



УДК 621.762

<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-5-55-65>Научная статья
Research article

Исследование характеристик режущих пластин из твердого сплава WC–5TiC–10Co, полученных с применением пластиковой формы, изготовленной методом 3D-печати

М. И. Дворник, Е. А. Михайленко , А. А. Бурков, Е. В. ЧерняковИнститут материаловедения Хабаровского федерального исследовательского центра
Дальневосточного отделения РАН

Россия, 680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 153

 mea80@list.ru

Аннотация. Были изготовлены режущие пластины из твердого сплава WC–5TiC–10Co спеканием заготовок, спрессованных в пластиковой форме, полученной из полилактида на 3D-принтере методом послойной наплавки. Исследовано влияние давления прессования и содержания пластификатора (каучука) в порошковой смеси на плотность заготовок. С повышением давления прессования от 50 до 200 МПа плотность заготовок возрастает только на 2–6 %. При увеличении концентрации пластификатора в порошковой смеси с 1 до 6 % происходит повышение плотности заготовок на 28–32 %. Установлено, что значения плотности заготовок режущих пластин, получаемых в пластиковой пресс-форме, незначительно отличаются от плотности стандартных заготовок, получаемых в стальной пресс-форме. После спекания в вакуумной печи при температуре 1450 °С были исследованы плотность, содержание углерода, пористость, микроструктура, шероховатость поверхности, твердость и вязкость разрушения всех спеченных режущих пластин, стандартных образцов и коммерческого аналога. Показано, что формирование свободного углерода в результате разложения каучука приводит к снижению плотности готовых изделий, а следовательно, и их твердости. Относительная плотность (98,7 %) режущей пластины, полученной в пластиковой пресс-форме при давлении прессования 50 МПа из порошка, содержащего 1 % каучука, превышает плотность коммерческой режущей пластины (98,5 %). Полученная режущая пластина имеет высокие твердость (1400 HV) и вязкость разрушения (13,5 МПа·м^{1/2}). Изготовленная режущая пластина из сплава WC–5TiC–10Co не уступает по скорости износа по задней грани коммерческой пластине из твердого сплава T5K10 при точении стальной заготовки.

Ключевые слова: режущая пластина, прессование, твердый сплав, 3D-печать, пресс-форма, полилактид

Благодарности: Исследование проведено при поддержке гранта РФФИ № 23-29-00063.

Для цитирования: Дворник М.И., Михайленко Е.А., Бурков А.А., Черняков Е.В. Исследование характеристик режущих пластин из твердого сплава WC–5TiC–10Co, полученных с применением пластиковой формы, изготовленной методом 3D-печати. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия.* 2024;18(5):55–65.

<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-5-55-65>

Investigation of the properties of WC–5TiC–10Co cutting inserts produced using a 3D-printed plastic mold

M. I. Dvornik, E. A. Mikhailenko , A. A. Burkov, E. V. Chernyakov

Institute of Materials Science of the Khabarovsk Federal Research Center
of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
153 Tikhookeanskaya Str., Khabarovsk 680042, Russia

✉ me80@list.ru

Abstract. Cutting inserts made from the WC–5TiC–10Co hard alloy were produced by sintering blanks that were pressed in a plastic mold made from polylactide on a 3D printer using a layer-by-layer deposition method. The effect of pressing pressure and plasticizer (rubber) content in the powder mixture on the density of the blanks was studied. As the pressing pressure increased from 50 to 200 MPa, the density of the blanks rose by only 2–6 %. When the plasticizer concentration in the powder mixture increased from 1 to 6 %, the blank density increased by 28–32 %. It was found that the density values of the cutting insert blanks obtained in a plastic mold differed only slightly from those of standard blanks produced in a steel mold. After sintering in a vacuum furnace at 1450 °C, the density, carbon content, porosity, microstructure, surface roughness, hardness, and fracture toughness of all the sintered cutting inserts, standard samples, and the commercial equivalent were investigated. It was shown that the formation of free carbon as a result of rubber decomposition leads to a decrease in the density of the finished products, and therefore, their hardness. The relative density (98.7 %) of the cutting insert produced in the plastic mold at a pressing pressure of 50 MPa from powder containing 1 % rubber exceeded the density of the commercial cutting insert (98.5 %). The obtained cutting insert demonstrated high hardness (1400 HV) and fracture toughness (13.5 MPa·m^{1/2}). The cutting insert made from the WC–5TiC–10Co alloy is not inferior to the commercial T5K10 hard alloy insert in terms of flank wear rate during turning of a steel workpiece.

Keywords: cutting insert, pressing, hard alloy, 3D printing, mold, polylactide

Acknowledgements: This research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-29-00063.

For citation: Dvornik M.I., Mikhailenko E.A., Burkov A.A., Chernyakov E.V. Investigation of the properties of WC–5TiC–10Co cutting inserts produced using a 3D-printed plastic mold. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2024;18(5):55–65. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-5-55-65>

Введение

Для металлообработки широко применяют твердые сплавы на основе WC и TiC [1]. Получение твердосплавных изделий в промышленности основано на спекании заготовок, полученных холодным прессованием в стальных или твердосплавных пресс-формах, которые обеспечивают необходимую плотность и высокую точность, обладают высокой производительностью и большим ресурсом, но ограничены в форме получаемых изделий и требуют высоких затрат на свое изготовление. Для получения твердосплавных изделий сложной формы из конструкционных материалов в последнее время используют аддитивные технологии [2–4], однако связанные с ними проблемы требуют решения. Так, получение твердосплавных изделий с высокой плотностью методом селективного лазерного спекания осложняется изменением химического состава [4–15], а заготовки для спекания, полученные струйной 3D-печатью (BJ) [4; 16–23], методом послойного наплавления (FFF) [24] и гелевой 3D-печатью (3DGP) [25; 26], обладают пониженной плотностью из-за отсутствия давления.

Альтернативным методом является применение пластиковых форм, изготовленных на 3D-принтере, для шликерного литья заготовок деталей из твердого сплава и керамики, спекаемых в дальнейшем обычными методами [27; 28]. При использовании этих методов нужно значительно увеличивать объемную долю пластификатора (выше 50 об. %). При удалении пластификатора из заготовок возникают поры, что снижает плотность получаемых описанными методами изделий. Исследования показали, что твердосплавные заготовки образцов WC–15Co можно получать прессованием при давлении до 120 МПа в пластиковые формы, изготовленные методом послойного наплавления [29]. Полученные образцы сплава по плотности и характеристикам не отличаются от образцов, получаемых прессованием в обычных стальных пресс-формах. Для расширения возможностей применения метода необходимо увеличить круг применяемых материалов и условий прессования.

