

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ВЗРЫВНОЙ ОБРАБОТКИ  
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОРОШКОВ  
НА ОСНОВЕ ТИТАНА**

**В. В. Драгобецкий, В. Ю. Коцюба, Д. В. Савелов, Е. А. Наумова, Р. И. Рей**  
Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина.  
E-mail: vldrag@kdu.edu.ua

Обоснована актуальность применения импульсных источников энергии для производства деталей из порошков на основе титана. Дан детальный анализ механизмов уплотнения и связывания частиц при импульсном нагружении заготовок из порошковых смесей. Дополнен классификатор типовых методов повышения плотности порошковых и спеченных заготовок. Установлены дополнительные механизмы образования ультрадисперсных структур, связанные с образованием встречных кумулятивных струй, откола при соударении и глубокого проникновения более легких частиц в порошковую заготовку. Предложены варианты технологических процессов, включающих дополнительное импульсное нагружение при производстве заготовок из порошка на основе титана.

**Ключевые слова:** уплотнение, взрыв, порошок, титан, интенсивная пластическая деформация.

**ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ ВИБУХОВОЇ ОБРОБКИ  
ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ВИРОБІВ ІЗ ПОРОШКІВ  
НА ОСНОВІ ТИТАНУ**

**В. В. Драгобецький, В. Ю. Коцюба, Д. В. Савелов, О. О. Наумова, Р. І. Рей**  
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна.  
E-mail: vldrag@kdu.edu.ua

Обґрунтовано актуальність застосування імпульсних джерел енергії для виробництва деталей з порошків на основі титану. Надано детальний аналіз механізмів ущільнення та зв'язування частинок при імпульсному навантаженні заготовок з порошкових сумішей. Доповнено класифікатор типових методів підвищення щільності порошкових і спечених заготовок. Встановлено додаткові механізми утворення ультрадисперсних структур, що пов'язані з утворенням зустрічних кумулятивних струменів, відколу при зіткненні та глибокого проникнення більш легких частинок в порошкову заготовку. Запропоновано варіанти технологічних процесів, що включають додаткове імпульсне навантаження при виробництві заготовок з порошку на основі титану.

**Ключові слова:** ущільнення, вибух, порошок, титан, інтенсивна пластична деформація.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Прошое столетие характеризуется появлением комплекса прогрессивных высокоэнергетических процессов высокоскорост-

ного деформирования – штамповка импульсным воздействием, создании новых синтетических и композиционных материалов, сварка взрывом металлов и сплавов, техника взрывного дробления, использование аномального упрочнения конструкционных сталей на фронтах сильных ударных волн, получение новых состояний веществ, веществ с помощью фазовых переходов, уплотнение взрывом порошковых материалов, жидкофазное спекание взрывом, активирование спекания и реакционной способности порошков при ударно-волновом нагружении и т.д. Настоящий век характеризуется растущим интересом к производству нано и пикокристаллических, аморфных и субкристаллических компонентов; получению плотных композитов с однородной структурой. В настоящее время наиболее прогрессивной технологией изготовления заготовок лопаток компрессора газотурбинных двигателей является их получение путем синтеза из смеси порошковых компонентов на основе порошка титана. При этом наиболее высокие показатели прочности и пластичности заготовок получают методом порошковой металлургии и интенсивного уплотнения винтовой экструзией [1, 2]. При изготовлении заготовок методами порошковой смеси в твердой в твердой фазе. При твердофазном спекании порошков титана на границах зерен находятся тонкие оксидные пленки и примеси, существенно снижающие пластичность, что является одной из причин ограниченного применения спеченных титановых сплавов.

Чрезвычайно важным является и применение ударно-волновых методов компактирования для получения деталей из порошков. При этом ряд материалов спрессованных взрывом обладают уникальной структурой принципиально не реализуемая и достигаемая другими способами. Формирование такой структуры обусловлено физико-химическими особенностями ударно-волнового и детонационного воздействия.

