

УДК 621.762

DOI: 10.22213/2413-1172-2023-1-4-12

Импульсное прессование алмазосодержащих металлических материалов*

Т. М. Колосова, кандидат технических наук, доцент, Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

Е. Е. Русин, кандидат технических наук, доцент, Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева; Институт проблем машиностроения РАН, Нижний Новгород, Россия

А. А. Хлыбов, доктор технических наук, профессор, Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

Представлены результаты исследования структуры и износостойкости компактов, полученных из мелкодисперсной смеси на никелевой связке состава 70 % Ni – 25 % Cu – 5 % Fe (средний размер частиц около 50 мкм) с добавлением микропорошка алмаза зернистостью 5/3 со 100%-й условной концентрацией.

Импульсное прессование порошковых материалов проводилось с использованием модифицированного метода Кольского, позволяющего контролировать параметры нагружения и выбирать рациональные режимы компактирования порошковых материалов при длительности импульсов нагружения в диапазоне 100...400 мкс с амплитудами давления до 2000 МПа. Импульсное прессование проводилось при температуре 20 °С. В результате получены компакты с относительной плотностью более 98 %. Металлографические исследования, проведенные на микроскопе НЕОРНОТ-32, показали, что полученные компакты обладают достаточно однородной мелкозернистой структурой. Общая картина распределения пор достаточно равномерная, наблюдаемые формы пор близки к сферическим и полуправильным выпукло-вогнутым объемам. Рентгеновский микроанализ, проведенный на энергодисперсионном спектрометре в режиме сканирования по линии поверхности и поперечных шлифов полученных компактов, показал, что динамическое прессование не приводит к заметному изменению распределения элементов Ni, Cu, Fe, и C по объему образцов. Проведенные измерения микротвердости компактов показали, что динамическое прессование приводит к ее росту по сравнению с аналогичным параметром, полученным на листовых образцах после прокатки и спекания. Испытания компактов на износостойкость проводились в режиме сухого трения по схеме «вращающийся диск – неподвижный образец». Представлены зависимости потери массы компактов от времени испытания. Экспериментально установлено, что износостойкость у компактов, полученных импульсным прессованием и последующим спеканием, выше по сравнению с компактами, полученными традиционными режимами прессования и последующего спекания.

Ключевые слова: порошковая алмазосодержащая смесь, импульсное прессование, компакты, метод Кольского, износостойкость.

Введение

Порошковая металлургия представляет собой область науки и техники, направленную на разработку и создание технологий изготовления изделий из металлических порошков и композиций, содержащих, в том числе, неметаллические порошковые компоненты. Методы получения порошков хорошо развиты и известны. По свойствам частиц накоплен очень большой и достоверный экспери-

ментальный материал, создана хорошая теоретическая база для понимания их строения и свойств. Металлические порошки характеризуются своей морфологией и размером частиц. Форма и размер частиц сильно зависят от метода, используемого для их получения [1, 2]. К основным методам получения порошков можно отнести механосинтез [3, 4], химическое осаждение [5], детонационный синтез [6, 7], электролиз [8], плазмохимический метод [9]

© Колосова Т. М., Русин Е. Е., Хлыбов А. А., 2023

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН на проведение фундаментальных научных исследований на 2021–2023 гг. по теме № 0030-2021-0025.

Исследование выполнено по гранту РФФИ № 19-19-00332-П «Разработка научно обоснованных подходов и аппаратно-программных средств мониторинга поврежденности конструкционных материалов на основе подходов искусственного интеллекта для обеспечения безопасной эксплуатации технических объектов в арктических условиях».

и метод электровзрыва [10]. На образование связей между частицами во время прессования и дальнейшего спекания существенное влияние оказывают физические и химические свойства исходных порошков, что, в свою очередь, влияет на характеристики получаемых компактов [11, 12]. Качество получаемой многокомпонентной смеси определяется как соблюдением технологических режимов прессования, так и характеристиками самих порошковых компонентов: гранулометрическим составом, формой частиц, насыпной плотностью, удельной поверхностью и поверхностной энергией.

Способ прессования порошка при всех равных исходных условиях также влияет на свойства полученного компакта и имеет основное значение в формировании внутренней структуры (однородность, отсутствие пор, трещин). Методы прессования разделяют на статические [13] и динамические (импульсные) [14]. Термин «статический» предполагает, что внешнее давление, действующее на формовочную массу порошка, увеличивается постепенно с относительно низкой скоростью. Наиболее распространенным статическим методом прессования является холодное изостатическое прессование [15], которое является достаточно эффективным методом уплотнения, применимым к порошковым формовочным массам сложной формы. В динамических методах внешнее давление прикладывается в виде коротких интенсивных импульсов или ударных волн, что обеспечивает высокую скорость роста давления. К динамическим методам относятся процессы уплотнения под действием интенсивных импульсных внешних воздействий или ударных волн, генерируемых различными источниками [16]. Экспериментальные исследования процессов импульсного прессования показали, что под действием ударных нагрузок, действующих в течение короткого периода времени (в диапазоне от нескольких микросекунд до миллисекунд) происходит эффективное уплотнение порошкового материала. К основным динамическим методам можно отнести следующие: магнитно-импульсное прессование [17], взрывное прессование, вибрационное уплотнение и ультразвуковое прессование [18].

