

УДК 621.7.044.2

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2020-29-35

## Свойства поверхностного слоя при высокоэнергетической обработке частицами порошков

© 2020 г. **Е.В. Петров, И.В. Сайков, Г.Р. Сайкова, В.С. Трофимов**

Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мерджанова РАН (ИСМАН), г. Черноголовка

Статья поступила в редакцию 09.12.19 г., доработана 13.02.20 г., подписана в печать 17.02.20 г.

Проведены эксперименты по высокоэнергетической обработке поверхности подложки из конструкционной стали Ст.3 потоком частиц порошков вольфрама, никеля и нитрида титана. Выполнена оценка давления соударения частиц, разогнанных энергией взрыва, на стальную мишень с использованием уравнения сохранения импульса и линейного уравнения ударной адиабаты материала частиц. Установлено, что давление соударения частиц на мишень составляет, ГПа: 62 (для частицы вольфрама), 48 (никель), 41 (нитрид титана). Осуществлен расчет температуры нагрева частицы при соударении с поверхностью стальной мишени с учетом условий сохранения массы и импульса на фронте ударной волны. Максимальная температура нагрева частиц в месте их соударения с поверхностью подложки (при скорости частиц 2000 м/с) составляет, К: 1103 (для частиц вольфрама), 755 (никель), 589 (нитрид титана). Показано, что при высокоэнергетической обработке стальной мишени потоком частиц ее твердость повышается. Максимальное упрочнение поверхностного слоя стальной мишени по сравнению с исходной микротвердостью увеличивается на 32–55 % и наблюдается на глубине 2–4 мм от поверхности обработки. Затем оно снижается до величины микротвердости исходного материала (170 HV) на расстоянии 15–20 мм от обрабатываемой поверхности.

**Ключевые слова:** высокоэнергетическая обработка, поток частиц, покрытие, давление соударения, упрочнение.

**Петров Е.В.** – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. лаборатории «Ударно-волновые процессы» ИСМАН (142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 8.). E-mail: petrov@ism.ac.ru.

**Сайков И.В.** – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. той же лаборатории ИСМАН. E-mail: revan@mail.ru.

**Сайкова Г.Р.** – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. той же лаборатории ИСМАН. E-mail: gulnaz-84@mail.ru.

**Трофимов В.С.** – докт. физ.-мат. наук., профессор, вед. науч. сотр. той же лаборатории ИСМАН. E-mail: pnkv@list.ru.

**Для цитирования:** Петров Е.В., Сайков И.В., Сайкова Г.Р., Трофимов В.С. Свойства поверхностного слоя при высокоэнергетической обработке частицами порошков. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2020. No. 1. С. 29–35. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2020-29-35.

*Petrov E.V., Saikov I.V., Saikova G.R., Trofimov V.S.*

### **Properties of the surface layer after high-energy treatment by powder particles**

Experiments were conducted on high-energy surface treatment of a structural steel substrate with a flow of tungsten, nickel, and titanium nitride powder particles. The impact pressure of the steel target and particles accelerated by explosion energy was estimated using the momentum conservation equation and the linear equation of the particle material shock adiabat. It was found that the impact pressure of the target and particles is 62 GPa for a tungsten particle, 48 GPa for a nickel particle, and 41 GPa for a titanium nitride particle. The heating temperature of particles during their collision with the steel target surface was calculated taking into account the conditions of mass and momentum conservation at the shock wave front. The maximum heating temperature of particles at the point of their collision with the substrate surface (at a particle velocity of 2000 m/s) is 1103 K for tungsten particles, 755 K for nickel particles, and 589 K for titanium nitride particles. It was shown that the steel target strength increases when it is subjected to high-energy treatment with a flow of particles. The maximum hardening of the steel target surface layer increases by 32–55 % compared to initial microhardness and is observed at a depth of 2–4 mm from the treatment surface. Then it decreases to the value of starting material microhardness (170 HV) at a distance of 15–20 mm from the treated surface.

