

УДК 669.018.25.017

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2018-3-23-29

## Экспериментальное и расчетное определение температуры разогрева порошковой смеси при взрывном прессовании

© 2018 г. **С.В. Хаустов, А.В. Крохалёв, В.О. Харламов, М.А. Тупицин, С.В. Кузьмин, В.И. Лысак**

Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ)

Статья поступила в редакцию 05.07.18 г., доработана 18.07.18 г., подписана в печать 25.07.18 г.

Представлены результаты экспериментального определения температуры разогрева смеси порошков карбида хрома и титановой связки при взрывном нагружении на металлической подложке. Давление сжатия порошковой смеси в ударных волнах при взрывном прессовании составляло 2,5 ГПа. В эксперименте фиксировался термический цикл тыльной стороны металлической подложки, выполнявшей роль теплоприемного элемента, с нанесенным на нее покрытием и решалась нестационарная задача теплопроводности до совпадения расчетного и экспериментального термических циклов. Начальные условия выбирались из предположения, что к моменту окончания ударно-волновых процессов скомпактированный материал равномерно прогрет до некоторой средней температуры. Необходимые для расчетов теплофизические свойства скомпактированного материала определялись методом лазерной вспышки на установке LFA 427 («Netzsch», Германия). Расчеты показали, что температура разогрева порошковой смеси составила 208 и 225 °С при использовании адиабатического приближения и с учетом теплотдачи в окружающую среду соответственно. Сравнение полученных значений температуры с рассчитанными по увеличению энтальпии в процессе ударно-волновой обработки (в этих расчетах использовались значения плотности монолитного материала в нормальных условиях и конечной плотности порошкового материала, определенной после взрывной обработки, – 199 °С и 220 °С соответственно) показало, что они отличаются незначительно. Таким образом, использование предположения о равенстве плотности материала в ударной волне и плотности монолита не приводит к существенной погрешности и может быть использовано для практических расчетов.

**Ключевые слова:** твердый сплав, карбид хрома, титан, взрывное прессование порошков, температура разогрева.

**Хаустов С.В.** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Оборудование и технология сварочного производства» ВолгГТУ (400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28). E-mail: regent\_k@mail.ru.

**Крохалёв А.В.** – докт. техн. наук, декан факультета технологии конструкционных материалов ВолгГТУ. E-mail: kroch@vstu.ru.

**Харламов В.О.** – канд. техн. наук, вед. инженер Центра коллективного пользования «Физико-химические методы исследования» ВолгГТУ. E-mail: harlamov\_vo@mail.ru.

**Тупицин М.А.** – мл. науч. сотрудник кафедры «Оборудование и технология сварочного производства» ВолгГТУ. E-mail: michael200567@mail.ru.

**Кузьмин С.В.** – докт. техн. наук, профессор кафедры «Оборудование и технология сварочного производства», проректор ВолгГТУ. E-mail: weld@vstu.ru.

**Лысак В.И.** – докт. техн. наук, акад. РАН, проф., зав. кафедрой «Оборудование и технология сварочного производства», ректор ВолгГТУ. E-mail: lysak@vstu.ru.

**Для цитирования:** Хаустов С.В., Крохалёв А.В., Харламов В.О., Тупицин М.А., Кузьмин С.В., Лысак В.И. Экспериментальное и расчетное определение температуры разогрева порошковой смеси при взрывном прессовании // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2018. No. 3. С. 23–29.  
DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2018-3-23-29.