Одним из эффективных методов импульсного прессования порошковых материалов является способ, основанный на модификации методики Кольского [19, 20], позволяющий получать новые материалы с улучшенными физико-механическими характеристиками.

Порошковые композиции, в состав которых входит микропорошок алмаза, обладают уни-

кальными физико-механическими свойствами и функциональными характеристиками. Наличие таких частиц в порошковых композициях может привести к повышению прочностных характеристик материала. Алмазные инструменты используются для резки, шлифования, пиления, сверления и полировки твердых материалов: камень, бетон, оптическое стекло, керамика и другие труднообрабатываемые материалы [21]. Это связано с уникальными физико-химическими характеристиками алмаза, а именно его высокими твердостью и прочностью, а также его хорошей стойкостью к истиранию и низким тепловым расширением. Большинство алмазных инструментов представляют собой композитную структуру с частицами алмаза, встроенными в связующую матрицу. Наиболее распространенные алмазные инструменты можно разделить на три группы в зависимости от используемого связующего – металлические, стекловидные и смолистые. Алмазные инструменты с металлической связкой нашли широкое применение на практике из-за высокой прочности соединения и длительного срока службы [22]. К настоящему времени разработаны и внедрены различные технологии изготовления алмазосодержащих инструментов. При разработке технологий изготовления такого инструмента наибольшее внимание уделяется процессам прессования, спекания шихты и упрочняющей обработке связки.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование структуры и свойств компактов, полученных с использованием импульсного прессования по методике Кольского.

Прессованию подвергалась мелкодисперсная порошковая алмазосодержащая смесь на никелевой связке.

Материалы и методы исследования

Исследуемым материалом служила смесь на никелевой связке 70 % Ni – 25 % Cu – 5 % Fe (средний размер частиц около 50 мкм). В этой системе образуется тройной твердый раствор. Добавка к никелю железа и меди приводит к уменьшению области существования твердого раствора при комнатной температуре. При изменении температуры от 1220 до 20 °С предельная растворимость компонентов в тройном твердом растворе уменьшается с выделением ϵ -фазы на основе меди. В качестве алмазного наполнителя использовался алмазный синтетический микропорошок зернистостью 5/3 мк. Объемная доля алмаза составляла 25 % от связующего. Плотность алмаза $\rho_c = 3,50 \text{ г/см}^3$,

плотность железа $\rho_{Fe} = 7,874 \text{ г/см}^3$, плотность никеля $\rho_{Ni} = 8,90 \text{ г/см}^3$, плотность меди $\rho_{Cu} = 8,92 \text{ г/см}^3$. В результате теоретическая плотность порошковой смеси связки Fe + 5 % C + Ni + 70 % C, Cu + 25 % C составила $8,69 \text{ г/см}^3$.

Для динамического компактирования порошковых материалов в работе была использована модификация метода Кольского, позволяющая контролировать кинематические параметры нагружения и выбирать оптимальные режимы формования порошковых материалов при длительности импульсов нагружения в диапазоне 100...400 мкс с амплитудами давления до 2000 МПа. Эксперименты проводились на установке (рис. 1), включающей в себя нагру-

жающее устройство, два мерных стержня диаметром 20 мм каждый и комплекс регистрирующей и синхронизирующей аппаратуры. В качестве нагружающего устройства использовалась газовая пушка калибра 20 мм. Прессуемая порошковая смесь находилась в стальной высокопрочной обойме с внутренним диаметром 7 мм, размещенной между торцами мерных стержней. Измерение деформаций производилось с помощью наклеенных на боковую поверхность стержней тензорезисторов. Регистрация сигналов от тензодатчиков проводилась цифровым осциллографом TDS-2004B, данные от которого поступали для обработки на персональный компьютер.

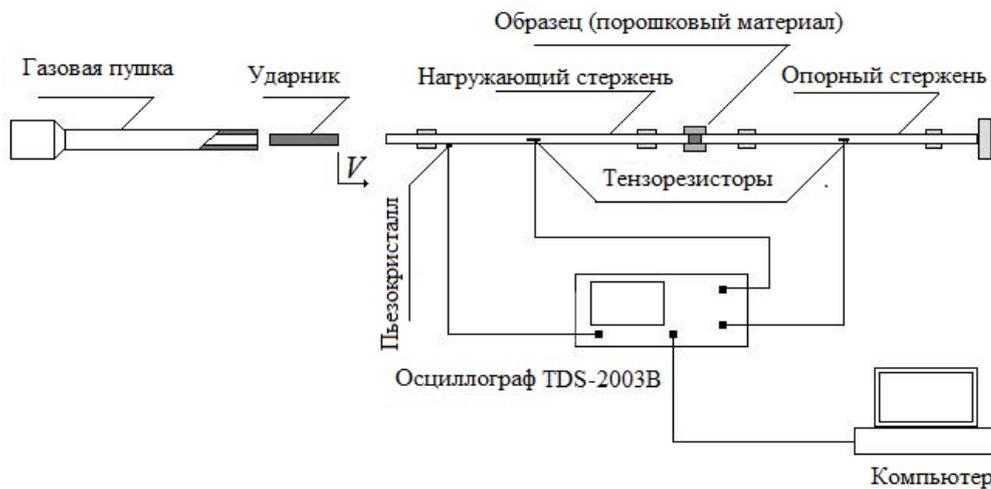


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для импульсного прессования порошковых материалов

