

УДК 621.791.76: 621.7.044.2

*А. В. Крохалёв, к-т техн. наук, В. О. Харламов, инженер,
С. В. Кузьмин, д-р техн. наук, В. И. Лысак, д-р техн. наук*

КОМПЬЮТЕРНЫЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СЖАТИЯ ПРИ НАНЕСЕНИИ ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ ВЗРЫВОМ

Волгоградский государственный технический университет, weld@vstu.ru

В работе рассмотрена методика расчетной оценки физических условий сжатия при взрывном нагружении порошков на металлических подложках. Предложена расчетная модель, основанная на построении (P, u) – диаграмм процесса, приведено сравнение результатов расчета с известными данными.

Ключевые слова: взрывное прессование порошков, ударная адиабата, расчетная модель

A. V. Krokhalev, V. O. Kharlamov, S. V. Kuz'min, V. I. Lysak

COMPUTER CALCULATION OF PARAMETERS OF COMPRESSION AT DRAWING OF POWDER COVERINGS BY EXPLOSION

Volgograd state technical university, weld@vstu.ru

The paper considers calculation model of the physical conditions for explosive compacting of powders on metal base. The calculation model based on the construction of (P, u) - diagrams of the process are presented. Comparisons of calculation results with known data are discussed.

Keywords: explosive pressing of powders, shock adiabatic curve, settlement model

Нанесение на поверхность деталей машин износостойких покрытий из твердых сплавов зачастую оказывается невозможным из-за взаимодействия компонентов покрытия и материала подложки во время спекания, необходимого для формирования твердого сплава. Решение этой проблемы возможно путем использования технологии взрывного плакирования, обеспечивающей не только качественную напесовку порошкового слоя на поверхность

заготовки детали, но и возможность получения готового твердого сплава без операции спекания [1].

При проведении подобной операции оптимальной является схема нагружения, изображенная на рис.1 и предусматривающая размещение исходной порошковой смеси непосредственно на поверхности металлической подложки и нагружение ее с помощью накладного заряда ВВ, отделенного от порошка промежу-

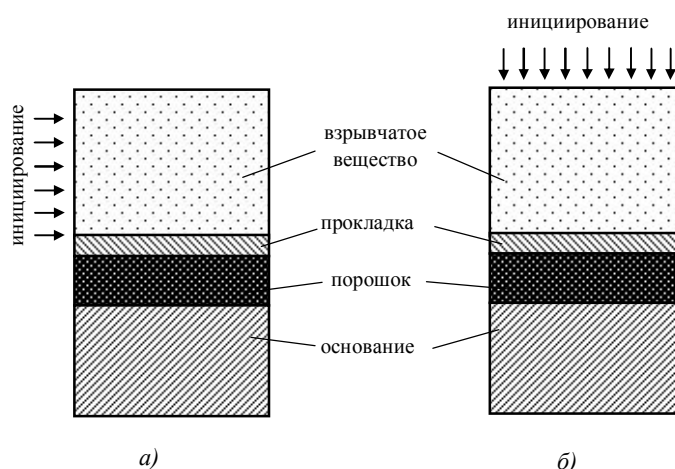


Рис. 1. Схема нагружения порошка взрывом:

а – скользящее нагружение

б – нагружение нормально падающей детонационной волной

точной прокладкой.

Недостатком этих схем является, однако, отсутствие до конца разработанных методик расчетной оценки физических условий сжатия реализуемых при её использовании.

Большинство имеющихся в настоящее время расчетных моделей основано на решении задачи о метания продуктами детонации тел переменной массы и не учитывают процессов прохождения ударной волны самой прокладки и ее отражений от поверхности подложки и промежуточной прокладки. Это обстоятельство ограничивает расчет рассмотрением только первой ударной волны, распространяющейся по исходному неуплотненному порошку, и не позволяет оценить параметры его сжатия в отраженных ударных волнах. В полном объеме и точной постановке, однако, рассматриваемая задача практически не поддается решению, в связи с чем возникает необходимость приближенного решения, которое наиболее удобно осуществить методом (P,u) -диаграмм, основанном на поэтапном определении характеристик падающих и отраженных волн путем анализа пересечений ударных адиабат прокладки, порошка, основания и продуктов детонации в координатах "давление - массовая скорость".