Цель работы – совершенствование технологии изготовления и анализ механизмов импульсного воздействия при деформировании и уплотнении порошковых заготовок.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Уплотнение порошковых заготовок является проблемным вопросом, который достаточно активно изучается как отечественными, так и зарубежными исследователями. В научно-технической литературе описаны результаты исследования уплотнения порошков и алюминиевой стружки, а также смеси порошковых компонентов для получения компактных медных, титановых и др. сплавов. Глубокие и детальные аналитические исследования методов деформационной обработки выполнены в работе [1]. Получение качественных изделий из порошков формируется на основе выбора операций: подготовки состава, уплотнения порошковых дисперсных материалов, предварительное спекание порошковых и их последующее деформирование. Типовыми методами повышения плотности порошковых и спеченных заготовок являются [1]: двойное прессование, выдержка под давлением, увеличение скорости нагружения, применение вибраций, интенсификация сдвиговых деформаций. Интенсификация сдвиговых деформаций либо путем смещение инструмента по поверхности заготовки (управление трением),

либо созданием неравномерности свойств в объеме порошка (неравномерность течения по гидростатическом сжатии) на основе классификации методов повышения плотности и пластичности порошковых материалов и заготовок [1] по этапам: выбора элементов технологии с учетом ограничения на технологический процесс и возможные схемы деформирования установлено, что основной целью обработки давлением, в рассматриваемой технологической схеме, является получение заготовок с минимальной пористостью [1]. В работе [1] рассмотрен один из вариантов решения этой задачи – использования с реализацией схемы простого сдвига. Реализация интенсивных сдвиговых деформаций при обработке порошковых или дисперсных заготовок существенно повышают плотность [1]. В этом случае прочность, которая непосредственно связана с плотностью порошковых заготовок, повышается путем устранения пор и дефектов типа флокенов и формирования субмикроструктурной структуры в объеме заготовки [1]. Кроме того для таких видов деформационной обработки характерно явление гомогенизации, которое приводит к устранению ликвации легирующих элементов в заготовках из порошковых материалов [1].

Однако классификация возможных технологических схем не включает процессы импульсной обработки, хотя и предполагает увеличение скорости деформирования. Если существующий классификатор строить на базе морфологического анализа, который предполагает рассмотрение всех возможных вариантов технических решений, то область выбора рациональных методов уплотнения порошковых заготовок и их деформирования может быть расширена (рис. 1) с учетом наличия технологического оборудования. Учитывая то, что на предприятии в 1984 г. введен в эксплуатацию и включен в производственный цикл корпус импульсной штамповки с повышенной мощностью установок по штамповке взрывом листовых деталей бризантными взрывчатыми веществами, то вполне оправдано рассмотренные альтернативного варианта получения заготовок на основе порошка титана. Причем аналогичная технология была уже отработана на предприятии при производстве изделий из твердого сплава ВК-6. При этом было получено уплотнение дисперсной заготовки, превосходящее по своим показателям лучшие мировые аналоги, в том числе и фирмы SANDWIK. Рассматривались различные варианты уплотнения:

- 1) посредством соударения вольфрамового ударника, метаемого зарядом взрывчатого вещества с штабиком после первичного спекания;
- 2) взрывного компактирования в цилиндрической [3] (цилиндрический штабик) или призматической сборке (призматический штабик);
- 3) взрывного компактирования в цилиндрической сборке штабика помещенного в медную оболочку;
- 4) призматического штабика накладным зарядом взрывчатого установленного на один из его торцев;
- 5) накладным зарядом взрывчатого вещества на вольфрамовые накладки на штабик;
- 6) сходящимися ударными волнами на штабик в воде;

7) цилиндрическим и сферическим зарядом взрывчатого вещества в стационарном разрушаемом бассейне.