**Keywords:** high-energy treatment, particle flow, coating, impact pressure, hardening.

**Petrov E.V.** – Cand. Sci. (Tech.), senior research scientist of the Laboratory «Shock wave processes» of Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science of the Russian Academy of Sciences (ISMAN) (142432, Russia, Moscow region, Chernogolovka, Academician Osip'yan str., 8). E-mail: petrov@ism.ac.ru.

**Saikov I.V.** – Cand. Sci. (Tech.), senior research scientist of the Laboratory «Shock wave processes», ISMAN. E-mail: revan@mail.ru.

**Saikova G.R.** – Cand. Sci. (Tech.), senior research scientist of the Laboratory «Shock wave processes», ISMAN.  
E-mail: gulnaz-84@mail.ru.

**Trofimov V.S.** – Dr. Sci. (Phys.-Math.), prof., leading research scientist of the Laboratory «Shock wave processes», ISMAN.  
E-mail: pnkv@list.ru.

**Citation:** Petrov E.V., Saikov I.V., Saikova G.R., Trofimov V.S. Properties of the surface layer after high-energy treatment by powder particles. *Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya (Universities' Proceedings. Powder Metallurgy and Functional Coatings)*. 2020. No. 1. P. 29–35 (In Russ.).  
DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2020-29-35.

## Введение

Результаты исследований воздействия высоко-скоростного потока частиц на материалы можно разделить на две группы: публикации, в которых выдвигаются физические модели проникновения частиц в глубь материала (эффект Ушеренко, или явление сверхглубокого проникания частиц [1]) [2–9], и работы, посвященные структурным изменениям в мишенях [10–18]. В основном исследователи объясняют явление сверхглубокого проникания частиц тем, что в период его протекания материал мишени в области проникания существенно разупрочнен, обеспечивая сравнительно длительное импульсное воздействие на мишень потока частиц [2–4], и предполагают, что предел текучести материала мелких частиц намного выше, чем материала сплошной среды, в которой они движутся. В работе [5] авторы для объяснения сверхглубокого проникания частиц используют концепцию сильно возбужденных состояний в сильнонеравновесных системах, разработанную В.Е. Паниным и др. [6, 7], когда количество допустимых структурных состояний в кристаллах значительно превышает число атомов, т.е. в кристаллах возникают новые степени свободы. Поэтому в сильно возбужденном состоянии материал мишени авторами [5] рассматривается как система слабо взаимодействующих частиц. Другие исследователи представляют движение частиц в виде неупругого соударения молекул продуктов детонации с частицами порошка в воздухе [8]. Авторы работы [9] связывают эффект сверхглубокого проникания частиц с развитием гидродинамических неустойчивостей в локальных областях поверхности мишени. Они предлагают модель, согласно которой материал частиц переносится фронтами фоновых ударных волн интенсивностью порядка 1–3 ГПа, формируемыми при коллективном воздействии потока микрочастиц. Этот процесс переноса материала микрочастиц становится возможным благодаря эффектам ми-

крокумуляции приповерхностных удлиненных микропор и кратеров, созданных лидирующими высокоскоростными микрочастицами и стационарными микровихрями, которые движутся вместе с ударно-волновыми фронтами.

При изучении структурных изменений в материале мишени исследователи рассматривают особенности различных ударно-волновых схем динамической обработки металлов и сплавов высокоскоростным потоком дискретных частиц [10], описывают эффекты, возникающие при движении сферических микрочастиц в материале [11, 12]. Изучается влияние воздействия микрочастиц и возникающих порошковых струй на разрушение твердых тел [13]. Полученные результаты могут быть полезны для моделирования воздействия метеоритов, космических частиц и технологических отходов на космические летательные аппараты и их компоненты. Проводятся экспериментальные исследования физико-химических превращений в различных мишенях [14, 15], вызванных интенсивной деформационной подвижностью ее структурных элементов в ударной волне при динамическом легировании. Исследуется эффект сверхглубокого проникания частиц [16] как новый метод получения наноструктурированных композитов на основе различных матриц. Изучаются стали на основе композитного материала, создаваемые обработкой потоком частиц порошков [17, 18].