Поскольку при скользящем нагружении угол, составляемый косо ударной волной в порошке, с поверхностью подложки обычно не превышает 10° , то для анализа ударно-волновых процессов в рассматриваемой схеме можно пользоваться одномерной моделью, независимо от направления инициирования заряда взрывчатого вещества.

Использование при моделировании метода (P,u) – диаграмм предполагает знание ударных адиабат продуктов детонаций, прокладки, порошка и основания.

Построение адиабат металлических оснований и промежуточной прокладки, как правило, не вызывает особых затруднений: в интересующем практику диапазоне давлений, даже в

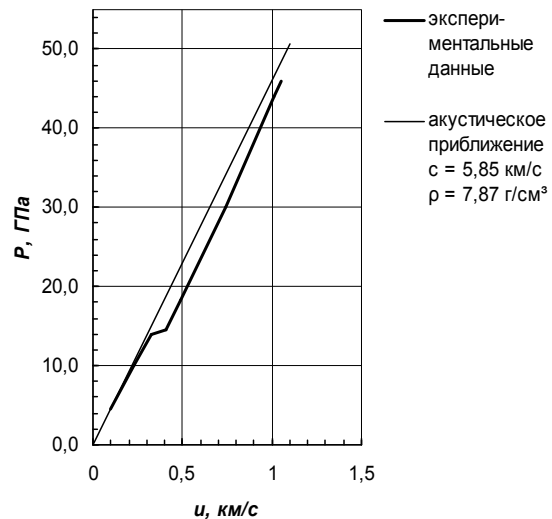


Рис. 2. Ударная адиабата железа

случае протекания фазовых превращений, как следует из рис. 2, удовлетворительным является акустическое приближение:

$$P = \rho_0 c_0 u, \quad (1)$$

где P, u – давление и массовая скорость вещества за фронтом ударной волны; ρ_0, c_0 – плотность и скорость объемных звуковых волн для металлов прокладки или подложки при нормальных условиях.

Сложнее обстоит дело с расчетом ударной адиабаты порошка: моделей ударного сжатия пористых тел создано много, что само по себе уже указывает на сложность и недостаточную изученность этого явления.

Из соотношений Рэнкина-Гюгонио [2, 3] вытекает, что в случае достаточно сильных ударных волн справедливо следующее выражение:

$$P = \rho_0 \frac{u^2}{1 - \frac{\rho}{\rho_0}}, \quad (2)$$

где ρ_0, ρ – плотность порошкового материала перед и за фронтом ударной волны.

Построить ударную адиабату порошка в первом приближении можно, положив в формуле (2):

$$\rho = \rho_k, \quad (3)$$

где ρ_k – расчетная по составу порошка плотность соответствующего монолитного материала.

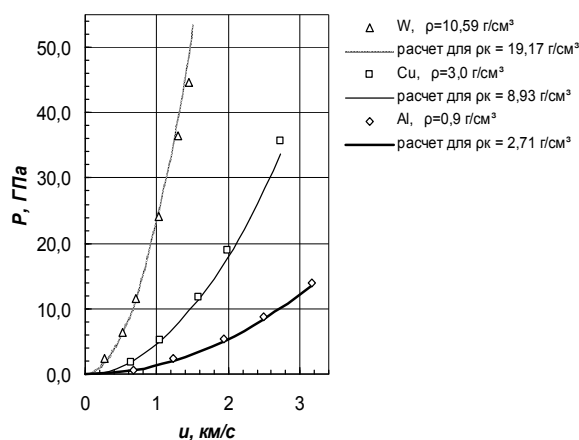


Рис. 3. Ударные адиабаты порошковых материалов

Следует отметить, что если в координатах "удельный объем-давление" допущение (3) является достаточно грубым, то в координатах "давление - массовая скорость" оно дает, как видно из рис. 3, весьма неплохой результат, что связано со структурой формулы (2), предусматривающей гораздо более сильную зависимость давления P от значений массовой скорости u и насыпной плотности ρ_0 , чем от плотности ударно сжатого порошка ρ .

Основные трудности при построении ударной адиабаты продуктов детонации связаны с необходимостью учета их разлета с верхней свободной поверхности заряда (разлет в других направлениях может не учитываться в связи с использованием боковых написаний заряда).