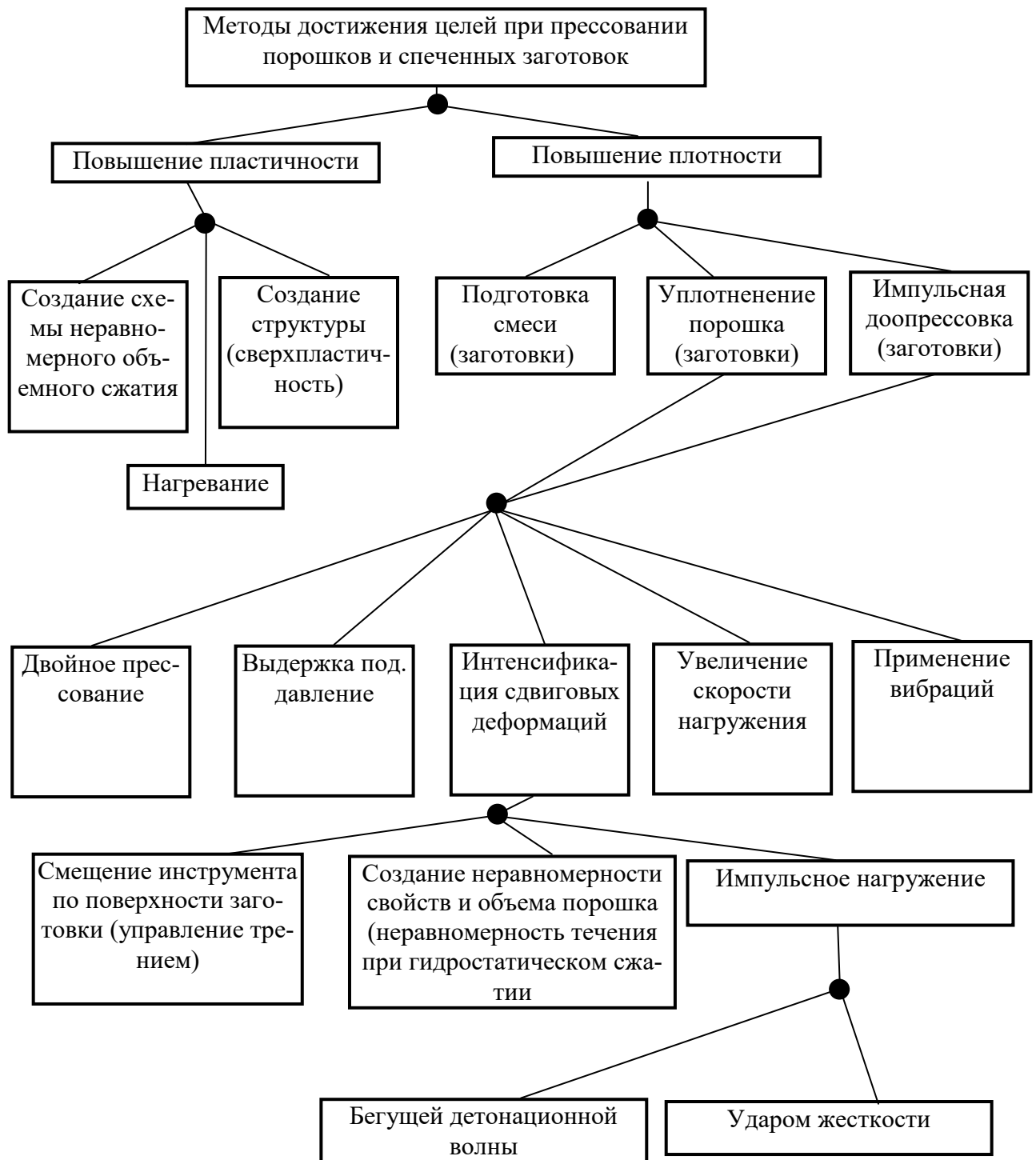


Рисунок 1 – Расширенная классификация методов повышения плотности и пластичности порошковых материалов

Первая схема реализует условия упрочнения и получения нанокompозита. Вторая обеспечивает условие для сварки взрывом и получения нанокompозита. Остальные схемы характерны для процессов взрывного уплотнения и упрочнения.