Fig. 1. Scheme of the experimental setup for pulsed pressing of powder materials

По данным регистрации упругих импульсов деформации в стержнях определялся процесс эволюции напряжения, деформации и скорости деформации в образце:

$$\sigma_s(t) = \frac{EA}{A_s^0} \varepsilon^T(t); \quad \varepsilon_s(t) = -\frac{2C}{L_0} \int_0^t \varepsilon^R(t) dt;$$

$$\dot{\varepsilon}_s(t) = -\frac{2C}{L_0} \varepsilon^R(t).$$

Далее строилась динамическая диаграмма компактирования порошкового материала в осях $\sigma - \varepsilon$, где $\varepsilon^I(t)$, $\varepsilon^R(t)$ и $\varepsilon^T(t)$ – соответственно, падающий, отраженный и прошедший импульсы деформации в мерных стержнях; C – скорость упругих волн в стержнях; E и A – модуль Юнга и площадь поперечного сечения мерных стержней; L_0 – начальная длина образца.

Рассмотренная экспериментальная установка позволяет варьировать скорость деформации

в широком диапазоне. В экспериментах ударники разгоняются до различных скоростей, причем для обеспечения достаточной степени деформации при меньших скоростях используются ударники с большей длиной. Перед проведением эксперимента порошки Ni, Fe, Cu и C смешивались следующим образом. К смеси порошков ($\approx 40...50 \text{ г}$) добавляли $\approx 80 \text{ г}$ химически чистого ацетона и обрабатывали суспензию в ультразвуковой ванне в течение 20 мин. Затем ацетон выпаривали в сушильном шкафу при температуре $50...60 \text{ }^\circ\text{C}$. Перед импульсным компактированием одиночным импульсом сжатия порошковый материал подвергался предварительному статическому сжатию.

Полученные результаты

Проведен цикл экспериментов по динамическому прессованию порошковой смеси на никелевой связке состава 70 % Ni – 25 % Cu – 5 % Fe с добавлением синтетического алмазного мик-

ропорошка при температуре 20 °С с одинаковыми кинематическими условиями нагружения, которые были определены экспериментально: длительность импульса давления ≈ 350 мкс, амплитуда ≈ 1600 МПа. Для создания таких параметров использовался ударник из стали 30ХГСА длиной 400 мм, разгоняемый до скорости

20...21 м/с. Проведено пять экспериментов. В каждом эксперименте регистрировались скорость ударника в момент контакта с первым стержнем, а также импульсы деформации в мерных стержнях, по которым строились диаграммы динамического прессования исследуемого порошка (рис. 2, *a*, *b*).

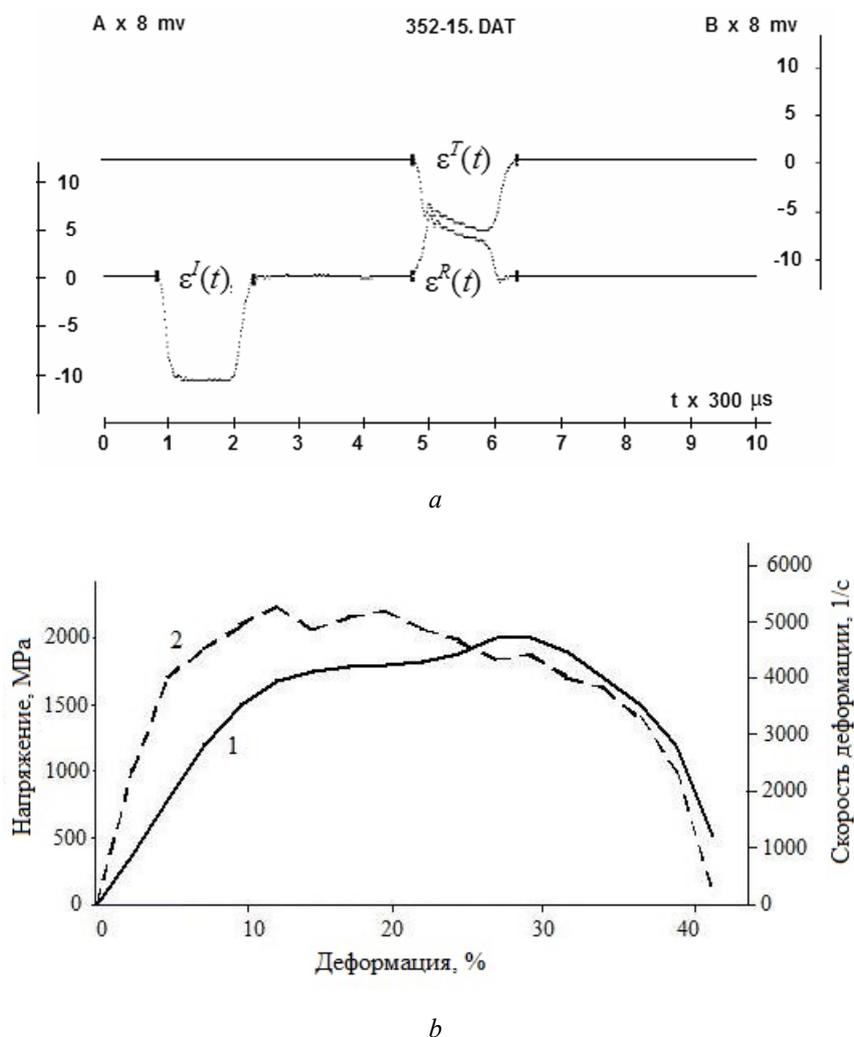


Рис. 2. Импульсы деформации $\epsilon^I(t)$, $\epsilon^R(t)$, $\epsilon^T(t)$ в мерных стержнях *a* и диаграмма прессования порошковой смеси *b*: 1 – зависимость «напряжение – деформация»; 2 – зависимость «скорость деформация – деформация»