Сделать это в первом приближении можно, если учесть, что при давлениях, мало отличающихся от давлений в точке Жуге, ударная адиабата двойного сжатия продуктов взрыва совпадает с изоэнтропой [2]:

$$P = A\rho^k, \quad (4)$$

причем ее показатель k может считаться неизменным.

Примем за исходную точку построения этой изоэнтропы состояние ударного сжатия про-

дуктов детонации, характеризующееся максимально возможным для выбранной схемы нагружения давлением P_x . В случае скользящего нагружения это давление отвечает состоянию продуктов детонации в плоскости Чепмена-Жуге, а при нагружении нормально падающей детонационной волной соответствует ее набеганию на абсолютно жесткую стенку и полному торможению продуктов взрыва.

И в том, и в другом случае перемещение продуктов детонации в направлении преграды отсутствует и его появление приведет к снижению давления в соответствии с изоэнтропой расширения, которая может быть записана в виде [2, 3]:

$$u = \int \frac{P_x dP}{P \rho c}, \quad (5)$$

где u – скорость продуктов детонации в направлении преграды; P – давление продуктов детонации на границе раздела с ней; ρ , c – плотность продуктов детонации и скорость звука в них.

Интегрирование уравнения (5) с учетом того, что изоэнтропа проходит через точку с параметрами P_x , c_x , ρ_x дает:

$$u = \frac{2k}{(k-1)c_x\rho_x} \frac{P_x}{P} \left[1 - \left(\frac{P}{P_x} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right], \quad (6)$$

где c_x , ρ_x – скорость звука и плотность продуктов детонации, сжатых до давления P_x .

Примем $k = 3$ и будем считать, что разлет продуктов детонации по свободной поверхности заряда в реальных условиях нагружения происходит так же, как и в случае абсолютно жесткой преграды. Тогда для определения величины P_x при нагружении нормально падающей детонационной волной можно использовать выражение:

$$P_x = \frac{64}{27} P_H \left(\frac{h}{D\tau} \right)^3, \quad (7)$$

где P_H – давление продуктов взрыва в плоско-

сти Чепмена-Жуге; h – высота заряда взрывчатого вещества; D – скорость его детонации; τ – время, отсчитываемое от момента инициирования детонации на свободной поверхности заряда.

При скользящем нагружении в случае, когда волна разгрузки еще не успела достигнуть поверхности промежуточной прокладки, давление P_x следует принять равным:

$$P_x = P_H, \tag{8}$$

а в дальнейшем использовать известное решение [2] о разлете сжатого газа от абсолютно жестком стенки:

$$P_x = P_H \left(\frac{h}{C_H \tau} \right)^3, \tag{9}$$

где C_H – скорость звука в продуктах взрыва за фронтом детонации; τ – время, отсчитываемое от начала разлета продуктов детонации в их фиксированном сечении, движущемся вдоль поверхности промежуточной прокладки параллельно фронту детонации со скоростью, равной массовой скорости продуктов взрыва в плоскости Чепмена-Жуге.

Эти допущения позволяют после некоторых преобразований получить аналитические выражения для адиабат продуктов взрыва:

– для нагружения нормально падающей детонационной волной:

$$P = \frac{64}{27} P_H \left(\frac{h}{D\tau} - \frac{u}{D} \right)^3, \tag{10}$$

где $\tau \geq \frac{h}{D}$ – время, отсчитываемое от момента

инициирования детонации, на свободной поверхности заряда;

– для скользящего нагружения:

$$P = \begin{cases} P_H \left(1 - \frac{4u}{3D} \right)^3 & \text{при } \tau \leq \frac{h}{D} \\ P_H \left(\frac{h}{D\tau} - \frac{4u}{3D} \right)^3 & \text{при } \tau > \frac{h}{D} \end{cases}, \tag{11}$$

где τ – время, отсчитываемое от начала нагружения данной точки поверхности промежуточной прокладки.

В формуле (11) учтено также, что продукты взрыва движутся относительно поверхности промежуточной прокладки в направлении распространения по заряду взрывчатого вещества фронта детонации.

Как видно из рисунка 4, ударные адиабаты продуктов детонации некоторых, наиболее распространенных взрывчатых веществ, построенные на момент времени, соответствующий началу отражения, с использованием данной методики, с достаточной для оценочных расчетов точностью совпадают с известными ударными адиабатами, что указывает на приемлемость изложенного подхода к построению адиабат продуктов взрыва.