*Khaustov S.V., Krokhalev A.V., Kharlamov V.O., Tupitsin M.A., Kuz'min S.V., Lysak V.I.*

### **Experimental determination and calculation of powder mixture heating temperature at explosive compaction**

The paper presents the experimentally determined heating temperature of mixed chromium carbide powders and titanium bond under explosive loading on a metal substrate. Pressure of powder mixture compression in shock waves during explosive pressing was 2,5 GPa. The experiment involved recording a thermal cycle on the back side of the coated metal substrate serving as a heat receiving element. It also solved a problem of non-stationary heat conduction until the calculated and experimental thermal cycles coincided. Initial conditions were chosen assuming that the compacted material is uniformly heated to a certain average temperature by the time the shock-wave processes end. Required thermophysical properties of the compacted material were determined by the laser flash method using the LFA 427 unit («Netzsch», Germany). According to calculations, powder mixture heating temperatures were

208 °C and 225 °C for adiabatic approximation and taking into account heat transfer into the environment, respectively. The obtained values were compared with ones calculated by the increase in enthalpy during the shock wave processing (these calculations used solid material densities under normal conditions and final powder material density determined after explosive treatment to be 199 °C and 220 °C, respectively), and it was found that they differ insignificantly. Thus, the assumption of equal material density in a shock wave and solid density does not lead to a significant error and can be used for practical calculations.

**Keywords:** hard alloy, chromium carbide, tungsten carbide, silicon carbide, titanium, explosive compacting of powders, heating temperature.

**Khaustov S.V.** – Cand. Sci. (Tech.), Assoc. prof., Department of welding equipment and technology, Volgograd State Technical University (VSTU) (400005, Russia, Volgograd, Lenin av., 28. E-mail: regent\_k@mail.ru.

**Krokhalev A.V.** – Dr. Sci. (Eng.), Dean of Structural materials technology faculty, VSTU. E-mail: kroch@vstu.ru.

**Kharlamov V.O.** – Cand. Sci. (Tech.), Lead engineer, Shared equipment center, VSTU. E-mail: harlamov\_vo@mail.ru.

**Tupitsin M.A.** – Junior research assistant, Department of welding equipment and technology, VSTU. E-mail: michael200567@mail.ru.

**Kuz'min S.V.** – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of welding equipment and technology, Vice-rector of VSTU. E-mail: weld@vstu.ru.

**Lysak V.I.** – Dr. Sci. (Eng.), Prof., Acad. of RAS, Rector of VSTU, Head of the Department of welding equipment and technology. E-mail: lysak@vstu.ru.

**Citation:** *Khaustov S.V., Krokhalev A.V., Kharlamov V.O., Tupitsin M.A., Kuz'min S.V., Lysak V.I. Eksperimental'noe i raschetnoe opredelenie temperatury razogreva poroshkovoi smesi pri vzryvnom pressovanii. Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya.* 2018. No. 3. P. 23–29. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2018-3-23-29.

## Введение

В последние десятилетия появилось достаточно большое количество исследований, посвященных изучению возможности получения консолидированных твердых сплавов и покрытий из них путем взрывного прессования смесей порошков карбидов тугоплавких металлов и металлической связки на металлических подложках [1–6]. Наиболее изученными являются антифрикционные материалы на основе карбида хрома с титановой связкой, обеспечивающей возможность формирования твердых сплавов на стадии прессования [7].

Получение твердых сплавов взрывным (как, впрочем, и любым другим) методом предполагает решение двух основных задач: уплотнение порошковой смеси и формирование прочных поверхностей раздела между ее компонентами.

Уровень давлений, обеспечиваемый применением конденсированных взрывчатых веществ, при этом, как правило, столь высок, что на пути решения первой из названных задач принципиальных препятствий не возникает: порошковые смеси, содержащие в своем составе такие карбиды, как  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  или  $\text{WC}$ , уплотняются взрывом до практически беспористого состояния [6, 8, 9].

Вторая задача является гораздо более сложной и связанной в значительной степени с уровнем температуры, достигаемой при обработке порошка взрывом [10–16]. В настоящее время существу-

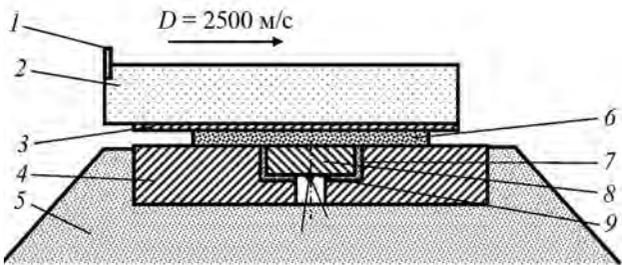
ют прямые экспериментальные способы ее измерения [17], основанные на методе естественных термодар, однако они не применимы для смеси порошков.