Fig. 2. Deformation impulses $\epsilon^I(t)$, $\epsilon^R(t)$, $\epsilon^T(t)$ in measuring rods *a* and powder mixture pressing diagram *b*: 1 - dependence “stress-strain”; 2 - dependence “strain-strain rate”

В результате проведенных экспериментов были получены цилиндрические компакты диаметром 7,0 мм и высотой 3,1...3,3 мм. Плотность компактов определялась путем измерения массы и объема компакта. Объем вычислялся методом гидростатического взвешивания. После однократного импульсного формования компакты подвергались спеканию при температуре $T_c = 800$ °С в течение 3 ч. Уплотнение порошковой смеси под действием приложенной импульсной нагрузки реализуется как за счет вза-

имного перемещения частиц компонентов порошковой смеси, так и за счет пластической деформации частиц никеля, меди и железа. Сначала порошковая смесь уплотняется в основном за счет высоких пластических свойств порошков связки. На этой стадии прессования порошковой смеси процесс характеризуется тем, что наибольший вклад в уплотнение дает взаимное перемещение частиц Ni, Cu, Fe и заполнение мелкими частицами алмаза промежутков между частицами связки. На завершающей стадии

процесса прессования уплотнение происходит, в основном, за счет пластической деформации частиц связки. В конечном итоге, на финальном этапе прессования, происходит полная утрата пластических свойств частиц порошкового материала и деформация прекращается. Дальнейшее увеличение приложенной нагрузки не может оказать влияние на величину пороговой плотности порошкового тела. Для дальнейшего увеличения плотности необходимо изменение пластических свойств материала частиц формируемой среды.

Проведенный микроструктурный анализ образцов после компактирования и спекания показал, что полученные компакты обладают доста-

точно однородной мелкозернистой структурой, общая картина распределения пор равномерная, форма пор, в основном, близка к сферической и к ряду полуправильных выпукло-вогнутых объемов. На рисунке 3 представлена микроструктура листового алмазосодержащего материала (а) и структура той же порошковой смеси после импульсного прессования (b). Структура полученных компактов характеризуется более мелкими зернами вытянутой формы. Результаты рентгеновского микроанализа полученных компактов (рис. 4) показали, что динамическое компактирование не приводит к заметному изменению распределения элементов Ni, Fe, Cu и C по объему компактов.

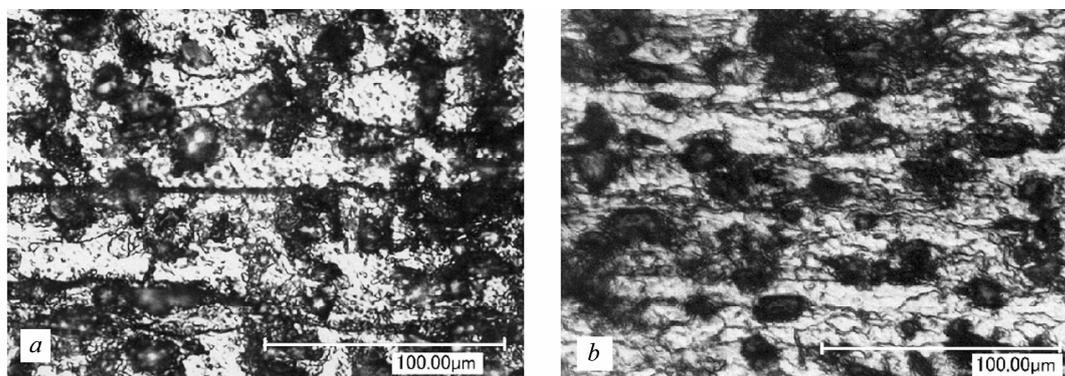


Рис. 3. Структура листового материала 70 % Ni – 25 % Cu – 5 % Fe с добавлением микропорошка алмаза зернистостью 5/3 после прокатки и спекания (а) и после импульсного прессования (b)

Fig. 3. The structure of sheet 70% Ni – 25% Cu – 5% Fe with the addition of diamond micropowder with a grain size of 5/3 after rolling and sintering (a) and after impulse pressing (b)