В экспериментах использовались штабики предварительно уплотняемые в контейнере путем одноосного прессования до  $\approx 50-56\%$  от теоретической плотности с последующим первичным спеканием. При помещении штабиков в медную трубку и последующим нагружении бегущей ударной волной происходило образование сварного соединения карбида вольфрама с медью с образованием в штабике мелкодисперсных включений синтетического алмаза. Масса взрывчатого вещества выбиралась такой, чтобы не происходило разрушения штабика волнами нагружения и разгрузки. Штабики, которые упрочнялись в воде помещались в герметичную силиконовую оболочку. Помимо этих экспериментов было выполнено взрывное легирование готовых изделий (твердосплавные режущие пластины) карбидом кремния и бора, а также модифицирование взрывным нагружением исходной порошковой смеси. После проведенных испытаний штабики подвергались окончательному спеканию и прессованию механическим и металлографическим испытаниям с использованием электронной микроскопии. Проведен комплекс экспериментальных исследований связанных с варьированием различных схем нагружения не дал положительных результатов. Неожиданные результаты были получены когда изолированные от влаги штабики были помещены в замкнутый объем жидкости (вода) под давлением 2,0 атм и нагружением импульсом небольшой интенсивности. Механические характеристики штабиков после окончательного спекания и их структура представлены в табл. 1 микроструктура представлена на рис. 2–6. Объяснение эффекта импульсного воздействия на обрабатываемый материал может быть получено из анализа явлений, сопровождающий процесс действия импульсных нагрузок.

Таблица 1 – Механические испытания

№ образца	Предел прочности при изгибе ( $\sigma_{изг}$ ), МПа	Твердость, HRA	Пористость %	Примечание
1	2,202	90	0,02	Образцы № 1; 2; 3 – серийная технология
2	1,568	90	0,02	
3	1,691	90.5	0,02	
4	2,484	89.5	0,002	Образцы № 4; 5 – обработка импульсом
5	2,43	89.5	0,002	



Рисунок 2 – Цилиндрические штабики в оболочках после уплотнения взрывом

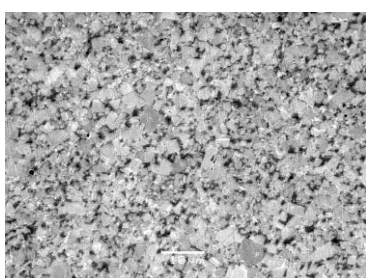


Рисунок 3 – Микроструктура образца, изготовленного по серийной технологии

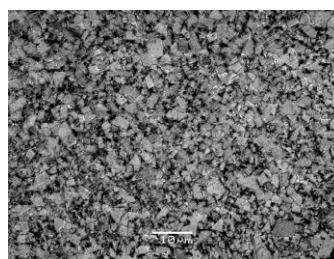


Рисунок 4 – Микроструктура образца после импульсного нагружения малой интенсивности

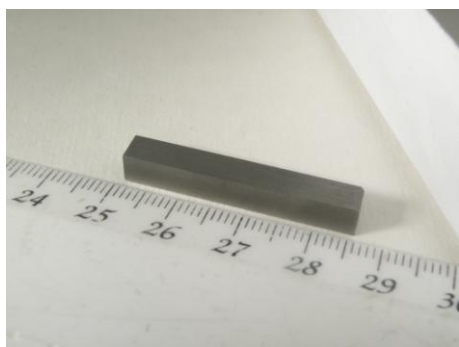


Рисунок 5 – Образец из порошка после предварительного спекания (штабик)

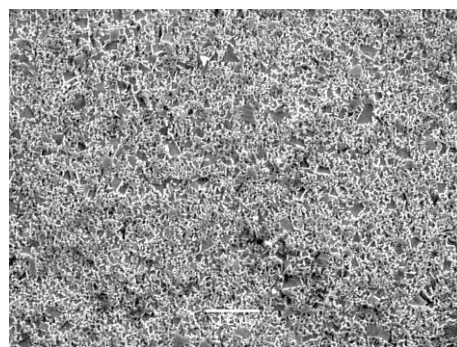


Рисунок 6 – Микроструктура образца после спекания

Таким образом, импульсные методы металлообработки могут найти применение при получении сплавов титана с алюминием, марганцем ванадием хромом и др. Известные технологии осуществляют путем перемешивания легирующих добавок с титановой губкой. В дальнейшем эта смесь подвергается либо интенсивной пластической деформации для получения поковок, либо смесь поступает на изготовление электрода для первой плавки в вакуумнодуговой печи.