Из анализа состояния исследований в данной области видно, что до настоящего времени не дано полного объяснения эффекту сверхглубокого проникания частиц. Несмотря на это исследователи пробуют найти практическое применение данному эффекту, опираясь в основном на результаты металлографического анализа и механические свойства приповерхностного слоя.

Целью работы является исследование характеристик частиц при соударении (давления и темпе-

ратуры) и свойств поверхностного слоя стальной мишени после высокоэнергетической обработки частицами порошков вольфрама, никеля и нитрида титана.

## Методика исследования

Изучение структуры и свойств приповерхностного слоя стальной мишени из конструкционной стали Ст.3, подвергнутой обработке потоком разогнанных зарядом взрывчатого вещества частиц высокой энергии микронного размера, проводилось с использованием порошков вольфрама (размер частиц  $d = 10 \div 16$  мкм), никеля ( $d = 6 \div 16$  мкм) и нитрида титана ( $d = 45 \div 60$  мкм). Размер частиц порошков определялся на лазерном анализаторе частиц «Micro Sizer 201» (ООО «ВА Инсталт», г. Санкт-Петербург).

Схема проведения эксперимента представлена на рис. 1. Исследуемый цилиндрический образец 5 из стали Ст. 3 диаметром 20 мм и высотой 30 мм помещался в направляющий канал 4, сверху которого располагалось кольцо 2 с порошком 3 насыпной плотности и массой 3 г. На кольцо устанавливался заряд взрывчатого вещества 1 с детонатором. В качестве взрывчатого вещества использовался гексоген насыпной плотности. Заряд взрывчатого вещества имел цилиндрическую форму диаметром 40 мм и высотой 100 мм, что отвечает условию реализации стационарной детонационной волны.

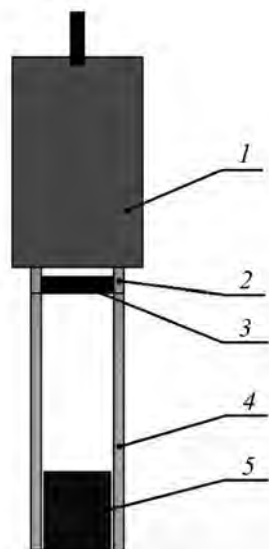


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

1 – заряд взрывчатого вещества; 2 – фиксирующее кольцо; 3 – частицы порошка; 4 – направляющий канал; 5 – образец

Как известно, при отношении высоты к диаметру заряда  $\geq 2,0 \div 2,5$  параметры детонационной волны и время реакции в ее фронте не зависят от длины заряда [19].

Между порошком и зарядом взрывчатого вещества имелся воздушный зазор. Такая конфигурация экспериментальной установки обеспечивает импульс ударной волны прямоугольного профиля [10].

При детонации ударная волна и продукты взрыва разгоняли порошок и вместе с ним воздействовали на исследуемый образец. Масса и тип взрывчатого вещества, схема обработки во всех экспериментах были одинаковые.

После обработки образцы разрезали по оси вдоль направления нагружения потоком частиц. Исследование микроструктуры проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа сверхвысокого разрешения «Ultra plus» (Carl Zeiss, Германия) и металлографического инвертированного микроскопа «Axiovert 200 MAT» (Carl Zeiss, Германия). Твердость по Виккерсу приповерхностной зоны образцов в исходном состоянии и после обработки высокоскоростным потоком частиц измеряли на твердомере ПМТ-3 (АО «ЛОМО», г. Санкт-Петербург) под нагрузкой 100 г.

## Результаты и их обсуждение

При соударении высокоскоростного потока частиц с образцом наибольшая часть частиц остается в приповерхностной зоне, формируя покрытие.

Оценка давления взаимодействия высокоскоростных частиц со стальной мишенью выполнена с использованием уравнения сохранения импульса:

$$P = \rho_0 V u$$

и линейного уравнения ударной адиабаты материала частиц:

$$V = a + b u,$$

где  $\rho_0$  — начальная плотность частиц;  $V$  — скорость ударной волны;  $u$  — массовая скорость частицы порошка во фронте ударной волны;  $a$  и  $b$  — коэффициенты ударной адиабаты материала (для вольфрама  $a = 4010$  м/с,  $b = 1,24$ ; для никеля  $a = 4646$  м/с,  $b = 1,445$ ; для нитрида титана  $a = 6280$  м/с,  $b = 1,154$  [20]).