Цель работы состояла в исследовании влияния концентрации пластификатора и давления прессования (до 200 МПа) в пластиковых формах на плотность, микроструктуру, твердость и вязкость разрушения получаемых режущих пластин из твердого

сплава WC–5TiC–10Co и сравнении эксплуатационной износостойкости полученного образца и коммерческого аналога.

Методика исследования

Для определения влияния концентрации пластификатора и давления прессования на свойства изготовленных опытных образцов было получено 200 г порошка WC–5TiC–10Co путем смешивания порошков производства Кировградского завода твердых сплавов (КЗТС) – WC (73,3 %, WC3), (Ti,W)C (16,7 %, TWC3) и Co (10 %, ПК1У) в мельнице РМ-400 (Retsch, Германия) в течение 120 мин при скорости 350 об/мин. Соотношение масс шаров и порошка составило 3:1. После смешивания порошок разделили на 4 равные части, в каждую из которых добавили 1, 2, 4 и 6 мас. % каучука в виде раствора. Полученные смеси прессовали после сушки и гранулирования.

Пластиковая форма для прессования заготовок режущей пластины SNUM-120408 (рис. 1, в) изготовлена из полилактида (PLA, производство компании

«Bestfilament», г. Томск) по технологии послойного наплавления на 3D-принтере (Flash Forge Dreamer, Китай). Заполнение составило 100 %, толщина первого слоя – 0,27 мм, а остальных слоев – 0,1 мм. Температура печати равна 200 °С. Прочность при сжатии, модуль Юнга и коэффициент Пуассона пластика по результатам испытаний составляли 70 МПа, 1,54 ГПа и 0,38 соответственно [29; 30]. Были изготовлены пластиковая матрица, толкатели и 16 одноразовых тонких пуансонов и подкладок толщиной 2 мм, которые относительно легко отделяются от заготовок при небольшом подогреве. Для обеспечения в пресс-форме высокого (до 200 МПа) давления прессования использовали стальную оболочку, стальной стержень и стальной толкатель (рис. 1, б, в).

Из каждой партии порошка были спрессованы в пластиковых пресс-формах по 4 образца массой 8 г каждый при давлениях 50, 100, 150 и 200 МПа и по одной прямоугольной заготовке размерами 24×8×8 мм в стальной пресс-форме при давлении 200 МПа для сравнения характеристик. Всего было получено 20 различных образцов (рис. 1, д). После прессования определяли плотность полученных

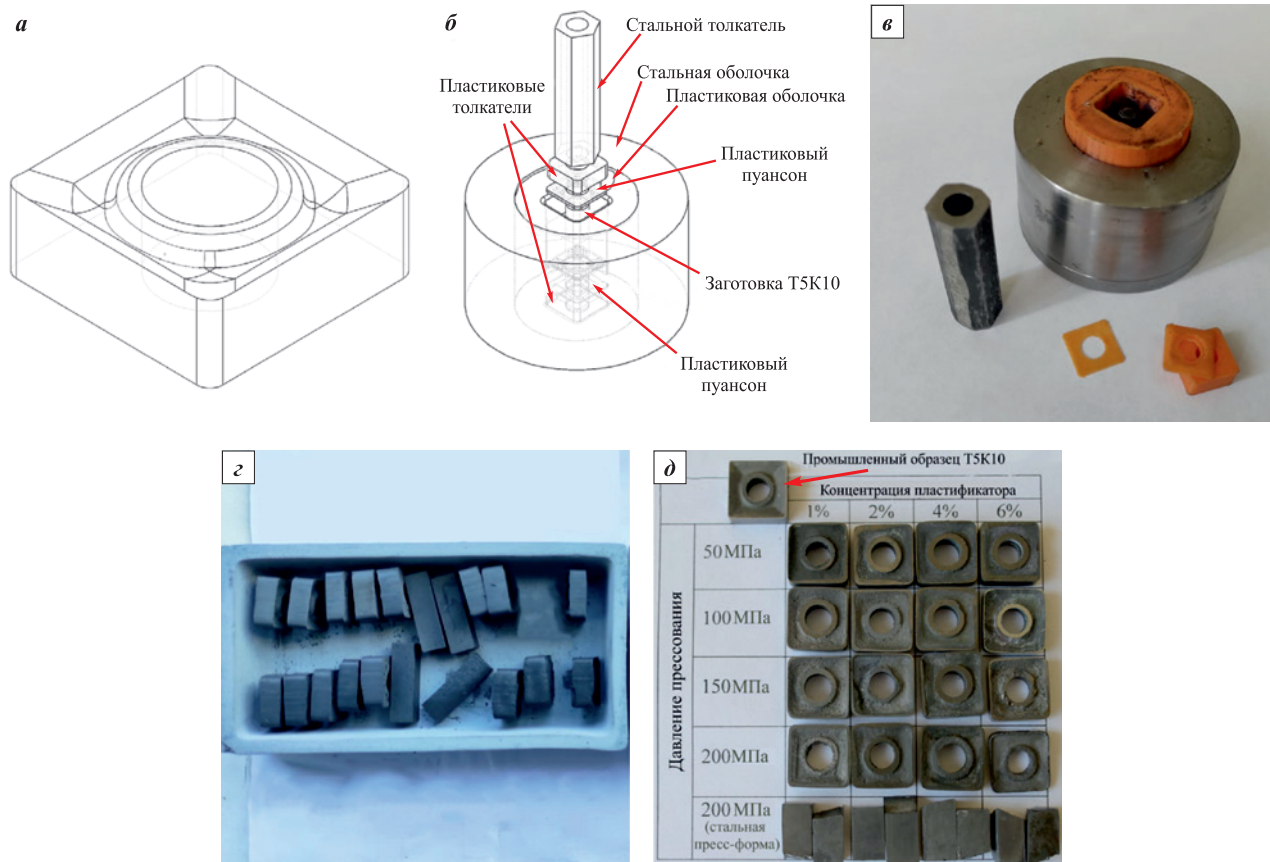


Рис. 1. 3D-модель реза (а), схема пресс-формы (б), пресс-форма (в), заготовки после прессования (з), спеченные образцы и коммерческая режущая пластина T5K10 (д)

Fig. 1. 3D model of the cutter (a), mold diagram (b), mold (v), blanks after pressing (z), sintered samples and commercial T5K10 cutting insert (d)

заготовок. Спекали заготовки после удаления пластификатора (рис. 1, *з*) при максимальной температуре 1450 °С. После спекания образцы шлифовали и полировали для исследования их микроструктуры. Определяли твердость, вязкость разрушения, прочность (только прямоугольных образцов) и проводили испытания эксплуатационной износостойкости при точении стали 45 режущей пластины, полученной при давлении прессования 50 МПа из смеси порошка с 1 % каучука, и коммерческой пластины SNUM-120408 из сплава T5K10 производства КЗТС.