Существенное повышение качества перемешивания смеси титановой губки с легирующими добавками достигается при использовании методов взрывной металлообработки в настоящее время использование энергии, которая выделяется при детонации заряда взрывчатого вещества или электрогидравлическом разряде удалось достичь самых высоких плотностей пресс-заготовок и пресс-деталей [3–10] и наиболее равномерной и мелкокристаллической структуры при получении литых изделий. В последнем случае при обработке расплавов энергией ударной волны в расплаве исключаются макро и микроликвации, пористость и получается более плотная структура. Ударная волна, проходя через расплав, вызывает зарождение дополнительных центров кристаллизации, возникновение которых связано с механизмом кавитационного возбуждения и дополнительной флуктуацией энергии в расплаве. Если взрыв происходит когда металл находится в двухфазном состоянии, то происходит интенсивное дробление образовавшихся кристаллов. При этом осколки этих кристаллов становятся дополнительными центрами кристаллизации. Кристаллизующийся металл под действием взрыва уплотняется.

Действие ударной волны и продуктов детонации на порошковую смесь сопровождается пластическим деформированием частиц с низким пределом текучести и дроблением хрупких. Это сопровождается потерей энергии и затуханию ударной волны. Кроме этого происходит схождение волн, преломленных от свободной поверхности или отраженных от стенок контейнера, что приводит к увеличению давления. При этом наиболее высокие давления, которые возникают в осевой области, предварительно спрессованной дисперсной заготовки, приводят к интенсивному перемешиванию смесей порошков, в данном случае титана и легирующих добавок. При взрывном прессовании смеси титано-алюминиевых и других смесей порошка, реализуется комплекс механизмов, которые могут приводить либо к образованию связи между частицами порошка, либо к дроблению последних. Образование связи между частицами происходит в результате протекания процессов сварки взрывом, сварки трением и жидкофазного спекания детально освещено в монографии Р. Прюмера.

При прохождении фронта ударной волны через частицу происходит ее ускорение до определенной скорости. При ее соударении с другой частицей, может образовываться соединение. Высокое давление, реализуемое при взрывном нагружении, приводит к тому, что трение между частицами вызывает локальный разогрев их поверхностей. В результате создаются условия для образования сварного соединения трением или адиабатических сдвиговых деформаций. При ударно-волновом нагружении происходит и процесс квазиадиабатического нагрева поверхностей частиц порошка. Высокое давление и нагрев приводят к плавлению поверхностей частиц с последующим быстрым охлаждением и реализации механизма жидкофазного спекания. При определенных условиях более легкие частицы, например, алюминия, перемещаясь в матрице из порошка титана, возбуждают перед собой ударно-пластические волны. На пути движения частиц образуются зоны разупрочненного состояния с сильным смещением атомов из узлов кристаллической решетки. Это обеспечивает высокую подвижность атомов и скорость

перемещения частиц, захлопывание каналов, которые возникают на пути движения легких частиц. Более тяжелые частицы позади легких обтекают их и заполняют каналы, поры, пустоты. В дополнение к этому следует отметить, что при значительных деформациях заготовок из смеси порошков возможно накопление свободной энергии внутри отдельных частиц. В этом случае диффузионные процессы атомов происходят изнутри частиц на поверхность активированную в результате импульсного нагружения диффузия атомов способствует уплотнению отдельных конгломератов частиц. Кроме того в результате диффузии вдоль контактных поверхностей уменьшаются размеры межконтактных пор.

Для создания плотных структур необходимо максимально активизировать процессы дробления частиц порошковой смеси, схлопывание пор и удаления окисных пленок.

Для решения такого рода задач необходимо максимально активировать процессы струеобразования и откола, возникающие при столкновении частиц, а также процессов связанных с возникновением адиабатических сдвиговых деформаций, плавления поверхностей частиц с последующим быстрым охлаждением. Параметры процесса импульсного нагружения при обработке порошковых смесей в большой степени зависят от скорости деформирования заготовки, соотношения масс компонентов их теплофизических и механических свойств и толщины окисных пленок.

В целом технологии импульсного деформирования могут быть использованы в следующих аспектах:

- дополнительная технологическая операция доопрессовки заготовок из порошков на основе титана после первичного спекания для повышения плотности заготовки и качества получаемых деталей;
- импульсное воздействие в условиях обеспечения дополнительной интенсивной пластической деформации порошковой заготовки после винтовой экструзии;
- как самостоятельная технология, включающая импульсную доопрессовку с последующей интенсивной пластической деформацией.

