокационного явления [2]. Отсюда пластическая деформация соответствует эволюции системы дефектов кристаллического строения (включая генерацию дефектов) под действием внешних полей.

Процессы самоорганизации дефектов могут приводить к их кластеризации (краудионам) и образованию дислокационных петель.

Что касается мезоскопического уровня, то в этом случае пластическая деформация зависит от структуры и условий деформирования дислокационных ансамблей. Эволюционно включается генерация дислокаций, линий скольжения и развития в них кооперативных явлений (границ разориентировки, дисклинаций, полос скольжения). Мезоскопический уровень характеризуется коллективными нелинейными эффектами, отражающими высокую плотность дефектов при их взаимодействии.

Таким образом, оба уровня (микроскопический и мезоскопический) можно отразить на дислокационном уровне [9].

Итак, пластическая деформация среды сопровождается движением дислокаций, которые подразделяются на подвижные и неподвижные.

Подвижными дислокациями являются те дислокации, которые движутся в среде без увеличения внешнего напряжения, но, если увеличить нагрузку на среду, тогда начнут двигаться и неподвижные дислокации.

Считается, что динамической характеристикой среды является скорость пластических деформаций, вычисляемая из соотношения Орована [10]:

$$\dot{\varepsilon} = \rho_m b v, \quad (5)$$

где ρ_m – скалярная плотность подвижных дислокаций;

b – локальный вектор Бюргерса;

v – средняя скорость перемещения дислокаций.

Скорость пластических деформаций в неявном виде зависит от общей плотности дислокаций [10], то есть от подвижных и неподвижных дислокаций, что выражается в соотношении коэффициента $\varphi(\rho_m)$ от средней дистанции между дислокациями $1/\sqrt{\rho_T}$ при общей плотности дислокаций ρ_T :

$$v = v(\sigma, \rho_m) = v^0(\sigma)\varphi(\rho_m). \quad (6)$$

Здесь σ есть наибольшее напряжение сдвига. Такое же соотношение (3) получается и по геометрической формуле Тейлора после некоторых преобразований, а именно:

$$\dot{\varepsilon} = b \frac{d}{d\tau}(\rho L) = b \rho_m \frac{dL}{d\tau} = b \rho_m v, \quad (7)$$

где L – средняя длина дислокационной линии.

Далее важным является введение в линейный континуум динамической характеристики – рывка [11, 12]. На основе его, исходя из связи со скалярной плотностью подвижных дислокаций, по напряжениям и, вызываемыми ими скоростям получаем самосогласованное поле по этим параметрам.

Таким образом, исчезает неопределенность в нахождении напряжений из-за записи их в законе сохранения количества движения в градиентной форме:

$$\rho \frac{di^k}{d\tau} = \rho_m \sigma^{ik} v_i = \rho_m g_{il} \sigma^{lk} v^i, \quad (8)$$

где i^k – вектор ускорения;

ρ – плотность вещества ядра дислокации;

σ^{ik} – компоненты тензора напряжения в среде;

g_{il} – фундаментальный метрический тензор.

В декартовой системе координат выражение (8) будет таким:

$$\rho \frac{di^k}{d\tau} = \rho_m \sigma^{ik} v_i. \quad (9)$$

Если соотнести рывок к единице длины дислокации, то можно записать уравнение движения дислокаций таким образом

$$m \frac{di}{d\tau} = \rho_m b^2 \sigma^{ik} v_i. \quad (10)$$

Далее при решении краевых задач с использованием R -функций находим скорость кумулятивной струи:

$$(\nabla v)^2 + v \Delta v = \rho_m b^2 \sigma / m. \quad (11)$$

Уравнение (11) позволяет рассматривать его как структуру решений основных типов краевых задач для уравнений второго порядка [13] со смешанными краевыми условиями:

$$v|_{\partial\Omega_1} = \varphi_0, \quad [(\frac{\partial v}{\partial \tau})^2 + v h_0]|_{\partial\Omega_2} = \psi_0. \quad (12)$$

Здесь функции φ_0 , h_0 и ψ_0 предполагаются заданными на $\partial\Omega$.

Экспериментальное подтверждение предложенной модели можно считать результаты исследований, проведенных Мейей, Мендосой, Мартинесом и др., отмечены в работе [14].