Прессование и испытание пуансонов и спеченных образцов проводили на испытательном прессе ИП-250М (ООО «ЗИПО», г. Армавир) при скорости нагружения 0,5 кН/с. Усилие прессования для достижения давлений 50, 100, 150 и 200 МПа рассчитывали с учетом площади пуансона (191 мм²) и силы трения о стенки матрицы (11 % от усилия). Плотность порошковых прессовок и спеченных образцов определяли гидростатическим взвешиванием на весах «Vibra» (Shinko, Япония). Относительные плотности порошковых прессовок и спеченных образцов рассчитывали исходя из известных значений плотности сплава WC–5TiC–10Co (12,95 г/см³) и каучука (0,9 г/см³). Удаление пластификатора и спекание проводили в вакуумной печи «Carbolite STF» (Carbolite gero, Великобритания). Испытания на прочность прямоугольных образцов осуществляли по стандартной методике (ISO 3327:2009). Концентрацию углерода в порошках определяли на анализаторе EMIА 320V2 (Horiba Ltd., Япония) после удаления из них пластификатора при нагревании вместе с другими образцами. Исследовали микроструктуру спеченных твердосплавных изделий на микроскопах: оптическом (Альтами, г. Санкт-Петербург) и сканирующем электронном (Tescan Orsay Holding, Чехия). Средний диаметр зерен рассчитывали по стандартной методике (ASTM E112-13). Твердость по Виккерсу всех образцов определяли на твердомере HVS-50 (Time Group Inc., Китай) (погрешность 2 %) при нагрузке $P = 294$ Н. Вязкость разрушения (K_{Ic}) рассчитывали по общей длине трещин (Σl) от индентора твердомера по схеме Палмквиста (ISO 28079) при нагрузке $P = 294$ Н по уравнению Шетти:

$$K_{Ic} = 0,0028 \sqrt{HV \frac{P}{\Sigma l}}. \quad (1)$$

Эксплуатационные характеристики полученной режущей пластины (1 % каучука, давление 50 МПа) и коммерческой вставки определяли при черновом точении (скорость резания 100 ± 10 м/мин, глубина 1,5 мм, подача 0,2 мм/об, время 3,5 мин, путь 330 м) и чистовом (скорость резания 125 ± 15 м/мин, глубина 0,2 мм, подача 0,05 мм/об, время 10,5 мин, путь

1320 м) цилиндрической заготовки диаметром от 50 до 60 мм из стали 45 на токарном станке 16К20 (завод «Красный пролетарий», г. Москва). Профиль задних поверхностей режущих вставок и стальных заготовок исследовали с помощью профилометра Tr-200 (Time Group Inc., Китай).

Результаты и их обсуждение

Выявленная способность пуансонов из полилактида выдерживать при прессовании давление 70 МПа, превышающее предел прочности данного материала, объясняется тем, что, согласно критерию Мизеса, под такой нагрузкой результирующее эквивалентное напряжение уменьшается из-за наличия второго и третьего главных напряжений внутри стальной оболочки (рис. 1, *б, в*). К тому же трение о стенки матрицы пуансона и толкателя приводит к снижению (на 11 ± 5 %) давления на заготовку. Зависимости относительной плотности заготовок (ρ) от давления (P) (рис. 2, *а*) хорошо описываются известной закономерностью [31]:

$$\rho = A + B \ln P. \quad (2)$$

Параметр B характеризует скорость роста плотности при увеличении давления. Так, с ростом давления прессования от 50 до 200 МПа плотность заготовок повышается на 2–6 % для разных концентраций пластификатора (рис. 2, *а*) в полном согласии с закономерностью (2). Относительно маленький прирост плотности при увеличении давления должен предотвращать неравномерное распределение плотности при прессовании заготовок. Коэффициент A в уравнении (2) показывает величину плотности, получаемую на начальной стадии прессования при относительно маленьком давлении, которая зависит от содержания пластификатора и других параметров смеси. Относительная плотность заготовок, получаемых при давлении 50 МПа, возрастает с 62 до 95 % при повышении концентрации пластификатора с 1 до 6 % (рис. 2, *б*).

Увеличение доли пластификатора с 1 до 6 % приводит к росту плотности заготовок на 28–32 % при различных давлениях прессования (рис. 2, *б*), что значительно больше, чем прирост плотности при повышении давления прессования (рис. 2, *а*). Плотность всех полученных заготовок превысила (на 20–45 %) плотность заготовок, изготовленных 3D-печатью другими методами [19; 21–23; 28; 32]. Это связано, в первую очередь, с тем, что при 3D-печати прямую уплотнение происходит под воздействием только гравитации и силы поверхностного натяжения. На рис. 2, *а, б* видно, что плотность заготовок, получаемых в стальной пресс-форме при давлении