**ВЫВОДЫ.** Технология импульсной металлообработки может быть включена в технологический цикл производства изделий из порошков на основе титана для повышения плотности или как самостоятельный процесс обеспечивающий уплотнение частиц заготовки и в последующем деформирование в условиях интенсивной пластической деформации.

В результате проведенных исследований установлены дополнительные механизмы импульсного деформирования, связанные с взаимодействием кумулятивных струй при косом соударении частиц, явлением откола и прониканием более легких частиц в структуру заготовки

Дополнительное нагружение после предварительного доопрессования увеличило на 24 – 27 % прочность на изгиб готовых изделий из порошковых композитов. Следовательно, импульсное нагружение малой интенсивности при частотных характеристиках, соответствующих звуковым частотам, приводит к получению безпористых структур и приобретению у заготовок из порошка пластических свойств.



ЛИТЕРАТУРА

1. Совершенствование технологического процесса и оснастки для деформирования порошковых заготовок с применением интенсивной пластической деформации / А. Ф. Тарасов, Я. Е. Бейгельзимер, Д. В. Павленко, М. Б. Штерн // *Обработка металлов давлением: сборник научных трудов.* – Краматорск: ДГМА, 2015. – № 2 (41). – С. 336–344.
2. Павленко Д.В. Материаловедческие аспекты ресурсосберегающих технологии получения титановых полуфабрикатов // *Технологические системы.* – 2013. – №4 (65). – С. 21–29.
3. Совершенствование технологий взрывного компактирования порошковых смесей карбидов и кобальта / Е.А. Наумова, В.В. Лотоус, Г.Л. Дубров, В.В. Драгобещкий, О.В. Гнатенко // *Вісник НТУ «ХПІ».* Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – № 42 (1015) – С. 131–135.
4. Shapoval A.N., Shapoval A.A. Development of The Unit For Multi-stage Vibration Drawing of Metal Product // *Tsvetnye Metally*, 2002, Issue 4, pp. 77–82.
5. Dragobetskii V.V., Shapoval A.A., Zagoryanskii V.G. Development of Elements of Personal Protective Equipment of New Generation on the Basis of Layered Metal Compositions // *Steel in Translation*, 2015, Vol. 45, Issue 1, © Allerton Press, Inc., pp. 33–37. DOI: 10.3103/S0967091215010064.
6. Dragobetskii V.V., Shapoval A.A., Mospan D.V., Trotsko O.V., Lotous V.V. Excavator Bucket Teeth Strengthening Using a Plastic Explosive Deformation // *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, No. 4, pp. 363–368.
7. Shapoval A.A., Mos'pan D.V., Dragobetskii V.V. Ensuring High Performance Characteristics For Explosion-Welded Bimetals // *Metallurgist*, July 2016, Volume 60, Issue 3, pp 313–317. DOI: 10.1007/S11015-016-0292-9.
8. Gorbatyuk S.M., Shapoval A.A., Mos'pan D.V., Dragobetskii V.V. Production of Periodic Bars by Vibrational Drawing // *Steel in Translation*, 2016, Vol. 46, No. 7, pp. 474–478. © Allerton Press, Inc. DOI: 10.3103/S096709121607007X.
9. Sikulskiy V., Kashcheyeva V., Romanenkov Yu., Shapoval A. Study of the process of shape-formation of ribbed double-curvature panels by local deforming // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* – 2017. – Vol. 4, Issue 1 (88). – P. 43–49. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.108190.
10. Volodymyr Dragobetskii, Alexander Shapoval, Elena Naumova, Sergii Shlyk, Denis Mospan, Valeriy Sikulskiy The Technology of Production of a Copper – Aluminum – Copper Composite to Produce Current Lead Buses of the High – Voltage Plants «International Conference on MODERN ELECTRICAL AND ENERGY SYSTEMS» Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyyi National University, Ukraine, November 15-17, 2017, P 400–403.

**USING EXPLOSIVE PROCESSING METHODS IN THE MANUFACTURE  
OF PRODUCTS FROM POWDERS BASED ON TITANIUM**

**V. Dragobetskii, V. Kotsyuba, D. Savelov, E. Naumova, R. Ray**

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine.