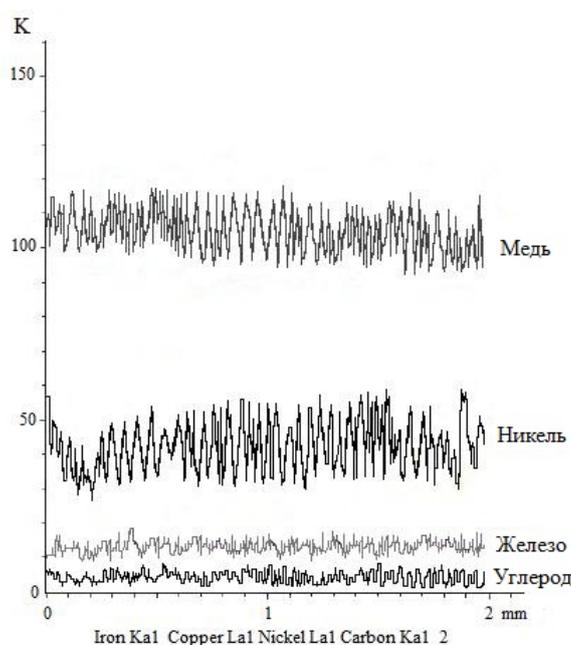


Рис. 4. Распределение элементов Ni, Cu, Fe, C в тонком поверхностном слое компактов после импульсного компактирования и спекания

Fig. 4. Distribution of elements Ni, Cu, Fe, C in a thin surface layer of compacts after pulsed compaction and sintering

Измерение микротвердости поверхности компактов проводилось с помощью стандартного микротвердомера ПМТ-3 вдоль диаметра компакта с шагом 0,5 мм. На рисунке 5 представлено распределение микротвердости на поверхности компактов. Значения микротвердости в центральной области компактов оказались выше, чем в зоне сопряжения компакта со стенкой матрицы. По-видимому, это может быть связано с тем, что градиенты напряжения в процессе импульсного прессования приводят к различной деформации и градиентам плотности внутри прессуемого порошкового компакта, что, в свою очередь, влияет на трение порошка о стенки и межчастичное взаимодействие.



Рис. 5. Распределение микротвердости на поверхности компактов из смеси состава 70 % Ni – 25 % Cu – 5 % Fe с добавлением микропорошка алмаза зернистостью 5/3 со 100%-й условной концентрацией, полученных методом импульсного компактирования

Fig. 5. Distribution of microhardness on the surface of compacts from a mixture of composition 70% Ni – 25% Cu – 5% Fe with the addition of diamond micropowder with a grain size of 5/3 with 100% conditional concentration, obtained by the method of impulse compaction

Для оценки износостойкости полученных компактов были проведены исследования на испытательном стенде в режиме сухого трения по схеме «вращающийся диск – неподвижный образец» при комнатной температуре. Вращающийся диск толщиной 4 мм и диаметром 40 мм был изготовлен из стали ХВГ, подвергнутой неполной закалке и низкому отпуску. Полученная структура мартенсита и избыточных карбидов (легированный цементит) обеспечила ей высокую твердость (62...65 HRC) и высокую износостойкость. Шероховатость боковой поверхности диска составляла $R_a = 1,6$ мкм; фиксированная нормальная нагрузка в зоне контакта – 25 Н; продолжительность испытания – 2 ч при постоянной частоте вращения диска 50 об/мин и соответствующей скорости скольжения 0,146 м/с. Суммарный путь трения соста-

вил 1051,2 м. Измерение потери массы образцов в процессе износа проводилось с интервалом 30 мин путем их взвешивания с точностью 0,001 г на аналитических весах Sartorius Cubis II. Перед каждым взвешиванием компакты тщательно промывались химически чистым ацетоном.

Результаты исследования износостойкости полученных компактов представлены на рисунке 6.

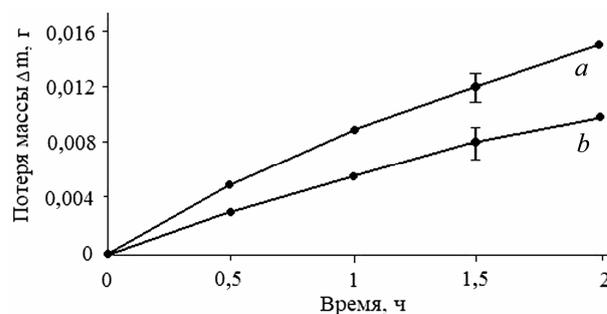


Рис. 6. Зависимость потери массы алмазосодержащей ленты, полученной из смеси состава 70 % Ni – 25 % Cu – 5 % Fe с добавлением микропорошка алмаза зернистостью 5/3 со 100%-й условной концентрацией (a) и компактов из той же порошковой смеси, полученных методом импульсного компактирования (b) от времени испытания

Fig. 6. The dependence of the mass loss of a diamond-containing tape obtained from a mixture of composition 70% Ni - 25% Cu - 5% Fe with the addition of diamond micropowder with a grain size of 5/3 with 100% conditional concentration (a) and compacts from the same powder mixture obtained by the pulsed compaction (b) from test time

Представленные на рисунке 6 экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что износостойкость полученных компактов выше, чем у листовых материалов, примерно в 1,5 раза.

Выводы

Применение модифицированной методики Кольского для импульсного компактирования порошковых алмазосодержащих смесей показало высокую эффективность. Установлено, что импульсное прессование и последующее спекание исследованной порошковой смеси приводит к достижению относительной плотности полученных компактов более 98 % при температуре прессования 20 °С.