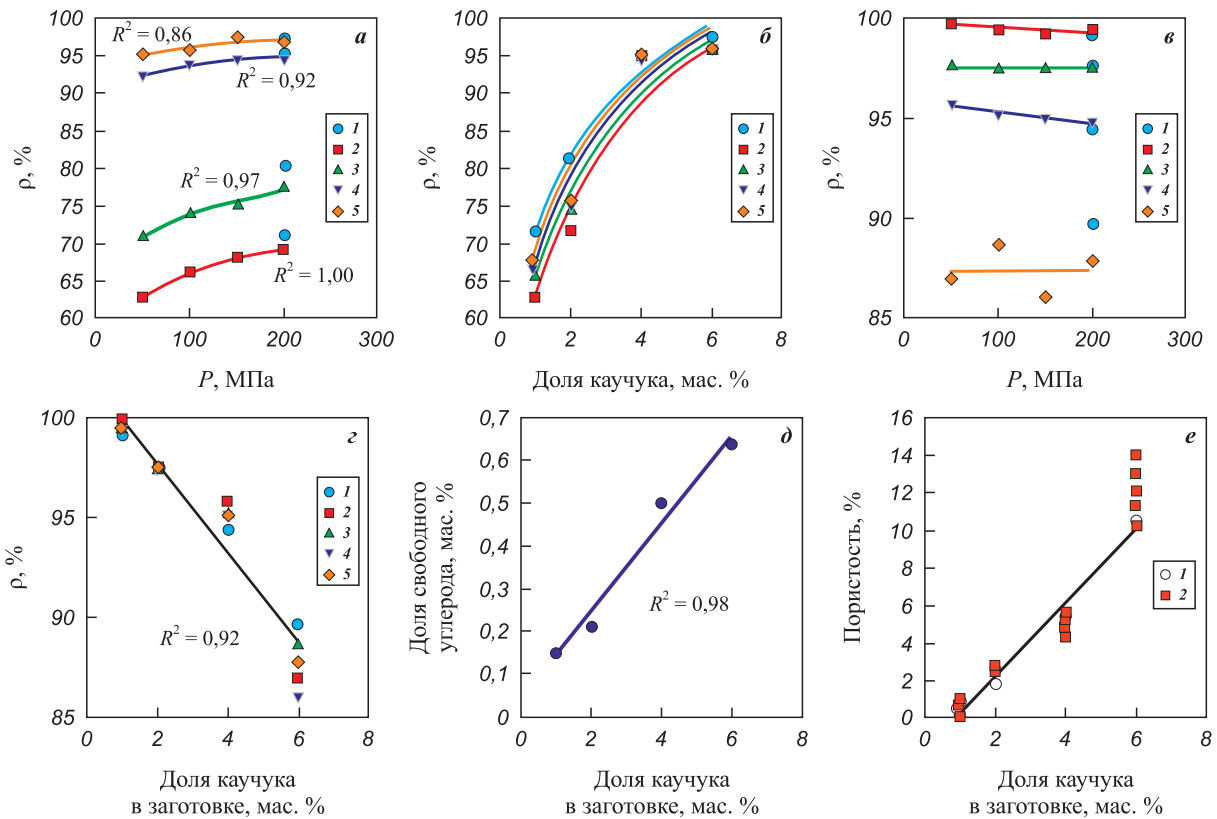


Рис. 2. Зависимость плотности прессовок (а, б) и спеченных образцов (в, з) от давления (а, в) и концентрации каучука (б, з).
 Зависимость концентрации свободного углерода (д) и пористости (е) спеченных образцов от концентрации каучука в заготовке

а, в: 1 – стальная пресс-форма; 2–5 – PLA-форма; 2 – 1 % каучука, 3 – 2 %, 4 – 4 %, 5 – 6 %
 б, з: 1 – стальная пресс-форма, 2–5 – PLA-форма; P, МПа – 50 (2), 100 (3), 150 (4), 200 (1, 5)
 е: 1 – расчетное значение, 2 – анализ микроструктуры

Fig. 2. Dependence of the density of compacts (а, б) and sintered samples (в, з) on pressure (а, в) and rubber concentration (б, з).
 Dependence of free carbon concentration (д) and porosity (е) of sintered samples on the rubber concentration of in the blank

а, в: 1 – stell mold; 2–5 – PLA mold; 2 – 1 % rubber, 3 – 2 %, 4 – 4 %, 5 – 6 %
 б, з: 1 – stell mold, 2–5 – PLA mold; P, МПа – 50 (2), 100 (3), 150 (4), 200 (1, 5)
 е: 1 – calculated value, 2 – microstructure analysis

200 МПа, не отличается от плотности заготовок, получаемых в пластиковой пресс-форме при тех же значениях давления и содержания пластификатора.

Для спеченных образцов установлено, что изменение давления прессования практически не влияет на их плотность (рис. 2, в). Повышение концентрации каучука от 1 до 6 % приводит к снижению плотности получаемых изделий с 99,3–99,8 до 86,0–88,6 % (рис. 2, з), что обусловлено увеличением концентрации свободного углерода, который образуется при разложении каучука. Анализы показали, что доля свободного углерода в спеченных образцах линейно возрастает с 0,15 до 0,64 % при повышении концентрации каучука в заготовках от 1 до 6 % (рис. 2, д) – это соответствует образованию ~0,1 % свободного углерода на 1 % каучука. Рост пористости полученных образцов хорошо коррелирует с увеличением содержания свободного углерода (рис. 2, е), т.е. поры, обнаруживаемые в микроструктуре, на самом

деле являются включениями свободного углерода. Значения пористости, полученные в результате анализа их доли в площади поверхности микроструктур (рис. 3, а–д), точно так же укладываются в данную закономерность (рис. 2, е). Следует отметить, что относительная плотность (99,8 %) образца, полученного при давлении прессования 50 МПа порошка, содержащего 1 % каучука, равна плотности коммерческой режущей пластины (99,8 %).

Спеченные образцы также не уступают по относительной плотности наилучшим образцам сплавов WC–Co с содержанием кобальта до 15 %, получаемым методами SLM и SLS напрямую (плотности, %: 96 [5], 96,1 [11], 97,3 [16], 92,4 [17], 98 [33], 97,4 [34]). Наблюдается некоторое отставание по относительной плотности от образцов, получаемых спеканием заготовок, изготовленных методами BJ (100 % [23], 100 % [24]) и FFF (>99 % [35]). Учитывая, что плотность заготовок, получаемых методами BJ и FFF