В результате подстановки уравнения ударной

адиабаты в уравнение сохранения импульса получаем

$$P = \rho_0(a + bu)u.$$

Уравнения сохранения импульса для стальной преграды и частицы порошка имеют вид

$$P_{\text{Fe}} = \rho_{\text{Fe}}(a + bw)w,$$

$$P_{\text{пор}} = \rho_{\text{пор}}[a + b(u - w)](u - w),$$

где  $w$  — массовая скорость частицы порошка в стальной преграде.

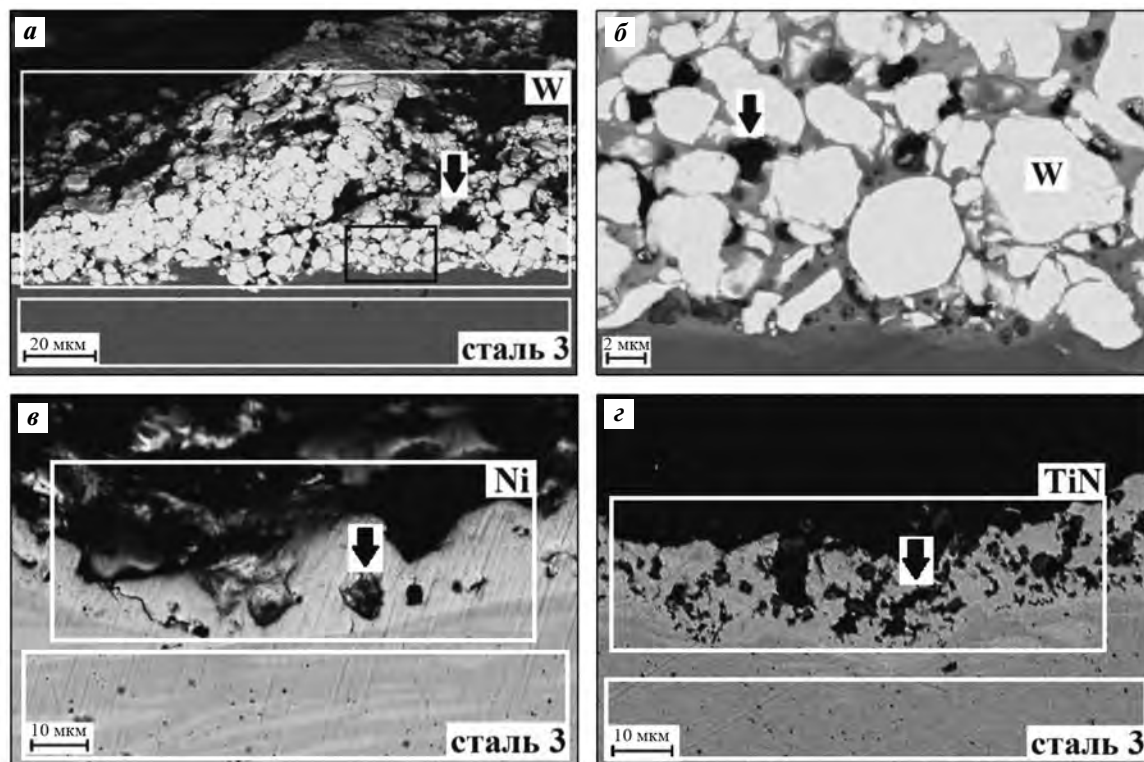
Принимаем массовую скорость частицы порошка во фронте ударной волны равной 2000 м/с, так как экспериментально измеренная скорость метания частиц составляет 1800—2200 м/с [21]. Тогда расчетные значения давления соударения частиц со стальной преградой получаются: для вольфрама — 62 ГПа, никеля — 48 ГПа, нитрида титана — 41 ГПа.