Что касается макроскопической модели, то теоретические и экспериментальные исследования показали хорошую сходимость в ряде работ [15–19]. Это исследование можно отнести и к описанию генератора кумулятивных струй.

ВЫВОДЫ

Специалистами Национального аэрокосмического университета «ХАИ» и ОАО «Мотор Сич» проведены эксперименты, направленные на исследование данного явления при получении новых материалов для предприятий аэрокосмического комплекса [5].

Разработаны оснастка, технологические процессы и проведена серия экспериментов для исследования возможностей эффекта Бриджмена в генераторах кумулятивных струй для получения наноматериалов и структурных микропленок.

Авторы надеются, что получаемые в генераторе кумулятивных струй планоупакованные структуры дадут возможность изготавливать материалы с новыми свойствами (сверхпроводимость, сверхтвердость и др.) для использования их в промышленности, особенно в аэрокосмическом производстве.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бриджмен П. В. Исследования больших пластических деформаций и разрыва : монография / П. В. Бриджмен. – М. : НИЛ, 1954. – 444 с.
2. О механизме взрывного образования наночастиц / С. К. Асланов, Я. С. Каим, С. Д. Каим // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. – 2007. – Т. 5, № 3. – С. 811–831.
3. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://optics.org/articles/news/9/8/12/1> 14 August 2003.
4. Болотов Б. В. Основы строения вещества / Б. В. Болотов, Н. А. Болотов, М. Б. Болотов. – Запорожье : Запорожская государственная академия, 1996. – 110 с.
5. Состояние исследований по превращению одних элементов в другие с помощью энергии взрыва / В. В. Борисевич, В. К. Борисевич, А. И. Сабакаръ, В. В. Третьяк // 17-я Международная научно-техническая конференция. – Харьков : Типография завода ФЭД, 2011. – С. 73–74.
6. Баум Ф. А. Физика взрыва : монография / Ф. А. Баум, К. П. Станюкович, Б. И. Шехтер. – М. : Гос. издательство физ.-мат. литературы, 1959. – 800 с.
7. Корн Г. Справочник по математике: для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Издательство «Наука», Главная редакция физ.-мат. литературы, 1968. – 720 с.
8. Каганов М. И. Из чего все состоит : статья / М.И. Каганов // Наука и жизнь. – М., 2003. – № 3. – С. 20–27.
9. Борисевич В. К. Введение в теоретическую механику среды / В. К. Борисевич, А. И. Сабакаръ; М-во высшего и среднего образования СССР. – М. : 1986. – 142 с.
10. Nigmatulin A. J. Dislocation Concepts in the Mechanics of Rapid Deformation of Metals / A. J. Nigmatulin, N. N. Kholin // High. Velocity Deformat. Solids. Symp. – Токуо, 1977, Berlin e.a., 1978. – P. 67–81.
11. Боголюбов А. Н. История проблемы ускорений высших порядков / А. Н. Боголюбов // Исследования по истории механики. – М., 1981. – С. 114–127.
12. Манжерон Д. И. Обобщение формул Сомова об ускорениях различных порядков / Д. И. Манжерон. – ДАН СССР, 1955. – 102. – № 4. – С. 705–706.
13. Рвачев В. Л. Теория функций и некоторые ее приложения : монография / В. Л. Рвачев. – Киев : Наукова думка, 1982. – 552 с.
14. Gilra N. K. Creep: Dislocation Acceleration / N. K. Gilra // Indian J. Pure and Appl. Phys, 1980. – 18. – № 11. – P. 899.
15. Франк-Каменецкий Д. А. Плазма – четвертое состояние вещества: монография / Д. А. Франк-Каменецкий. – М. : Атомиздат, 1968. – 160 с.
16. Кирко И. М. Жидкий металл в электромагнитном поле : монография / И. М. Кирко. – М.-Л. : Энергия, 1964. – 160 с.
17. Перник А. Д. Проблемы кавитации : монография / А. Д. Перник. – Л. : Судостроение, 1966. – 440 с.
18. Ландау Л. Д. Механика сплошных сред : монография / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Гостехиздат, 1954. – 788 с.
19. Нигматулин Р. И. Основы механики гетерогенных сред: монография / Р. И. Нигматулин. – М. : Наука, 1978. – 336 с.