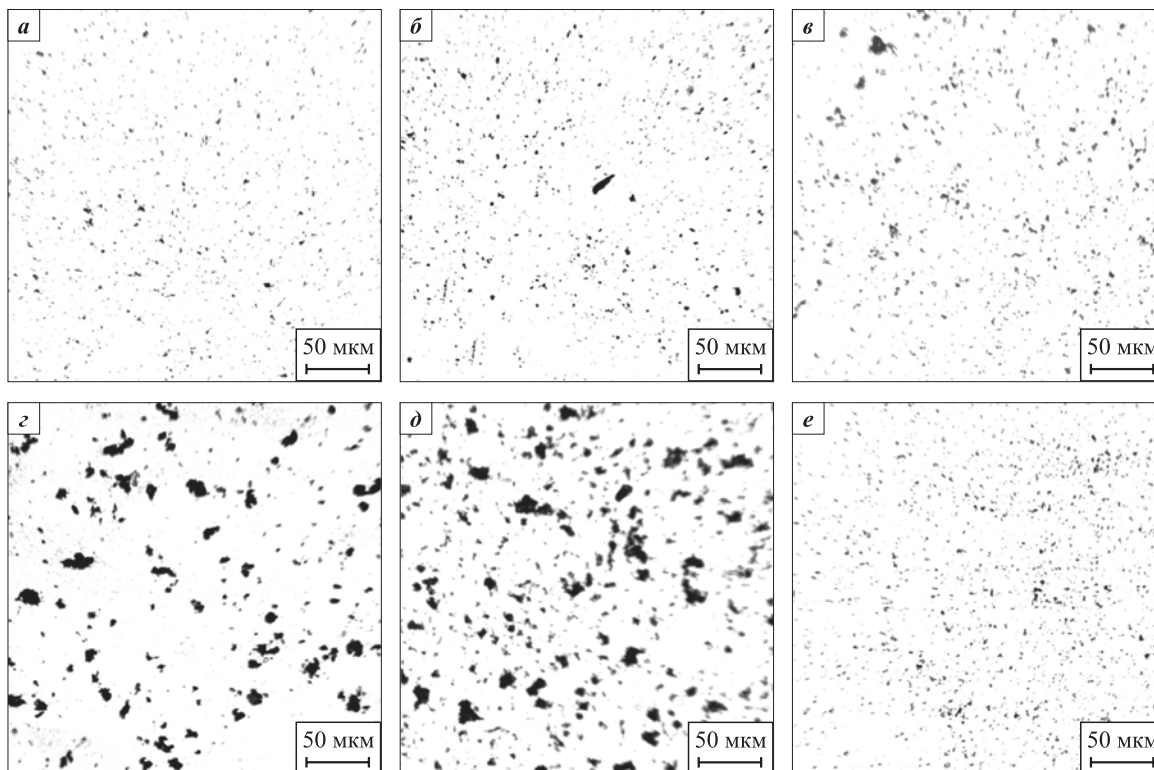


Рис. 3. Микроструктуры образцов, спеченных после прессования при давлении 50 МПа (а, в–д) и 200 МПа (б) при различном содержании пластификатора и микроструктура коммерческого образца (е)

Доля каучука, мас. % – 1 (а, б), 2 (в), 4 (з), 6 (д)

Fig. 3. Microstructures of samples sintered after pressing at pressing at 50 MPa (a, в–д) and 200 MPa (б) with varying plasticizer content, and the microstructure of the commercial sample (e)

Rubber content, wt. % – 1 (a, б), 2 (в), 4 (з), 6 (д)

(20–45 %), значительно ниже плотности заготовок, полученных в данном исследовании (65–95 %) (рис. 2, а, б), то можно предположить, что причинами небольшого отставания по плотности у полученных спеченных образцов (1 %) являются меньшая спекаемость сплава WC–TiC–Co по сравнению со сплавами WC–Co и менее прогрессивная методика спекания (LPS).

Проекция полученной и коммерческой режущих вставок похожи друг на друга (рис. 4, а, з). Поверхность пластины, спеченной после прессования в пластиковой пресс-форме, отличается наличием характерных следов слоев, полученных при 3D-печати. Кроме того, на микроструктуре полученного образца имеются дефекты, образованные при отделении пластикового пуансона от заготовки. Боковая поверхность не содержит таких дефектов. На шлифе не видно крупных дефектов, которые отличали бы полученный образец (рис. 4, б) от коммерческого аналога (рис. 4, д). Анализ микроструктур показал, что полученный образец (рис. 4, в) отличается большим размером карбидных зерен (средний диаметр зерен WC $d_{cp} = 1,26$ мкм) по сравнению с коммерческим аналогом (рис. 4, е) ($d_{cp} = 0,88$ мкм).

Можно ожидать, что и остальные образцы отличаются большим средним диаметром зерен.

Твердость полученных после прессования в пластиковой пресс-форме образцов увеличивается с 1010 до 1400 HV при повышении их плотности с 85,0 до 98,7 % (рис. 5, а). Измерения показали, что вязкость разрушения этих образцов мало зависит от их плотности (рис. 5, б). На представленных зависимостях (рис. 5, а, б) видно, что коммерческая режущая пластина обладает более высокой твердостью (1450 ± 10 HV) и меньшей вязкостью разрушения ($12,1 \pm 0,4$ МПа·м^{1/2}). По результатам анализа спеченных образцов, полученных прессованием в стальной пресс-форме, их прочность возрастает при увеличении плотности (рис. 5, в).

Измерения профиля режущих вставок (рис. 6) показали, что шероховатость экспериментального резца оказалась ожидаемо выше, чем коммерческой режущей пластины (см. таблицу), из-за наличия на поверхности заготовки микронеровностей, полученных в процессе прессования. Такие неровности образуются из-за адгезии пластика к заготовке и в результате копирования неровностей пластиковых деталей пресс-формы, образованных после 3D-печати.