E-mail: vldrag@kdu.edu.ua

**Purpose.** The purpose of the work is to improve the manufacturing technology and analyze the mechanisms of impulse action in the deformation and compaction of powder blanks. **Methodology.** Based on the classification of methods for improving the performance properties of composites, heuristic methods for searching new technologies, morphological analysis and a complex of experimental studies, a new technology for the production of powder products has been developed. **Results.** A technological outline for compacting powders from carbides and cobalt are considered. The ways of increase of mechanical properties of powder parts are shown. The results of experimental researches on explosive compacting from the tested powder blanks after preliminary sintering are given. The results of mechanical tests and metallography of samples after final sintering are submitted. A significant increase of mechanical properties is connected with the activation of the process of sintering and modifying influence of shock waves. **Originality.** For the first time the structure of a composite of powder is obtained, the density, plasticity and strength of which exceeds the best world analogues. **Practical value.** The additional loading after preliminary pre-pressing increased the bending strength of finished products from powder composites by 24-27%. Consequently, pulsed low-intensity loading with frequency characteristics corresponding to the sound frequencies leads to the production of unporous structures and the acquisition plastic properties in powder blanks. *References 10, tables 1, figures 6.*

**Key words:** sintering, explosion, compacting, powders, mechanical properties.

REFERENCES

1. Tarasov, A., Beygelzimer, Ya., Pavlenko, D., Shtern, M. (2015), "Perfection of the technological process and tooling for deformation of powder blanks with the use of intensive plastic deformation", *Obrabotka metallov davleniem: sbornik nauchnyih trudov*, vol. 2, no. 41, pp. 336–344.
2. Pavlenko, D. (2013), "Material science aspects of resource-saving technologies for production of titanium semi-finished products", *Tehnologicheskie sistemy*, vol. 4, no. 65, pp. 21–29.
3. Naumova, Ye., Lotous, V., Dubrov, G., Dragobetskii, V., Gnatenko, O. (2013), "Perfection of technologies for explosive compacting of powder mixtures of carbides and cobalt", *Visnik NTU «HPI». Serija: Novi rishennja u suchasnih tehnologijah*, vol. 42, no. 1015, pp. 131–135.
4. Shapoval, A.N., Shapoval, A.A. (2002), "Development of the unit for multi-stage vibration drawing of metal product" *Tsvetnye Metally*, iss. 4, pp. 77–82.

5. Dragobetskii, V., Shapoval, A., Zagoryanskii, V. (2015) “Development of elements of personal protective equipment of new generation on the basis of layered metal compositions”, *Steel in Translation*, vol. 45, iss. 1, pp. 33–37. DOI: 10.3103/S0967091215010064.
6. Dragobetskii, V., Shapoval, A., Mos’pan, D., Trotsko, O., Lotous, V. (2015), “Excavator bucket teeth strengthening using a plastic explosive deformation”, *Metallurgical and Mining Industry*, no. 4, pp. 363–368.
7. Shapoval, A., Mos’pan, D., Dragobetskii, V. (2016) “Ensuring high performance characteristics for explosion-welded bimetals”, *Metallurgist*, vol. 60, iss. 3, pp 313–317. DOI: 10.1007/S11015-016-0292-9.
8. Gorbatyuk, S., Shapoval, A., Mos’pan, D., Dragobetskii, V. (2016) “Production of periodic bars by vibrational drawing” *Steel in Translation*, vol. 46, no. 7, pp. 474–478. DOI: 10.3103/S096709121607007X.
9. Sikulskiy, V., Kashcheyeva, V., Romanenkov, Yu., Shapoval, A. (2017), “Study of the process of shape-formation of ribbed double-curvature panels by local deforming”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 4, iss. 1 (88), pp. 43–49. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.108190.
10. Dragobetskii, V., Shapoval, A., Naumova, E., Shlyk, S., Mos’pan, D., Sikulskiy, V. (2017), “The technology of production of a copper – aluminum – copper composite to produce current lead buses of the high – voltage plants”, *Mezhdunarodnaja konferencija po sovremennym jelektricheskim i jenergeticheskim sistemam*, [International conference on modern electrical and energy systems] Kremenchuk, KrNU, November 15-17, 2017, pp. 400–403.

Стаття надійшла 05.12.2017.