Для построения ударных адиабат двух-, трех- и более кратного сжатия порошкового материала, материала промежуточной прокладки и основания и изоэнтроп разгрузки материала промежуточной прокладки можно в первом приближении использовать известный принцип отражения.

С целью реализации описанной системы моделирования ударно-волновых процессов в изучаемой схеме нагружения была составлена программа [4, 5], общий вирабочего окна

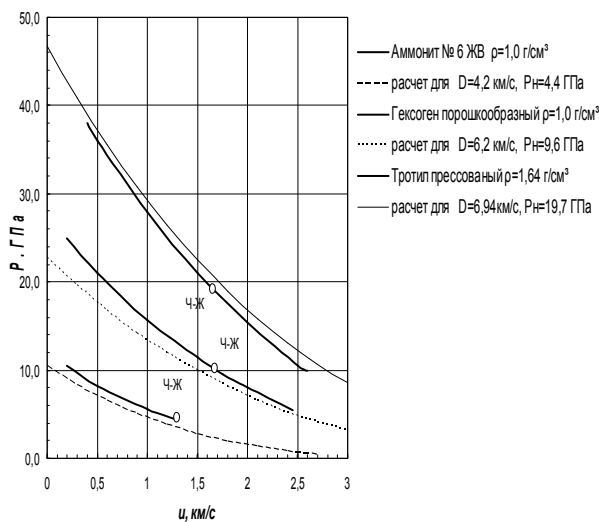


Рис. 4. Ударные адиабаты продуктов детонации некоторых взрывчатых веществ

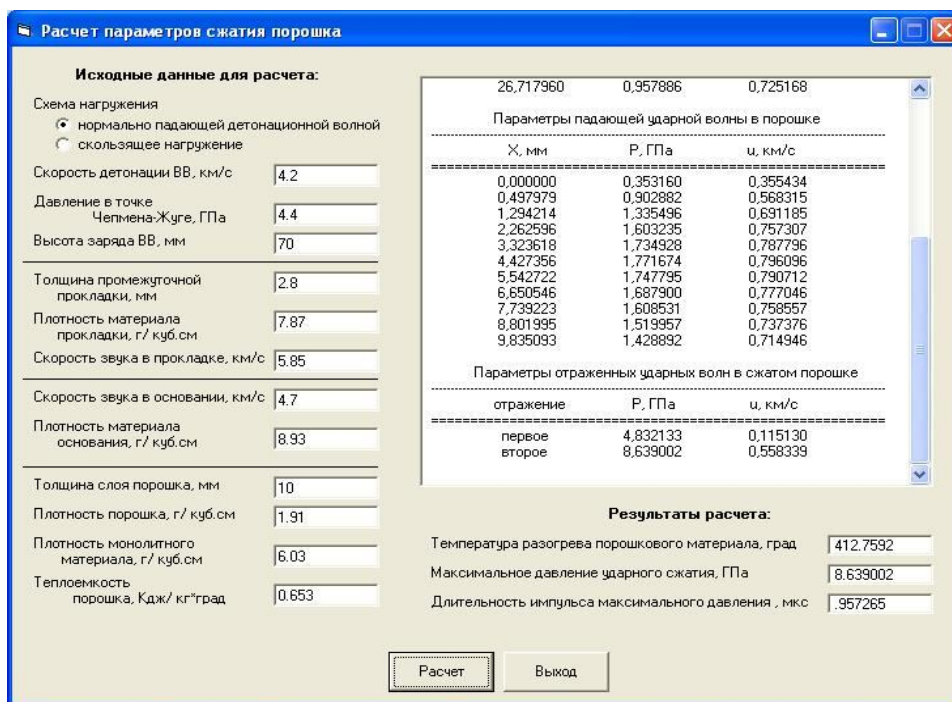


Рис. 5. Вид рабочего окна программы

которой приведен на рис. 5.

В окне предусмотрен выбор схемы нагружения и ввод необходимых для моделирования характеристик ВВ, порошкового материала, а также материалов промежуточной прокладки и основания, на котором располагается порошок. В результате расчета по модели в поле табличного вывода выдаются параметры падающих и отраженных ударных волн в прокладке, порошке и основании, по которым может быть построена полная (P,u) – диаграмма процесса (рис. 6).