Поэтому задачами данного исследования были разработка методики косвенного экспериментального измерения температуры разогрева порошковой смеси при взрывном нагружении на монолитной подложке и анализ возможностей повышения точности существующих способов ее расчетного определения.

## Материалы и методика исследования

Схема эксперимента показана на рис. 1. В стальной основе 4 размещали теплоприемный элемент (ТПЭ) 8, выполняющий роль подложки, с зачеканенным на его тыльной стороне датчиком 9 (термопара типа ХА). Характерное время прогрева ТПЭ составляет ~10 с, при этом инерционностью термодары (~150 мс) можно пренебречь.

В качестве порошка 6 использовали смесь 50%об.  $\text{Ti}$  + 50об.%  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  с насыпной (исходной) плотностью 1042 кг/м<sup>3</sup> и толщиной слоя 7 мм, которую нагружали скользящей детонационной волной. Выбор содержания связки был связан с необходимостью обеспечения наибольшей вероятности сохранения покрытия на режимах, гарантирующих отсутствие его «сноса» [18]. Слой порошка



**Рис. 1.** Схема измерения теплового эффекта от разогрева порошковой смеси в результате скользящего взрывного нагружения

1 – детонатор, 2 – взрывчатое вещество (ВВ), 3 – промежуточная пластина; 4 – стальная подложка, 5 – грунт, 6 – прессуемый порошок, 7 – теплоизоляция, 8 – теплоприемный элемент (ТПЭ), 9 – термометр типа ХА

отделяли от взрывчатого вещества стальной промежуточной прокладкой 3 толщиной 0,7 мм.

В качестве взрывчатого вещества 2 применяли смесь, состоящую из 75 об.% аммонита БЖВ и 25 об.% кварцевого песка. Плотность смеси  $\rho = 1180 \text{ кг/м}^3$ , высота заряда  $H = 25 \text{ мм}$ , скорость детонации, измеренная электроконтактным методом,  $D = 2500 \text{ м/с}$  (давление в плоскости Чепмена–Жуге  $P_H = 2,5 \text{ ГПа}$ ). В качестве материала ТПЭ использовали низкоуглеродистую сталь со следующими теплофизическими свойствами:  $\lambda_2 = 55 \text{ Вт/(м·К)}$ ,  $c_2 = 500 \text{ Дж/(кг·К)}$ ,  $\rho_2 = 7850 \text{ кг/м}^3$ .

Как известно [18, 19], после нагружения к моменту окончания ударно-волновых процессов порошковый материал нагревается до некоторой средней температуры  $T_p$ , что позволяет температурное поле по сечению порошкового покрытия и теплоприемного элемента в первом приближении представить в виде, показанном на рис. 2, а. Используя экспериментальные данные о кривой нагрева тыльной стороны ТПЭ (рис. 2, б) и априорную информацию о распределении температуры в системе, можно найти величину  $T_p$ .

Данная задача решалась методом конечных разностей с использованием 4-точечной неявной разностной схемы. Уравнение теплопроводности, краевые и начальные условия имеют следующий вид:

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, \quad 0 < x < h_p, \quad (1)$$