Методика расчета температуры нагрева частицы при соударении с поверхностью мишени приведена в работе [22]. Оценка этого показателя выполняется с учетом условий сохранения массы и импульса материала частиц на фронте ударной

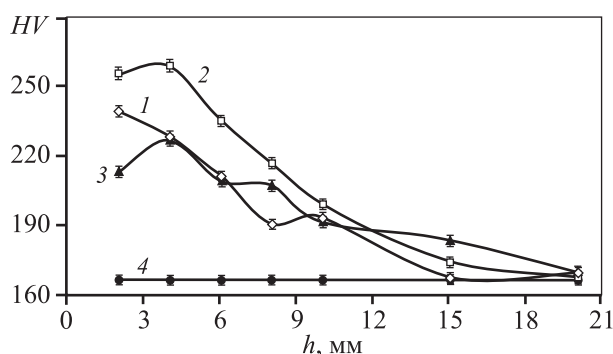
волны с использованием линейного уравнения ударной адиабаты материала частиц. В результате вычислений максимальная температура нагрева частицы при соударении с поверхностью преграды со скоростью 2000 м/с составляет 1103 К для частиц вольфрама, 755 К — никеля, 589 К — нитрида титана.

Таким образом, расчет температуры нагрева частиц рассматриваемых порошков при высокоэнергетическом соударении с поверхностным слоем стальной мишени показал, что они не достигают температуры плавления и соударяются с поверхностью в твердом состоянии. И в работе [22] установлено, что время взаимодействия частиц с продуктами детонации при метании много меньше времени расплавления этих частиц, поэтому частицы порошка в процессе взаимодействия с продуктами детонации взрывчатого вещества не успевают расплавиться, но могут оплавляться.

На рис. 2 представлены изображения структур продольных шлифов стальных мишеней (поперечный срез) после высокоэнергетической обработки частицами вольфрама, никеля и нитрида титана. Сравнение покрытий показывает, что они имеют неравномерное распределение толщины по шири-



**Рис. 2.** Изображения структуры покрытий на образцах после воздействия частицами порошков  
а, б — вольфрам, в — никель, з — нитрид титана



**Рис. 3.** Микротвердость на различной глубине стальных мишеней после воздействия частицами порошков

1 — обработка частицами вольфрама, 2 — никеля, 3 — нитрида титана; 4 — исходный образец Ст. 3

не образца и не являются сплошными, содержат микропоры (отмечены стрелками).

В покрытии, образованном порошком вольфрама (см. на рис. 2, а, б отмеченный участок — *И*), четко различаются его отдельные частицы. Размер частиц вольфрама, которые формируют покрытие на поверхности мишени, меньше по сравнению с их исходным размером. Уменьшение размера частиц порошков связано с их оплавлением при взаимодействии с продуктами взрыва до соударения с поверхностью мишени. Толщина слоя *И*-покрытия по всей ширине образца (20 мм) изменяется от 10 до 65 мкм.

Покрытие, сформированное из потока частиц никеля (см. обведенный участок на рис. 2, в), также имеет неравномерное распределение толщины по ширине образца — от 8 до 15 мкм. Толщина покрытия из частиц нитрида титана (см. выделенный участок на рис. 2, г) на поверхности мишени варьируется от 7 до 10 мкм.

Исследование распределения микротвердости по глубине стальных мишеней (рис. 3) после высокоскоростного соударения с частицами порошков показало, что максимальное повышение микротвердости мишени наблюдается в приповерхностном слое на глубине  $h = 2\div 4$  мм с дальнейшим ее снижением по мере удаления от поверхности в глубь образца. На глубине 15–20 мм значения микротвердости составляют порядка 170 HV — как у исходного материала Ст. 3. Таким образом, с удалением от контактной поверхности образца ( $h = 0$ ) влияние ударной волны и частиц порошков на структуру стальной мишени уменьшается.

Максимальное упрочнение поверхностного слоя мишени происходит после воздействия на нее

частицами никеля — микротвердость увеличивается на 55 % по сравнению с микротвердостью исходного образца (см. кр. 2 на рис. 3). Воздействие частицами вольфрама повышает микротвердость поверхностного слоя мишени на 40 % (кр. 1 на рис. 3), частицами нитрида титана — на 32 % (кр. 3 на рис. 3) по сравнению с исходной микротвердостью образца.