Помимо перечисленных параметров программа выдает время действия импульса максимального давления при взрывной обработке слоя порошка, которое для рассматриваемой схемы нагружения равно удвоенному времени прохождения ударной волной промежуточной прокладки:

$$\tau = 2 \frac{\delta}{c}, \quad (12)$$

где δ , c – толщина прокладки и скорость звука в ней.

Расчет системой температуры порошка при ударно-волновой обработке по выбранной схе-

ме нагружения основывается на учете того, что основной его разогрев происходит в первой ударной волне. При этом упругая составляющая внутренней энергии порошка мала по сравнению с температурной, а размеры частиц, применяемых в работе порошковых материалов и диапазон давлений при используемых режимах их нагружения, таковы, что за фронтом ударной волны, распространяющейся по невозмущенному порошку, успевает установиться тепловое равновесие.

В этих условиях можно считать, что:

$$C_V \Delta T = \Delta E, \quad (13)$$

где ΔT – прирост температуры порошка; C_V – среднее значение удельной теплоемкости порошка в интервале температур его разогрева; ΔE – приращение внутренней энергии порошка за фронтом первой ударной волны.

Использование соотношений Рэнкина-Гюгонио позволяет преобразовать выражение (13) к виду, удобному для непосредственных вычислений.

$$\Delta T = \frac{u_1^2}{2 C_V}, \quad (14)$$

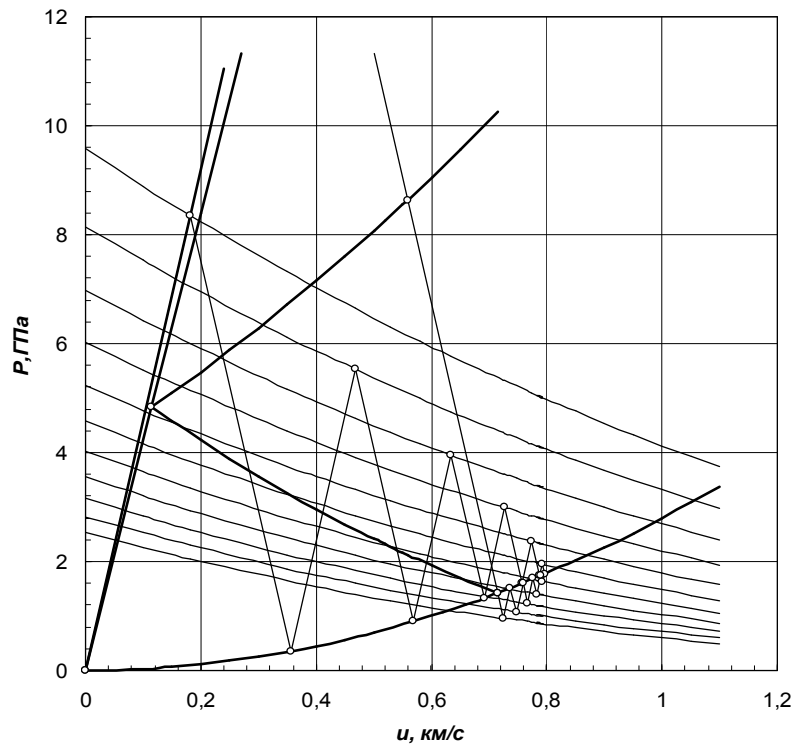


Рис. 6. Пример (P,u) – диаграммы процесса взрывного прессования:
 1 – ударная адиабата порошкового материала; 2 – ударная адиабата промежуточной прокладки; 3 – ударная адиабата основания; 4 – адиабаты взрывчатого вещества в различные моменты времени

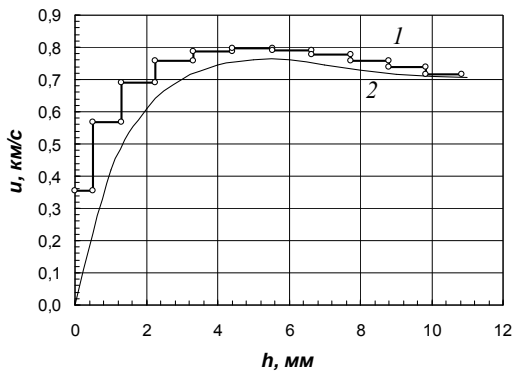


Рис. 7. Сопоставление результатов расчетов массовой скорости частиц порошка за фронтом падающей ударной волны:
 1 – расчет по ударным адиабатам;
 2 – расчет метания тела переменной массы

где u_1 – массовая скорость частиц порошка за фронтом первой ударной волны.