$$T_1(t, h_p) = T_2(t, h_p), \quad (2)$$

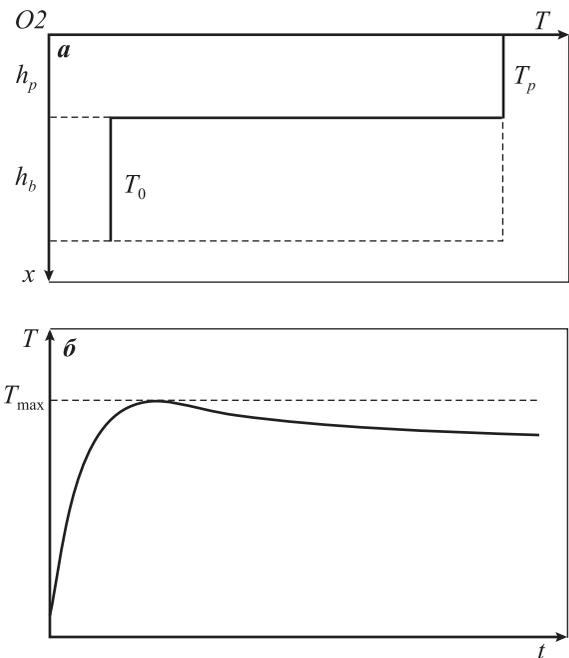
$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} \Big|_{x=h_p} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} \Big|_{x=h_p}, \quad (3)$$

$$c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}, \quad h_p < x < (h_p + h_b), \quad (4)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{x=0} = 0, \quad (5)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{x=(h_p+h_b)} = 0, \quad (6)$$

$$T(x, 0) = \begin{cases} T_p & \text{при } 0 \leq x \leq h_p, \\ T_0 & \text{при } h_p \leq x \leq (h_p + h_b). \end{cases} \quad (7)$$



**Рис. 2.** Температурное поле в системе «порошковое покрытие – теплоприемный элемент» на момент окончания ударно-волновых процессов (а) и термический цикл в сечении  $x = h_p + h_b$  (б)

## Результаты и их обсуждение

После нагружения регистрировали максимальную температуру с точностью  $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 3) тыльной стороны ТПЭ, контактирующего с компактированным порошком. Его плотность составила  $\rho_1 = 3700 \text{ кг/м}^3$ , или 66 % от плотности соответствующего монолитного материала ( $5590 \text{ кг/м}^3$ ). Теплофизические свойства полученного компакта (рис. 4) после взрывного прессования были определены методом лазерной вспышки на установке LFA 427 («Netzsch», Германия) и составили:  $\lambda_1 = 1 \text{ Вт/(м·К)}$ ;  $c_1 = 300 \text{ Дж/(кг·К)}$ .

Математическое моделирование процесса выравнивания исходного температурного поля про-

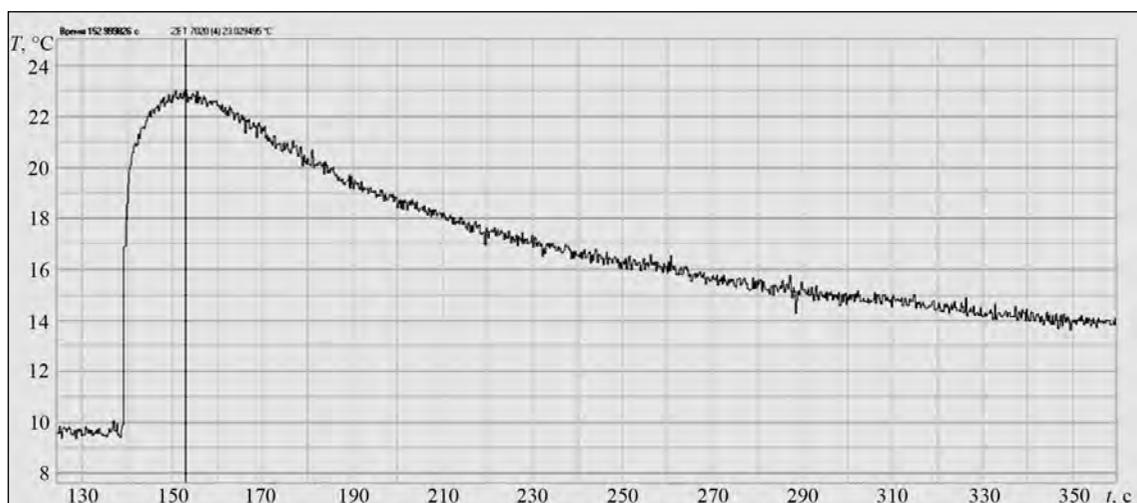


Рис. 3. Изменение температуры тыльной стороны подложки по времени (эксперимент)