## Заключение

При высокоэнергетической обработке частицами порошков поверхности стальной мишени достигается давление соударения частиц на мишень, равное 62 ГПа — для частицы вольфрама, 48 ГПа — никеля, 41 ГПа — нитрида титана. В результате выполненного расчета максимальная температура нагрева частиц в месте их соударения с поверхностью мишени, при скорости частиц 2000 м/с, составляет 1103 К для частиц вольфрама, 755 К — для никеля, 589 К — нитрида титана. Частицы данных порошков не достигают своих температур плавления и соударяются с поверхностью в твердом состоянии. Исследование изображений структур полученных покрытий после воздействия потока частиц порошков показывает, что покрытия имеют неравномерное распределение толщины по ширине образца и являются не сплошными, содержат микропоры. Установлено, что микротвердость мишени после соударения с потоком частиц вольфрама, никеля и нитрида титана повышается. Максимальное упрочнение поверхностного слоя стальной мишени происходит на глубине 2–4 мм от поверхности обработки, и величина микротвердости увеличиваются на 32–55 % по сравнению с исходной.

## Литература/References

1. Ушеренко С.М. Сверхглубокое проникание частиц в преграды и создание композиционных материалов. Минск: НИИ ИП с ОП, 1998.  
*Usherenko S.M. Ultra-deep penetration of particles into obstacles and the creation of composite materials. Minsk: NII IP s OP, 1998 (In Russ).*
2. Андилевко С.К. Гидродинамическая модель сверхглубокого проникания абсолютно твердых осесимметричных частиц в полубесконечную металлическую преграду. *Инж.-физ. журн.* 1998. Т. 71. No. 3. С. 399–403.  
*Andilevko S.K. Hydrodynamic model of superdeep pe-*