Проведенные металлографические исследования структуры полученных компактов показали, что импульсное прессование приводит к формированию совершенной мелкозернистой структуры за счет увеличения площади ювенильной поверхности, а также способствует активации этих поверхностей и формированию

металлической связи в зоне контакта частиц порошка связки, что приводит к росту плотности и микротвердости компактов. Кроме того, импульсное прессование оказывает влияние на увеличение износостойкости компактов в условиях сухого трения по сравнению с традиционной технологией получения листовых алмазосодержащих материалов. Экспериментально установлено, что максимальная износостойкость компактов превышает аналогичный параметр у листовых алмазосодержащих материалов. Применение импульсного прессования алмазосодержащих материалов на основе никеля позволяет достичь достаточно высокой микротвердости и плотности образцов уже после однократного нагружения и последующего спекания.

Библиографические ссылки

1. Saheb S.H., Durgam V.K., Chandrashekhara A. (2020) A review on metal powders in additive manufacturing. Third International Conference on Inventive Material Science Applications: ICIMA. DOI: 10.1063/5.0026203.
2. Кубанова А. Н., Гвоздев А. Е. История развития порошковой металлургии и ее применение в современных технологиях // Чебышевский сборник. 2021. Т. 22. Вып. 2. С. 437–448. DOI: 10.22405/2226-8383-2021-22-2-437-448.
3. Витязь П. А., Ильющенко А. Ф., Савич В. В. Порошковая металлургия в Беларуси и мировые тенденции развития // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2019. № 1. С. 98–106. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2019-1-98-106.
4. Challapalli Suryanarayana (2019) Mechanical Alloying: A Novel Technique to Synthesize Advanced Materials Review Article. *Research Volume, Article ID 4219812*, 17 p. <https://doi.org/10.34133/2019/4219812>.
5. Zhang X., Wan K., Subramanian P., Xu M., Luo J., Fransaer J. (2020) Electrochemical deposition of metal-organic framework films and their applications. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, 8 (16), 7569–7587. DOI: 10.1039/d0ta00406e.
6. Kashkarov A.O., Prueel E.R., Ten K.A., Gerasimov E.Yu., Kremenko S.I., Rubtsov I.A., Dashapilov G.R., Pyrjaev P.A., Moroz B.L. (2019) Detonation synthesis of non-agglomerated metallic nanoparticles deposited on carbon supports. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1147, 012037. DOI: 10.1088/1742-6596/1147/1/012037.
7. Сравнение морфологических и структурных характеристик частиц нанопорошков, полученных измельчением природного алмаза и методом детонационного синтеза / П. П. Шарин, А. В. Сивцева, С. П. Яковлева, М. М. Копырин, С. А. Кузьмин, В. И. Попов, Л. А. Никифоров // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2019. № 4. С. 55–67. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2019-4-55-67.
8. Nebojša D. Nikolić, Vesna M. Maksimović, Ljiljana Avramović (2021) Correlation of Morphology and Crystal Structure of Metal Powders Produced by Electrolysis Proc. *Metals*. DOI: 10.3390/met11060859.
9. Samokhin A.V., Alekseev N.V., Astashov A.G., Kirpichev D.E., Fadeev A.A., Sinaiskiy M.A., & Tsvetkov Y.V. (2019) Synthesis and processing of powder materials in DC arc thermal plasma. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1393, 012126. DOI: 10.1088/1742-6596/1393/1/012126.
10. Pervikov B.A., Toropkov N., Kazantsev S., Bakina O.V., Glazkova E., Lerner M. (2021) Preparation of Nano/Micro Bimodal Aluminum Powder by Electrical Explosion of Wires. *Materials*, 14 (21), 6602. <https://doi.org/10.3390/ma14216602>.
11. Huang X., Lang L., Wang G., & Alexandrov S. (2018) Effect of Powder Size on Microstructure and Mechanical Properties of 2A12Al Compacts Fabricated by Hot Isostatic Pressing. *Advances in Materials Science and Engineering*, 1-7. DOI: 10.1155/2018/1989754.
12. Композиционные плакированные порошки для нанесения защитных покрытий / Е. Ю. Геращенко, Бобкова Т. И., Самоделкин Е. А., Фармаковский Б. В. *Вопросы материаловедения*. 2019. № 1 (97). С. 59–64. <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2019-97-1-59-64>.
13. Usama M. Attia (2021) Cold-isostatic pressing of metal powders: a review of the technology and recent developments. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2021, vol. 46, Iss. 6. DOI: org/10.1080/10408436.2021.1886043.
14. Polyakov A.P. (2018) Dynamic powder compaction processes. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2018, no. 2, pp. 42-82. DOI: 10.17804/2410-9908.2018.2.042-082.
15. Grigoriev C.N., Dmitriev A.M., Korobova N.V., Fedorov S.V. (2019). A Cold-Pressing Method Combining Axial and Shear Flow of Powder Compaction to Produce High-Density Iron Parts. *Technologies*, 7 (4), 70. DOI: 10.3390/technologies7040070.
16. Bai Yu, Li Lei, Leijie Fu, Wang Qiangfeng (2021) A review on high velocity compaction mechanism of powder metallurgy. *Science Progress*, 2021, 104 (2), 1-20. DOI: 10.1177/00368504211016945.
17. Olevsky E.A., & Dudina D.V. (2018). Magnetic Pulse Compaction. *Field-Assisted Sintering*, 2018, 293-313. DOI: 10.1007/978-3-319-76032-2_9.
18. Meshalkin V.P. and Belyakov A.V. (2020) Methods Used for the Compaction and Molding of Ceramic Matrix Composites Reinforced with Carbon Nanotubes. *Processes*, 2020, 8 (8), 1004. <https://doi.org/10.3390/pr8081004>.
19. Брагов А. М., Родионов С. Н., Русин Е. Е. Использование метода Кольского для исследования процессов импульсного прессования порошковых материалов // *Письма в журнал технической физики*. 2004. № 30 (21). С. 10–15. DOI: 10.1134/1.1829133