Значение теплоемкости порошкового материала C_V при этом может быть вычислено по правилу аддитивности, исходя из весового содержания и теплоемкости каждой из составляющих порошковой смеси. Поскольку темпе-

ратуры разогрева порошков при ударно-волновой обработке достаточно высоки и, как правило, всегда превышают температуру Дебая соответствующих монолитных материалов, то для определения теплоемкости этих составляющих в свою очередь можно воспользоваться правилом Коппа-Неймана, согласно которому молярная теплоемкость соединения (промежуточной фазы, твердого раствора) равна сумме атомных теплоемкостей компонентов, а также законом Дюлонга и Пти, в соответствии с которым атомная теплоемкость большинства простых веществ в твердом состоянии равна $3R$ (R – газовая постоянная).

Приведем также сравнение результатов расчета распределения массовой скорости частиц порошка за фронтом падающей ударной волны по глубине исходного порошкового слоя, выполненного изложенным способом и по известной методике [6], основанной на рассмотрении

метания продуктами взрыва тел переменной массы, то есть без учета ударно-волновых процессов в промежуточной прокладке (рис. 7).

Расчет проводился для случая нагружения порошка с исходной пористостью 68% и насыпным весом $1,9 \text{ г/см}^3$ нормально падающей детонационной волной при использовании заряда аммонита №6ЖВ высотой 70 мм стальной промежуточной прокладки толщиной 2,8 мм. Из рисунка 6 видно, что при малых глубинах проработки ударной волной исходного порошкового слоя полученные результаты разнятся, причем существенно. Это естественно, так как расчет по известной методике предполагает постепенный набор скорости как промежуточной прокладкой, так и сжатым порошком, начиная от ее нулевого значения, тогда как в действительности порошковый материал приобретает скорость поэтапно в соответствии с ударно-волновыми процессами на его границе с промежуточной прокладкой. Однако в дальнейшем, когда в процессе многократного прохождения ударными волнами и волнами разрежения промежуточной прокладки их амплитуда уменьшается, результаты расчетов, выполнен-

ные по обоим методикам, практически совпадают.

Библиографический список

1. Крохалев, А. В. Получение твердых сплавов из смесей порошков карбидов с металлами взрывным прессованием без спекания / А.В. Крохалев // Современные проблемы металлургического производства: Сб. тр. междунар. науч.-техн. конф., Волгоград, 1-3 октября 2002 г. / ВолгГТУ и др. - Волгоград, 2002. - С. 483-486.
2. Зельдович, Я. Б. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений / Я. Б. Зельдович - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. - 652 с.
3. Физика взрыва: в 2 т./ С.Г.Андреев, А.В.Бабкин, Ф.А.Баум и [др.]; под ред. Л.П.Орленко. - 3-е изд., испр. - М.: Физматлит, 2004. - Т. 2. - 656 с.
4. Компьютерное моделирование взрывного компактирования нанопорошков при получении наноструктурных материалов и покрытий / А.В. Крохалев, С.В. Кузьмин, В.И. Лысак, В.О. Харламов // Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов (3-4 июня 2009 г.): тр. VII междунар. Рос.-Казахстан.-Японской науч. конф. / Мин-во образования и науки Рос. Федерации [и др.]. - М., 2009. - С. 425-432.
5. Компьютерное моделирование условий сжатия при получении материалов с субмикроструктурной и наноструктурой с использованием обработки взрывом / В.О. Харламов, А.В. Крохалев, С.В. Кузьмин, В.И. Лысак // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов. DFMN 2009 : сб. матер. третьей междунар. конф., г. Москва, 12-15 окт. 2009 г. В 2 т. Т. 1 / Ин-т металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова [и др.]. - М., 2009. - С. 247-248.
6. Рогозин, В.Д. Взрывная обработка порошковых материалов: Монография/ В.Д. Рогозин - ВолГТУ. Волгоград, 2002. - 136с.

Работа выполнена в рамках государственного контракта № 02.740.11.0809.