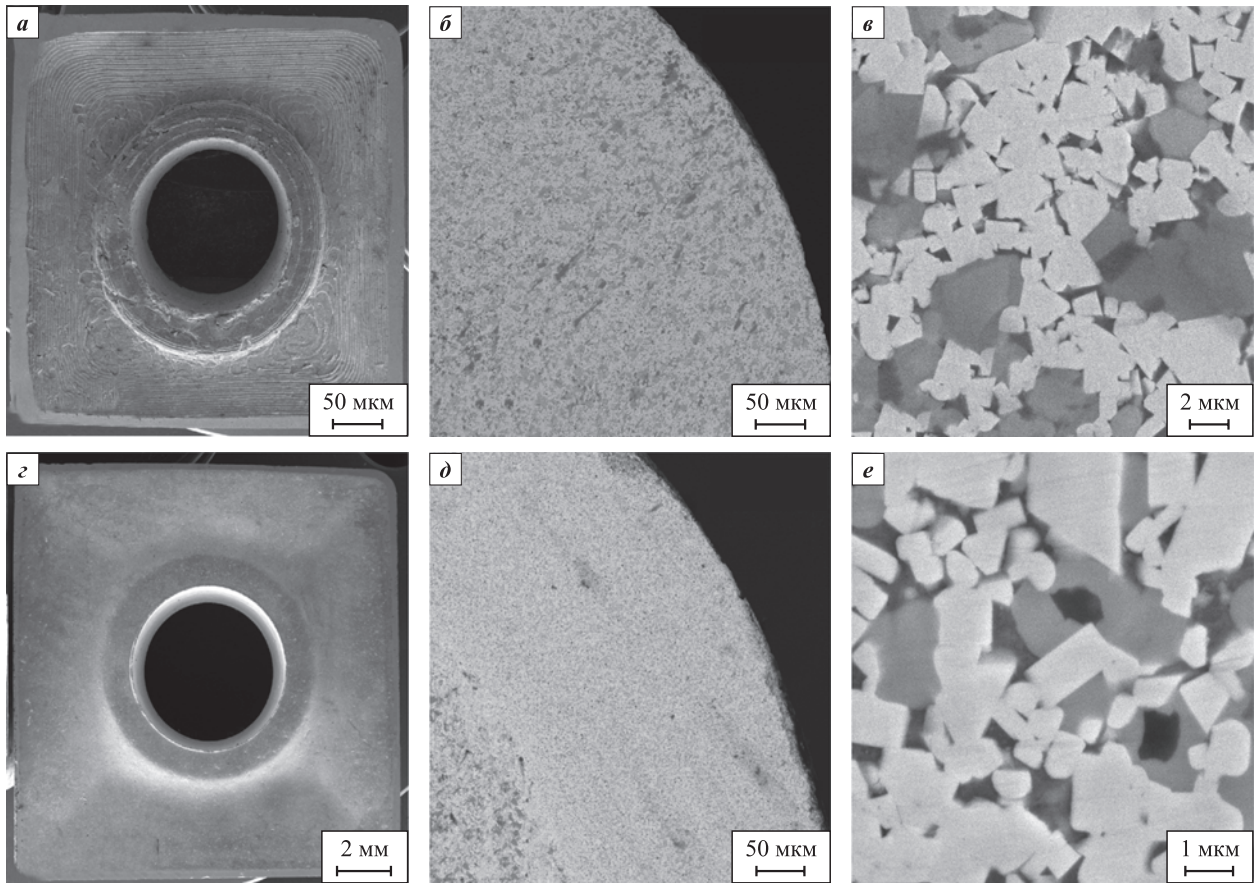


Рис. 4. Макроструктуры (а, з) и микроструктуры (б, в, д, е) твердосплавной вставки WC–5TiC–10Co (а–в), спеченной после прессования порошка в пластиковой пресс-форме ($P = 50$ МПа, 1 % каучука), и коммерческой режущей пластины SNUM 120408 из сплава T5K10 (з–е)

Fig. 4. Macrostructures (a, z) and microstructures (b, v, d, e) of the WC–5TiC–10Co hard alloy insert (a–v) sintered after pressing the powder in a plastic mold ($P = 50$ MPa, 1 % rubber), and the commercial cutting insert SNUM 120408 made from T5K10 alloy (z–e)

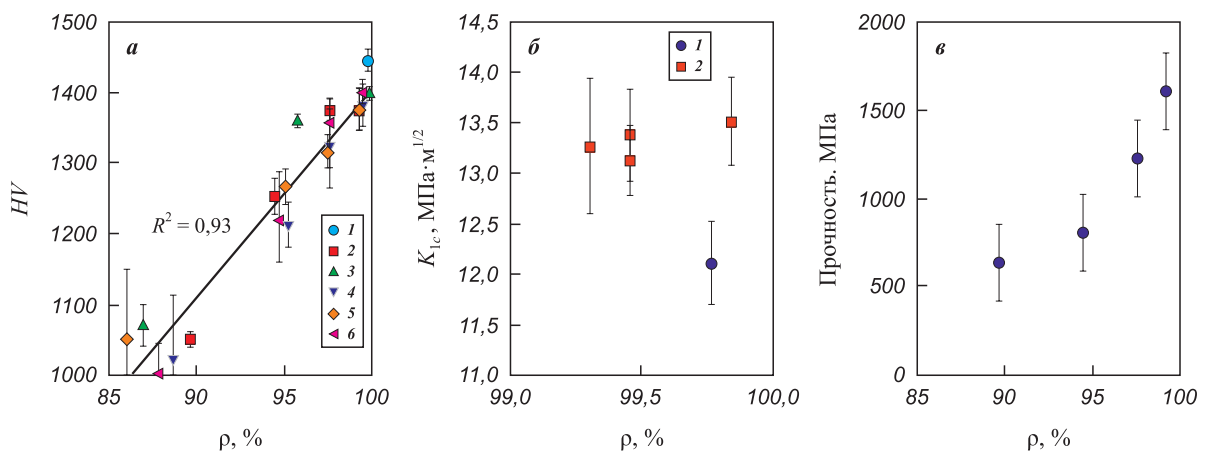


Рис. 5. Зависимость твердости (а), вязкости разрушения (б) и прочности (в) полученных образцов от их плотности
 а: 1 – коммерческая пластина T5K10; 2 – стальная пресс-форма; 3–6 – PLA-форма
 P , МПа: 200 (2), 50 (3), 100 (4), 150 (5), 200 (6)
 б: 1 – коммерческая пластина T5K10; 2 – экспериментальные образцы

Fig. 5. Dependence of hardness (a), fracture toughness (b), and strength (v) of the obtained samples on their density
 а: 1 – commercial T5K10 insert; 2 – steel mold; 3–6 – PLA form
 P , MPa: 200 (2), 50 (3), 100 (4), 150 (5), 200 (6)
 б: 1 – commercial T5K10 insert; 2 – experimental samples

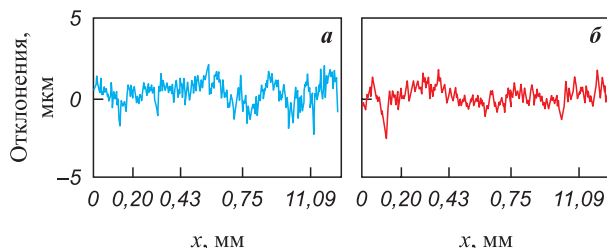


Рис. 6. Профиль боковой поверхности экспериментальной (б) и коммерческой (а) режущих пластин

Fig. 6. Profile of the side surface of the experimental (b) and the commercial (a) cutting inserts

Твердость и шероховатость оказывают основное влияние на эксплуатационные характеристики экспериментальной (рис. 7, а, б) и коммерческой (рис. 7, в, г) режущих вставок из материалов одного и того же состава при черновом (рис. 7, а, в) и чистовом (рис. 7, б, г) точении. Из-за повышенной шероховатости и пониженной твердости экспериментальной режущей вставки шероховатость деталей после чернового и чистового точения экспериментальным резцом оказалась на 5–7 % больше, чем в случае обработки коммерческой вставкой (см. таблицу).