Рис. 4. Компактированное покрытие и изготовленный из него образец для определения теплофизических свойств

водилось до совпадения рассчитанной и экспериментальной кривых нагрева (достижения максимальной температуры нагрева  $T_{\max} = 23 \pm 0,1$  °C) тыльной стороны ТПЭ (рис. 5, кр. 1). При этом расчеты выполнялись в адиабатическом приближении (без учета теплоотдачи в окружающую среду). В результате вычислений после нескольких итераций значение  $T_p$  составило 208 °C. В рамках принятых допущений о первоначальном распределении температуры это означает, что скомпактированный в результате взрывного нагружения порошок прогрет до температуры не менее чем 208 °C. С учетом теплоотдачи это значение может быть выше.

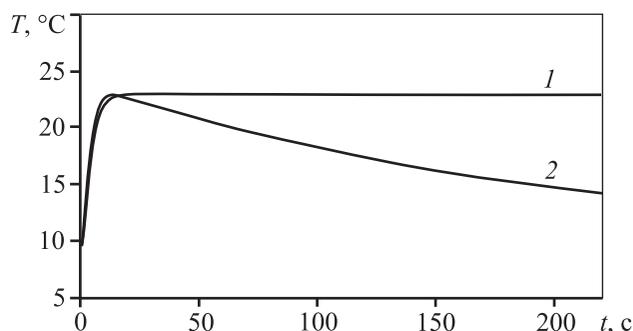


Рис. 5. Выравнивание температуры тыльной стороны теплоприемного элемента (расчет)  
1 – адиабатическое приближение ( $T_p = 208$  °C);  
2 – с учетом теплоотдачи ( $T_p = 225$  °C)

Заменяв в системе уравнений (1)–(7) граничные условия (5), (6) на

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha(T_0 - T), \quad (8)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=(h_p+h_b)} = \alpha(T_0 - T) \quad (9)$$

и приняв  $\alpha = 10$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), получили  $T_p$ , равную 225 °C (рис. 5, кр. 2).

Расчетное определение температуры разогрева порошка проводилось исходя из предположения, что он происходит в первой ударной волне [18, 22]. Поскольку размер частиц порошка не превышал 3,5 мкм, что обеспечивало условия для установления теплового равновесия за фронтом

ударной волны, то прирост температуры порошка при сжатии ( $\Delta T$ ) находили из равенства

$$c_V \Delta T = \Delta E, \quad (10)$$

где  $c_V$  — среднее значение удельной теплоемкости порошка в интервале температур его разогрева, Дж/(кг·К);  $\Delta E$  — приращение внутренней энергии порошка на единицу массы за фронтом первой ударной волны, Дж/кг.

Для проведения практических расчетов выражение (10) с использованием соотношений Рэнкина—Гюгонио [20] преобразовывали к виду

$$\Delta T = \frac{u_1^2}{2c_V}, \quad (11)$$

где  $u_1$  — массовая скорость частиц порошка за фронтом первой ударной волны, м/с.

Теплоемкость порошковой смеси в состоянии ударного сжатия находили по правилу аддитивности из массового содержания и теплоемкости каждой из ее составляющих. Теплоемкость компонентов смеси вычисляли, основываясь на правилах Дюлонга—Пти и Коппа—Неймана [21] в предположении, что температура разогрева в ударной волне превышает температуру Дебая соответствующих монокристаллических материалов.

Величину массовой скорости частиц порошка за фронтом первой ударной волны в порошке ( $u_1^2$ ) обычно находят двумя способами:

— либо решая применительно к распространению ударной волны в порошке задачу о метании продуктами детонации тела переменной массы [19],

— либо используя метод ( $P, u$ )-диаграмм, основанный на поэтапном определении характеристик падающей и отраженных волн путем анализа пересечений ударных адиабат прокладки, порошка, основания и продуктов детонации в координатах «давление — массовая скорость» [18].