- netration of absolutely solid axisymmetric particles into a seminfinite metal target. *J. Eng. Phys. Thermophys.* 1998. Vol. 71. Iss. 3. P. 393–397.
3. Ушеренко С.М., Гущин В.И., Дыбов О.А. Результаты соударения потока микрочастиц с металлической преградой в режиме сверхглубокого проникания. *Хим. физика.* 2002. Т. 21. No. 9. С. 43–51.  
*Usherenko S.M., Gushchin V.I., Dybov O.A.* The results of the collision of the flow of microparticles with a metal target in super-deep penetration. *Khimicheskaya fizika.* 2002. Vol. 21. No. 9. P. 43–51 (In Russ.).
  4. Kiselev S.P., Kiselev V.P. Superdeep penetration of particles into a metal target. *Int. J. Impact Eng.* 2002. Vol. 27. Iss. 2. P. 135–152.
  5. Chengzhi Qi, Jianjie Chen. Physical mechanism of super-deep penetration of solid microparticles into solid targets. *J. Mech. Behav. Mater.* 2014. Vol. 23. Iss. 1–2. P. 21–26.
  6. Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Панин А.В. Физическая мезомеханика деформируемого твердого тела как многоуровневой системы. I. Физические основы многоуровневого подхода. *Физ. мезомеханика.* 2006. Т. 9. No. 3. С. 9–22.  
*Panin V.E., Egorushkin V.E., Panin A.V.* Physical mesomechanics of a deformable solid as a multilevel system. I. Physical foundations of a layered approach. *Fizicheskaya mezomekhanika.* 2006. Vol. 9. No. 3. P. 9–22 (In Russ.).
  7. Панин В.Е., Панин А.В., Моисеенко Д.Д., Шляпин А.Д., Авраамов Ю.С., Кошкин В.И. Физическая мезомеханика деформируемого твердого тела как многоуровневой системы. II. Явление взаимного проникания частиц разнородных твердых тел без нарушения сплошности под воздействием концентрированных потоков энергии. *Физ. мезомеханика.* 2006. Т. 9. No. 4. С. 5–13.  
*Panin V.E., Panin A.V., Moiseenko D.D., Shlyapin A.D., Avraamov Yu.S., Koshkin V.I.* Physical mesomechanics of a deformable solid as a multilevel system. II. The phenomenon of mutual penetration of particles of dissimilar solids without disruption of continuity under the influence of concentrated energy flows. *Fizicheskaya mezomekhanika.* 2006. Vol. 9. No. 4. P. 5–13 (In Russ.).
  8. Крестелев А.И. Моделирование процесса увлечения частиц порошка взрывными ударными волнами. *Вестн. Сам.ГТУ Сер. Физ.-мат. науки.* 2014. Т. 35. No. 2. С. 125–129.  
*Krestelev A.I.* Modeling the process of entrainment of powder particles by explosive shock waves. *Vestnik SamGTU. Ser. Fiziko-matematicheskie nauki.* 2014. Vol. 35. No. 2. P. 125–129 (In Russ.).
  9. Макаров П.В. Модель сверхглубокого проникания твердых микрочастиц в металлы. *Физ. мезомеханика.* 2006. Т. 9. No. 3. С. 61–70.  
*Makarov P.V.* Model of super-deep penetration of solid microparticles into metals. *Fizicheskaya mezomekhanika.* 2006. Vol. 9. No. 3. P. 61–70 (In Russ.).
  10. Алексенцева С.Е., Кривченко А.Л. Исследование особенностей обработки металлов и сплавов высокоскоростным потоком дискретных частиц, разогнанных энергией взрыва канальных зарядов, и другими динамическими методами. *Вестн. СамГТУ. Сер. Техн. науки.* 2013. Т. 38. No. 2. С. 71–78.  
*Aleksentseva S.E., Krivchenko A.L.* Investigation of the features of processing metals and alloys with a high-speed stream of discrete particles dispersed by the energy of the explosion of channel charges, and other dynamic methods. *Vestnik SamGTU. Ser. Tekhnicheskie nauki.* 2013. Vol. 38. No. 2. P. 71–78 (In Russ.).
  11. Ганигин С.Ю., Калашников В.В., Ибатуллин И.Д., Мурзин А.Ю., Глазунова О.Ю., Григорьев А.А. Высокоскоростное ударное взаимодействие твердых микрочастиц с подложкой. *Изв. Самар. науч. центра РАН.* 2013. Т. 15. No. 4–2. С. 339–342.  
*Ganigin S.Yu., Kalashnikov V.V., Ibatullin I.D., Murzin A.Yu., Glazunova O.Yu., Grigor'ev A.A.* High speed impact of solid microparticles and the substrate. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN.* 2013. Vol. 15. No. 4–2. P. 339–342 (In Russ.).
  12. Фиговский О.Л., Готлиб Е.М., Наумов С.В. О физических эффектах, происходящих при получении нанокомпозитов методом сверхглубокого проникновения. *Вестн. Казанского технол. ун-та.* 2010. No. 11. С. 113–117.  
*Figovsky O.L., Gotlib E.M., Naumov S.V.* On the physical effects occurring upon receipt of nanocomposites by methods of super-deep penetration. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta.* 2010. No. 11. P. 113–117 (In Russ.).
  13. Khristoforov B.D. Research on influence of impact of microparticles and sewing needles on destruction of solid bodies. *Eng. Trans.* 2010. Vol. 58. No. 3–4. P. 131–138.
  14. Марукович Е.И., Ушеренко Ю.С. Особенности структурных изменений в меди при динамическом легировании. *Литье и металлургия.* 2012. Т. 68. No. 4. С. 120–125.  
*Marukovich E.I., Usherenko Yu.S.* Peculiarities of structural changes in copper at dynamic alloying. *Lit'e i Metallurgiya.* 2012. Vol. 68. No. 4. P. 120–125 (In Russ.).
  15. Korshunov L.G., Zeldovich V.I., Usherenko S.M., Kheifets A.E., Khomskaya I.V., Chernenko N.L., Frolova N.Yu. Superdeep penetration of the microparticles accelerated by explosion in metals and alloys of iron. *Adv. Mater. Res.* 2008. Vol. 47–50. P. 423–426.