20. Bragov A.M., Igumnov L.A., Konstantinov A.Y., Lomunov A.K., Rusin E.E., Eremyev V.A. (2020) Experimental analysis of wear resistance of compacts of fine-dispersed iron powder and tungsten monocarbide-nanopowder produced by impulse pressing. *Wear*, 2020, 456-457, 203358.

21. Rajczyk Marlena, Rajczyk Pawel (2019) Elements of Diamond Tools Development Used in the Technology of Building Materials Processing. *IOP Conference Series, Materials Science and Engineering*, 2019, 471, 052072. DOI: 10.1088/1757-899X/471/5/052072.

22. Artini C., Muolo M.L., Passerone Alberto (2021) Diamond-metal interfaces in cutting tools. *Journal of Materials Science*, 2021, 47 (7), 3252-3264. DOI: 10.1007/s10853-011-6164-6.

References

1. Saheb S.H., Durgam V.K., Chandrashekhar A. (2020) A review on metal powders in additive manufacturing. Third International Conference on Inventive Material Science Applications: ICIMA. DOI: 10.1063/5.0026203.

2. Kubanova A.N., Gvozdev A.E. (2021) [History of powder metallurgy development and its application in modern technologies]. *Chebyshevskii Sbornik*, 2021, vol. 22, no. 2, pp. 437-448 (in Russ.) DOI: 10.22405/2226-8383-2021-22-2-437-448.

3. Vityaz P.A., Ilyuschenko A.F., Savich V.V. (2019) [Powder metallurgy in Belarus and global development trends]. *Izvestija vuzov. Poroshkovaja metallurgija i funkcional'nye pokrytija*, 2019, no. 1, pp. 98-106 (in Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2019-1-98-106.

4. Challapalli Suryanarayana (2019) Mechanical Alloying: A Novel Technique to Synthesize Advanced Materials Review Article. *Research Volume, Article ID 4219812*, 17 p. <https://doi.org/10.34133/2019/4219812>.

5. Zhang X., Wan K., Subramanian P., Xu M., Luo J., Fransaer J. (2020) Electrochemical deposition of metal-organic framework films and their applications. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, 8 (16), 7569-7587. DOI: 10.1039/d0ta00406e.

6. Kashkarov A.O., Pruel E.R., Ten K.A., Gerasimov E.Yu., Kremenko S.I., Rubtsov I.A., Dashpilov G.R., Pyrjaev P.A., Moroz B.L. (2019) Detonation synthesis of non-agglomerated metallic nanoparticles deposited on carbon supports. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1147, 012037. DOI: 10.1088/1742-6596/1147/1/012037.

7. Sharin P.P., Sivtseva A.V., Yakovleva S.P., Kopyrin M.M., Kuzmin S.A., Popov V.I., Nikiforov L.A. (2019) [Comparison of morphological and structural characteristics of nanopowder particles obtained by natural diamond grinding and detonation synthesis]. *Izvestija vuzov. Poroshkovaja metallurgija i funkcional'nye pokrytija*, 2019, no. 4, pp. 55-67 (in Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2019-4-55-67.

8. Nebojša D. Nikolić, Vesna M. Maksimović, Ljiljana Avramović. (2021) Correlation of Morphology and

Crystal Structure of Metal Powders Produced by Electrolysis Proc. *Metals*, 2021. DOI: 10.3390/met11060859.

9. Samokhin A.V., Alekseev N.V., Astashov A.G., Kirpichev D.E., Fadeev A.A., Sinaiskiy M.A., & Tsvetkov Y.V. (2019) Synthesis and processing of powder materials in DC arc thermal plasma. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1393, 012126. DOI: 10.1088/1742-6596/1393/1/012126.

10. Pervikov B.A., Toropkov N., Kazantsev S., Bakina O.V., Glazkova E., Lerner M. (2021) Preparation of Nano/Micro Bimodal Aluminum Powder by Electrical Explosion of Wires. *Materials*, 2021, 14 (21), 6602. <https://doi.org/10.3390/ma14216602>.

11. Huang X., Lang L., Wang G., & Alexandrov S. (2018) Effect of Powder Size on Microstructure and Mechanical Properties of 2A12Al Compacts Fabricated by Hot Isostatic Pressing. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, 1-7. DOI: 10.1155/2018/1989754.