В обоих случаях в расчете используется гипотетическая величина плотности порошкового материала в ударной волне, которая может быть как близка к плотности монолита (в случае предельного уплотнения), так и существенно меньше ее (при неполном уплотнении). Обычно при проведении расчетов используют либо значение плотности монолитного материала в нормальных условиях, рассчитанное по правилу аддитивности, исходя из плотностей компонентов порошковой смеси, либо значение конечной плотности порошкового материала, определенное после проведения взрывной обработки.

С использованием метода ( $P, u$ )-диаграмм [23] нами были проведены расчеты для обоих перечисленных предположений, в результате которых оказалось, что рассчитанные температуры отличаются незначительно и составляют 199 и 220 °С (для неполного и полного уплотнений соответственно), что попадает в интервал температур, определенных экспериментально (208—225 °С).

## Выводы

1. Разработана расчетно-экспериментальная методика, позволяющая определять температуру разогрева смеси порошков в процессе взрывного прессования на металлической подложке, основанная на измерении температуры тыльной стороны подложки и последующем решении ретроспективной задачи теплопроводности.

2. Экспериментально доказано, что расчет температуры разогрева порошка по увеличению энthalпии в процессе ударно-волнового сжатия с использованием допущения о равенстве плотности материала в ударной волне и плотности монолита с достаточной степенью точности коррелирует с экспериментом, что позволяет исключить достаточно трудоемкое экспериментальное построение ударной адиабаты порошка при практических расчетах температуры разогрева порошковых смесей.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 18-19-00518.*

## Литература

1. Gourdin W.H. Dynamic consolidation of metal powders // *Progr. Mater. Sci.* 1986. Vol. 30. P. 39—80.
2. Prummer R.A. Explosive compaction of powders, principle and prospects // *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik.* 1989. Bd. 20. S. 410—415.
3. Murr L.E., Staudhammer K.P., Meyers M.A. Metallurgical applications of shock-wave and high-strain-rate phenomena. N.Y.: Marcel Dekker Inc., 1986.
4. Prummer R.A., Balakrishna Bhat T., Siva Kumar K., Hokamoto K. Explosive compaction of powders and composites. Enfield, NH: Sci. Publ., 2006.
5. Buzurkin A. E., Kraus E. I., Lukyanov Ya. L. Explosive compaction of WC + Co mixture by axisymmetric scheme // *J. Phys.: Conf. Ser.* 653 012036. 2015. P. 1—5.
6. Nesterenko V.F. Dynamics of heterogeneous materials. N.Y.: Springer Science + Business Media, 2001.
7. Krokshalev A.V., Kharlamov V.O., Lysak V.I., Kuz'min S.V. Friction and wear on hard alloy coatings of the Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>—Ti