Результаты испытания режущих пластин при точении стали 45

Results of testing cutting inserts when turning steel 45

Образец	Шероховатость задней поверхности вставки R_a , мкм	Шероховатость детали, R_a , мкм		Износ по задней границе, мкм	
		после чернового точения	после чистового точения	после чернового точения	после чистового точения
Экспериментальный	$0,64 \pm 0,08$	$3,90 \pm 0,43$	$2,34 \pm 0,23$	101	149
Коммерческий	$0,55 \pm 0,10$	$3,68 \pm 0,18$	$2,19 \pm 0,19$	96	141

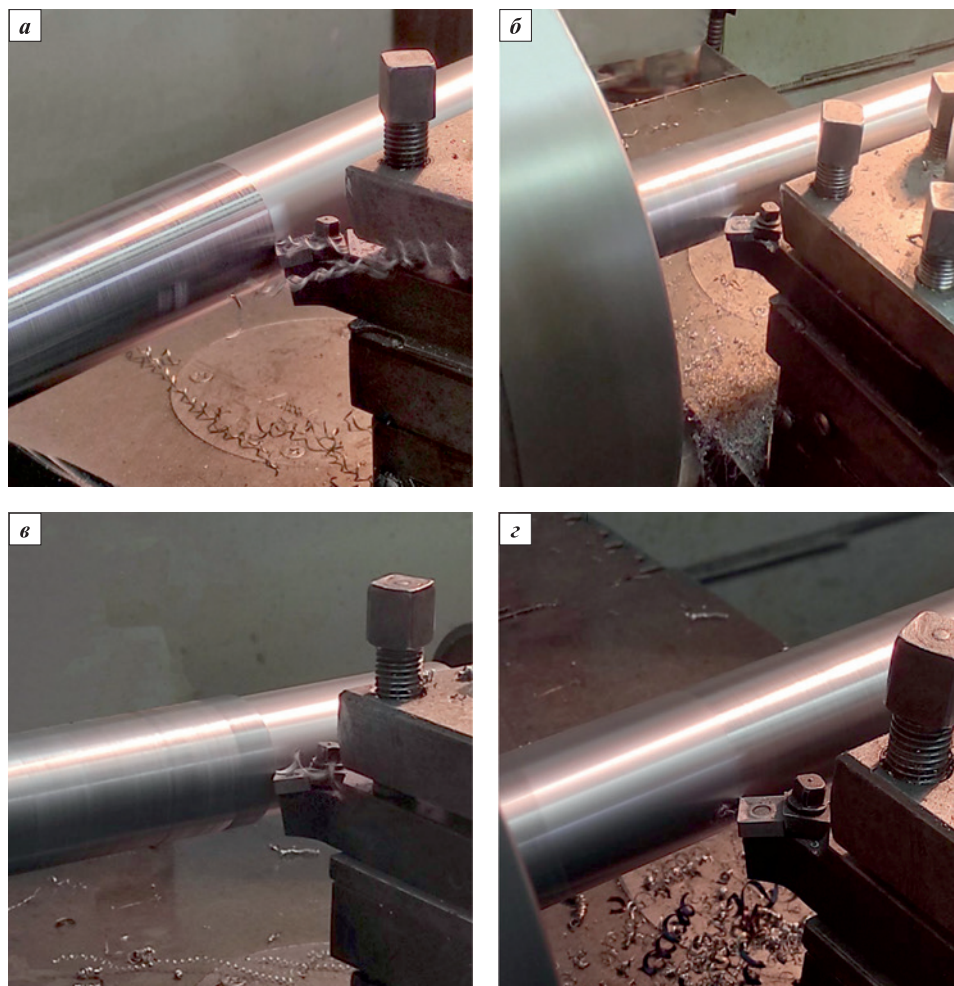


Рис. 7. Черновое (а, в) и чистовое (б, г) точение экспериментальной (а, б) и коммерческой (в, г) режущих пластин

Fig. 7. Rough (a, v) and finishing (b, g) turning using the experimental (a, b) and a commercial (v, g) cutting insert

Адгезионный износ режущих пластин из сплава WC–5TiC–10Co при точении углеродистой стали, когда образуется сливная стружка (рис. 7, а, в), превалирует над остальными видами износа. При таком износе основное влияние оказывает состав режущих пластин, который в данном случае одинаков, поэтому отличия в твердости имеют меньшее значение. Величина износа экспериментальной режущей вставки по задней грани при черновом и чистовом точении оказалась на 5–6 % больше, чем при точении коммерческим аналогом. В данном случае основной причиной являлось отличие в твердости.

Заключение

Экспериментально подтверждено, что использование пресс-формы из полилактида, изготовленной аддитивным методом и дополненной стальными оболочкой и толкателем, позволяет прессовать твердосплавные заготовки при давлении до 200 МПа. Плотность полученных прессованием в таких формах заготовок режущих вставок из WC–5TiC–10Co мало отличается от плотности заготовок, полученных в стальных пресс-формах при том же давлении. При увеличении давления прессования рост плотности заготовок незначителен (2–6 %) по сравнению с ростом их плотности (28–32 %) при повышении концентрации пластификатора в исходной порошковой смеси.

На плотность спеченных режущих пластин давление прессования заготовок не оказывает заметного влияния. При увеличении концентрации пластификатора (с 1 до 6 %) происходит повышение концентрации свободного углерода (с 0,15 до 0,64 %), обуславливающее снижение относительной плотности образцов, их твердости и прочности. Режущие пластины, полученные из порошка WC–5TiC–10Co, содержащего 1 % пластификатора, не отличаются по плотности и пористости от коммерческих вставок T5K10. Они обладают меньшей твердостью (1400 ± 10 HV) и большей вязкостью разрушения ($13,5 \pm 0,4$ МПа·м^{1/2}) по сравнению с коммерческими образцами (1447 ± 15 HV и $12,1 \pm 0,4$ МПа·м^{1/2}) из такого же сплава из-за большего среднего диаметра зерен WC. Скорость износа экспериментальной режущей вставки на 5–7 % выше, чем у коммерческого резца из-за меньшей твердости и большей шероховатости.