12. Gerashchenkova E.Yu., Bobkova T.I., Samodelkin E.A., Farmakovskiy B.V. (2019) [Composite cladded powders for spraying of protective coatings]. *Voprosy Materialovedeniya*, 2019, no. 1 (97), pp. 59-64 (in Russ.). <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2019-97-1-59-64>

13. Usama M. Attia (2021) Cold-isostatic pressing of metal powders: a review of the technology and recent developments. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2021, vol. 46, Iss. 6. DOI: org/10.1080/10408436.2021.1886043.

14. Polyakov A.P. (2018) Dynamic powder compaction processes. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2018, 2, 42-82. DOI: 10.17804/2410-9908.2018.2.042-082.

15. Grigoriev C.N., Dmitriev A.M., Korobova N.V., Fedorov S.V. (2019). A Cold-Pressing Method Combining Axial and Shear Flow of Powder Compaction to Produce High-Density Iron Parts. *Technologies*, 7 (4), 70. DOI: 10.3390/technologies7040070.

16. Bai Yu, Li Lei, Leijie Fu, Wang Qiangfeng (2021) A review on high velocity compaction mechanism of powder metallurgy. *Science Progress*, 2021, no. 104 (2), pp. 1-20. DOI: 10.1177/00368504211016945.

17. Olevsky E.A., & Dudina D.V. (2018) Magnetic Pulse Compaction. *Field-Assisted Sintering*, 2018, 293-313. DOI: 10.1007/978-3-319-76032-2_9.

18. Meshalkin V.P. and Belyakov A.V. (2020) Methods Used for the Compaction and Molding of Ceramic Matrix Composites Reinforced with Carbon Nanotubes. *Processes*, 2020, 8 (8), 1004. <https://doi.org/10.3390/pr8081004>

19. Bragov A.M., Rodionov S.N., Rusin E.E. (2004). [Pulsed pressing of powdered materials studied using the Kolsky method]. *Pis'ma v zhurnal tehnichej fiziki*, 2004, vol. 30, No. 11, pp. 892-893 (in Russ.). DOI: 10.1134.1.1829133.

20. Bragov A.M., Igumnov L.A., Konstantinov A.Y., Lomunov A.K., Rusin E.E., Eremyev V.A. (2020) Experimental analysis of wear resistance of compacts of fine-dispersed iron powder and tungsten monocarbide-

nanopowder produced by impulse pressing. *Wear*, 2020, 456-457, 203358.

21. Rajczyk Marlena, Rajczyk Pawel (2019) Elements of Diamond Tools Development Used in the Technology of Building Materials Processing. *IOP Conference Series, Materials Science and Engineering*,

2019, 471, 052072. DOI: 10.1088/1757-899X/471/5/052072.

22. Artini C., Muolo M.L., Passerone Alberto (2021) Diamond-metal interfaces in cutting tools: A review. *Journal of Materials Science*, 2021, 47 (7), 3252-3264. DOI: 10.1007/s10853-011-6164-6.

Impulse Pressing of Diamond-Containing Metal Materials

N.M. Kolosova, PhD in Engineering, Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

E.E. Rusin, PhD in Engineering, Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev, Institute of Mechanical Engineering Problems, RAS, Nizhny Novgorod, Russia

A.A. Khlybov, DSc in Engineering, Professor, Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

The results of a study of the structure and wear resistance of compacts obtained from a finely dispersed mixture on a nickel bond of composition 70% Ni - 25% Cu - 5% Fe (average particle size about 50 μm) with the addition of micropowder diamond with a grain size of 5/3 with a 100% reference concentration were presented.

Impulsed pressing of powder materials was carried out using a modified Kolsky method, which makes it possible to control the loading parameters and choose rational modes of powder material compaction with loading pulse durations in the range of 100–400 μs with pressure amplitudes up to 2000 MPa. Impulse pressing was carried out at a temperature of 20 °C. As a result, compacts with relative density of more than 98

% were obtained. Metallographic studies carried out on a NEOPHOT-32 microscope showed that the resulting compacts have a fairly uniform fine-grained structure. The overall pattern of pore distribution is quite uniform, the observed pore shapes are close to spherical and semiregular convex-concave volumes. X-ray microanalysis carried out on an energy-dispersive spectrometer in the mode of scanning along the surface line and transverse sections of the obtained compacts showed that dynamic pressing does not lead to a noticeable change in the distribution of the elements Ni, Cu, Fe, and C over the sample volume. The measurements of the microhardness of compacts showed that dynamic pressing leads to its growth, compared with the same parameter obtained on sheet samples after rolling and sintering. The compacts were tested for wear resistance in the dry friction mode according to the “rotating disk - stationary sample” scheme. The relationships of the mass loss of compacts and the test time are presented. It has been experimentally established that the wear resistance of compacts obtained by impulse pressing and subsequent sintering is higher compared to compacts obtained by traditional modes of pressing and subsequent sintering.

Keywords: diamond-containing powder mixture, impulse pressing, compacts, Kolsky method, wear resistance.

Получено 12.01.2023

Образец цитирования

Колосова Т. М., Русин Е. Е., Хлыбов А. А. Импульсное прессование алмазосодержащих металлических материалов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2023. Т. 26, № 1. С. 4–12. DOI: 10.22213/2413-1172-2023-1-4-12.

For Citation

Kolosova N.M., Rusin E.E., Khlybov A.A. [Impulse Pressing of Diamond-Containing Metal Materials]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2023, vol. 26, no. 1, pp. 4-12 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2023-1-4-12.