- system over silicified graphite in water // *J. Mater. Sci.* 2017. Vol. 52. P. 10261—10272.
8. Sang-Hoon Lee, Kazuyuki Hokamoto. WC/Co coating on a mild steel substrate through underwater shock compaction using a self combustible material layer (WC/Co coating through underwater shock compaction) // *Mater. Trans.* 2007. Vol. 48. No. 1. P. 80—83.
  9. Яковлев И.В., Оголихин В.М., Шемелин С.Д. Взрывное изготовление металлокерамических защитных контейнеров // *Вестн. ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение.* 2012. Т. 14. С. 55—60.
  10. Кормер С.Б., Фунтиков А.И., Урлин В.Д., Колесникова А.Н. Динамическое сжатие пористых металлов и уравнение состояния с переменной теплоемкостью при высоких температурах // *ЖЭТФ.* 1962. Т. 42. No. 3. С. 686—702.
  11. Meyers M. Shock waves: Equations of state, in dynamic behavior of materials. N.Y.: John Wiley and Sons, Inc., 1994.
  12. Pikus I.M., Roman O.V. Possibility of experimental determination of the heating temperature of porous bodies with explosive loading // *Combustion, Explosion and Shock Waves.* 1974. Vol. 10. No. 2. P. 706—707.
  13. Belyakov G.V., Rodionov V.N., Samosadnyi V.P. Heating of porous material under impact compression // *Combustion Explosion and Shock Waves.* 1977. Vol. 13. No. 4. P. 524—528.
  14. Blackburn J.H., Seely L.B. Source of the light recorded in photographs of shocked granular pressing // *Nature.* 1962. Vol. 194. P. 370—371.
  15. Матыцин А.И., Попов С.Т. Определение яркостных температур при выходе УВ из порошка на границу с прозрачной преградой // *Физика горения и взрыва.* 1987. Т. 23. No. 3. С. 126—132.
  16. Staver A.M. Metallurgical effects under shock compression of powder materials // *Shock waves and high-strain-rate phenomena in metals. Concepts and applications* / Eds. M.A. Meyers, L.E. Murr. N. Y.: Plenum Press, 1981. P. 865—880.
  17. Кузьмин Г.Е., Пай В.В., Яковлев И.В. Экспериментально-аналитические методы в задачах динамического нагружения материалов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002.
  18. Лысак В.И., Крохалев А.В., Кузьмин С.В., Rogozin В.Д., Каунов А.М. Прессование порошков взрывом. М.: Машиностроение, 2015.
  19. Rogozin В.Д. Взрывная обработка порошковых материалов. Волгоград: ВолгГТУ, 2002.
  20. Физика взрыва / Под ред. К.П. Станюковича. 2-е изд., перераб. М.: Наука, 1975.
  21. Лившиц Б.Г., Крапошин В.С., Липецкий Я.Л. Физические свойства металлов и сплавов. М.: Metallurgy, 1980.
  22. Крохалев А.В., Харламов В.О., Кузьмин С.В., Лысак В.И. Компьютерный расчет параметров сжатия при нанесении порошковых покрытий взрывом // *Изв. ВолгГТУ. Сер. Сварка взрывом и свойства сварных соединений.* Вып. 4. 2010. No. 5. С. 110—116.
  23. Крохалев А.В., Харламов В.О., Кузьмин С.В., Лысак В.И. Программа для расчета параметров сжатия порошковых материалов при импульсном нагружении (взрывное компактирование): Св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ. № 2010616142 (РФ). 2010.

## References

1. Gourdin W.H. Dynamic consolidation of metal powders. *Progr. Mater. Sci.* 1986. Vol. 30. P. 39—80.
2. Prummer R.A. Explosive compaction of powders, principle and prospects. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik.* 1989. Bd. 20. S. 410—415.
3. Murr L.E., Staudhammer K.P., Meyers M.A. Metallurgical applications of shock-wave and high-strain-rate phenomena. N.Y.: Marcel Dekker Inc., 1986.
4. Prummer R.A., Balakrishna Bhat T., Siva Kumar K., Hokamoto K. Explosive compaction of powders and composites. Enfield, NH: Sci. Publ., 2006.
5. Buzyurkin A.E., Kraus E.I., Lukyanov Ya.L. Explosive compaction of WC + Co mixture by axisymmetric scheme. *J. Phys.: Conf. Ser.* 653 012036. 2015. P. 1—5.
6. Nesterenko V.F. Dynamics of heterogeneous materials. N.Y.: Springer Science + Business Media, 2001.
7. Krokhalev A.V., Kharlamov V.O., Lysak V.I., Kuz'min S.V. Friction and wear on hard alloy coatings of the Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>—Ti system over silicified graphite in water. *J. Mater. Sci.* 2017. Vol. 52. P. 10261—10272.
8. Sang-Hoon Lee, Kazuyuki Hokamoto. WC/Co coating on a mild steel substrate through underwater shock compaction using a self combustible material layer (WC/Co coating through underwater shock compaction). *Mater. Trans.* 2007. Vol. 48. No. 1. P. 80—83.
9. Yakovlev I.V., Ogolikhin V.M., Shemelin S.D. Vzryvnoe izgotovlenie metallokeramicheskikh zashchitnykh kontejnerov [Explosive manufacture of metal-ceramic protective containers]. *Vestnik PNIPU. Mashinostroenie, materialovedenie.* 2012. Vol. 14. P. 55—60
10. Kormer S.B., Funtikov A.I., Urlin V.D., Kolesnikova A.N. Dinamicheskoe szhatie poristyykh metallov i uravnenie sostoyaniya s peremennoj teploemkost'yu pri vysokikh temperaturakh [Dynamic compression of porous metals and the equation of state with variable heat capacity at high