16. Figovsky O.L., Usherenko S.M. Superdeep penetration—novel method of nanoreinforced composites producing based on metallic, ceramic and polymer matrixes. *Adv. Mater. Res.* 2008. Vol. 79—82. P. 1975—1978.
17. Usherenko Yu., Usherenko S., Yazdani J. Composite materials for steel cutting and concrete crushing. *Procedia Eng.* 2017. No. 172. P. 1198—1203.
18. Марукович Е.И., Ушеренко Ю.С., Ушеренко С.М. Динамическая модификация алюминия и его сплава. *Металлургия машиностроения*. 2017. No. 5. С. 11—19.  
Marukovich E.I., Usherenko Yu.S., Usherenko S.M. Dynamic modification of aluminum and its alloy. *Metallurgiya mashinostroeniya*. 2017. No. 5. P. 11—19 (In Russ).
19. Дремин А.Н., Савров С.Д., Трофимов В.С., Шведов К.К. Детонационные волны в конденсированных средах. М.: Наука, 1970.  
Dremin A.N., Savrov S.D., Trofimov V.S., Shvedov K.K. Detonation waves in condensed matter. Moscow: Nauka, 1970 (In Russ).
20. Андреев С.Г., Бабкин А.В., Баум Ф.А., Имховик Н.А., Кобылкин И.Ф., Колпаков В.И., Ладов С.В., Одинцов В.А., Орленко Л.П., Охитин В.Н., Селиванов В.В., Соловьев В.С., Станюкович К.П., Чельшев В.П., Шехтер Б.И. Физика взрыва. Т. 2. М.: Физматлит, 2004.  
Andreev S.G., Babkin A.V., Baum F.A., Imkhovik N.A., Kobylkin I.F., Kolpakov V.I., Ladov S.V., Odintsov V.A., Orlenko L.P., Okhitin V.N., Selivanov V.V., Solov'ev V.S., Stanjukovich K.P., Chelyshev V.P., Shekhter B.I. Explosion physics. Vol. 2. Moscow: Fizmatlit, 2004 (In Russ).
21. Роман О.В., Андилевко С.К., Карпенко С.С., Романов Г.С., Шилкин В.А. Эффект сверхглубокого проникания. Современное состояние и перспективы. *Инж.-физ. журн.* 2002. Т. 75. No. 4. С. 187—199.  
Roman O.V., Andilevko S.K., Karpenko S.S., Romanov G.S., Shilkin V.A. Effect of superdeep penetration. State of the art and prospects. *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2002. Vol. 75. Iss. 4. P. 997—1012.
22. Петров Е.В., Трофимов В.С. Оценка температуры нагрева частиц при высокоскоростном соударении с преградой. *Деформация и разрушение материалов*. 2018. No. 3. С. 38—41.  
Petrov E.V., Trofimov V.S. Evaluation of particle heating temperature during high-speed collision with target. *Deformatsiya i razrushenie materialov*. 2018. No. 3. P. 38—41 (In Russ).

Вышел в свет учебник «Твердые сплавы» (авторы: Панов В.С., Коняшин И.Ю., Левашов Е.А., Зайцев А.А.) — издательский дом НИТУ «МИСиС», 2019 г., 398 с.

Даны современные представления о теории и практике твердых сплавов, рассмотрены общие и специальные вопросы технологии производства современных спеченных твердых сплавов, их структурные особенности и свойства. Изложены физико-химические основы получения материалов нового поколения, в том числе наноструктурированных, иерархических, функционально-градиентных твердых сплавов. Освещены технологические процессы получения исходных порошков карбидов, твердосплавных смесей и изделий из них, а также методы контроля полуфабрикатов и готовых изделий. Проанализированы фундаментальные основы металловедения, особенности формирования структуры твердых сплавов, технологии нанесения износостойких покрытий. Даны области применения твердых сплавов в различных отраслях промышленности.

Заказать учебник можно по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4, издательский дом НИТУ «МИСиС», а также по телефонам: (495) 638-44-16, (495) 638-44-43.