- temperatures]. *Zhurnal eksperimental'noi i tekhnicheskoi fiziki*. 1962. Vol. 42. No. 3. P. 686—702.
11. Meyers M. Shock waves: Equations of state, in dynamic behavior of materials. N.Y.: John Wiley and Sons, Inc., 1994.
  12. Pikus I.M., Roman O.V. Possibility of experimental determination of the heating temperature of porous bodies with explosive loading. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 1974. Vol. 10. No. 4. P. 706—707.
  13. Belyakov G.V., Rodionov V.N., Samosadnyi V.P. Heating of porous material under impact compression. *Combustion Explosion and Shock Waves*. 1977. Vol. 13. No. 4. P. 524—528.
  14. Blackburn J.H., Seely L.B. Source of the light recorded in photographs of shocked granular pressing. *Nature*. 1962. Vol. 194. P. 370—371.
  15. Matytsin A.I., Popov S.T. Opredelenie yarkostnykh temperatur pri vykhode UV iz poroshka na granitsu s prozrachnoy pregradoj [Determination of brightness temperatures at the outlet of hydrocarbons from the powder to the boundary with a transparent barrier]. *Fizika goreniya i vzryva*. 1987. Vol. 23. No. 3. P. 126—132.
  16. Staver A.M. Metallurgical effects under shock compression of powder materials. In: *Shock waves and high-strain-rate phenomena in metals: Concepts and applications* (Eds. M.A. Meyers, L.E. Murr). N.Y.: Plenum Press, 1981. P. 865—880.
  17. Kuz'min G.E., Paj V.V., Yakovlev I.V. Eksperimental'no-analiticheskie metody v zadachakh dinamicheskogo nagruzheniya materialov [Experimental-analytical methods in problems of dynamic loading of materials]. Novosibirsk: SO RAN, 2002.
  18. Lysak V.I., Krokhalev A.V., Kuz'min S.V., Rogozin V.D., Kaulov A.M. Pressovanie poroshkov vzryvom: monografiya [Pressing powders by explosion: monograph]. Moscow: Mashinostroenie, 2015.
  19. Rogozin V.D. Vzryvnaya obrabotka poroshkovykh materialov [Explosive processing of powder materials]. Volgograd: VolgGTU, 2002.
  20. Stanyukovich K.P. (Ed.). *Fizika vzryva* [Physics of explosion]. Moscow: Nauka, 1975.
  21. Livshits B.G., Kraposhin B.C., Lipetskij Ya.L. Fizicheskie svoystva metallov i splavov [Physical properties of metals and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1980.
  22. Krokhalev A.V., Kharlamov V.O., Kuz'min S.V., Lysak V.I. Komp'yuternyj raschyot parametrov szhatiya pri nanese-nii poroshkovykh pokrytij vzryvom [Computer calculation of compression parameters when powder coatings are applied by explosion]. *Izv. VolgGTU. Ser. Svarka vzryvom i svoystva svarnykh soedinenii*. Iss. 4. 2010. No. 5. P. 110—116.
  23. Krokhalev A.V., Kharlamov V.O., Kuz'min S.V., Lysak V.I. Programma dlya raschyota parametrov szhatiya poroshkovykh materialov pri impul'snom nagruzhenii (vzryvnoe kompaktirovanie) [Program for calculating the parameters of compression of powder materials under impulse loading (explosive compaction)]: Certificate of state registration of the computer program. No. 2010616142 (RF). 2010.