Список литературы / References

1. Анисименко Г.Е., Лопатин Ю.М. Новые твердые сплавы для сменных многогранных пластин. *Обработка металлов (Технология, оборудование, инструменты)*. 2008;4(41):25–33.
2. Anisimenko G.E., Lopatin Yu.M. New hard alloys for indexable multifaceted inserts. *Obrabotka metallov (Tekhnologii, oborudovanie, instrumenty)*. 2008;4(41):25–33. (In Russ.).
3. Aramian A., Razavi N., Sadeghian Z., Berto F. A review of additive manufacturing of cermets. *Additive Manufacturing*. 2020;33:101130. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101130>
4. Yang Y., Zhang C., Wang D., Nie L., Wellmann D., Tian Y. Additive manufacturing of WC–Co hardmetals: A review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020;108:1653–1673. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05389-5>
5. Chen C., Huang B., Liu Z., Li Y., Zou D., Liu T., Chang Y., Chen L. Additive manufacturing of WC–Co cemented carbides: Process, microstructure, and mechanical properties. *Additive Manufacturing*. 2023:10341. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103410>
6. Chen J., Huang M., Fang Z.Z., Koopman M., Liu W., Deng X., Zhao Z., Chen S., Wu S., Liu J., Qi W., Wang Z. Microstructure analysis of high density WC–Co composite prepared by one step selective laser melting. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2019;84:104980. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2019.104980>
7. Li C.W., Chang K.C., Yeh A.C. On the microstructure and properties of an advanced cemented carbide system processed by selective laser melting. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019;782:440–450. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.12.187>
8. Gu D., Meiners W. Microstructure characteristics and formation mechanisms of in situ WC cemented carbide based hardmetals prepared by Selective Laser Melting. *Materials Science and Engineering: A*. 2010;527(29–30):7585–7592. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.08.075>
9. Domashenkov A., Borbély A., Smurov I. Structural modifications of WC/Co nanophased and conventional powders processed by selective laser melting. *Materials and Manufacturing Processes*. 2017;32(1):93–100. <https://doi.org/10.1080/10426914.2016.1176195>
10. Fortunato A., Valli G., Liverani E., Ascari A. Additive manufacturing of WC–Co cutting tools for gear production. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*. 2019;6:247–262. <https://doi.org/10.1007/s40516-019-00092-0>
11. Khmyrov R.S., Shevchukov A.P., Gusarov A.V., Tarasova T.V. Phase composition and microstructure of WC–Co alloys obtained by selective laser melting. *Mechanics & Industry*. 2017;18(7):714. <https://doi.org/10.1051/meca/2017059>
12. Ku N., Pittari III J.J., Kilczewski S., Kudzal A. Additive manufacturing of cemented tungsten carbide with a cobalt-free alloy binder by selective laser melting for high-hardness applications. *Journal of the Minerals, Metals and Materials Society (JOM)*. 2019;71(4):1535–1542. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03366-2>
13. Zhang L., Hu C., Yang Y., Misra R.D.K., Kondoh K., Lu Y. Laser powder bed fusion of cemented carbides by developing a new type of Co coated WC composite powder. *Additive Manufacturing*. 2022;55:102820. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102820>

13. Suzuki A., Shiba Y., Ibe H., Takata N., Kobashi M. Machine-learning assisted optimization of process parameters for controlling the microstructure in a laser powder bed fused WC/Co cemented carbide. *Additive Manufacturing*. 2022;59:103089.
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103089>
14. Maurya H.S., Kosiba K., Juhani K., Sergejev F., Prashanth K.G. Effect of powder bed preheating on the crack formation and microstructure in ceramic matrix composites fabricated by laser powder-bed fusion process. *Additive Manufacturing*. 2022;58:103013.
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103013>
15. Padmakumar M. Additive manufacturing of tungsten carbide hardmetal parts by selective laser melting (SLM), selective laser sintering (SLS) and binder jet 3D printing (BJ3DP) techniques. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*. 2020;7(3):338–371.
<https://doi.org/10.1007/s40516-020-00124-0>
16. Mostafaei A., De Vecchis P.R., Kimes K.A., Elhassid D., Chmielus M. Effect of binder saturation and drying time on microstructure and resulting properties of sinter-HIP binder-jet 3D-printed WC–Co composites. *Additive Manufacturing*. 2021;46:102128.
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102128>
17. Mariani M., Goncharov I., Mariani D., De Gaudenzi G.P., Popovich A., Lecis N., Vedani M. Mechanical and microstructural characterization of WC–Co consolidated by binder jetting additive manufacturing. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2021;100:105639.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2021.105639>
18. Cramer C.L., Wieber N.R., Aguirre T.G., Lowden R.A., Elliott A.M. Shape retention and infiltration height in complex WC–Co parts made via binder jet of WC with subsequent Co melt infiltration. *Additive Manufacturing*. 2019;29:100828.
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100828>
19. Cramer C.L., Nandwana P., Lowden R.A., Elliott A.M. Infiltration studies of additive manufacture of WC with Co using binder jetting and pressureless melt method. *Additive Manufacturing*. 2019;28:333–343.
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.04.009>
20. Enneti R.K., Prough K.C., Wolfe T.A., Klein A., Studley N., Trasorras J.L. Sintering of WC–12%Co processed by binder jet 3D printing (BJ3DP) technology. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2018;71:28–35.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2017.10.023>
21. Kim H., Kim J.I., Do Kim Y., Jeong H., Ryu S.S. Material extrusion-based three-dimensional printing of WC–Co alloy with a paste prepared by powder coating. *Additive Manufacturing*. 2022;52:102679.
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102679>
22. Tang J.Y., Lu L.M., Li Z., Za X., Wu Y.C. Shape retention of cemented carbide prepared by Co melt infiltration into un-sintered WC green parts made via BJ3DP. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2022;107:105904.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2022.105904>
23. Wolfe T., Shah R., Prough K., Trasorras J.L. Coarse cemented carbide produced via binder jetting 3D printing. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2023;110:106016.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2022.106016>
24. Lengauer W., Duretek I., Fürst M., Schwarz V., Gonzalez-Gutierrez J., Schuschnigg S., Kukla C., Kitzmantel M., Neubauer E., Lieberwirth C., Morrison V. Fabrication and properties of extrusion-based 3D-printed hardmetal and cermet components. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2019;82:141–149.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2019.04.011>
25. Carreño-Morelli E., Alveen P., Moseley S., Rodriguez-Arbaizar M., Cardoso K. Three-dimensional printing of hard materials. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2020;87:105110.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2019.105110>
26. Zhang X., Guo Z., Chen C., Yang W. Additive manufacturing of WC–20Co components by 3D gel-printing. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2018;70:215–223.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2017.10.005>
27. Kim H., Kim J.I., Ryu S.S., Jeong H. Cast WC–Co alloy-based tool manufacturing using a polymeric mold prepared via digital light processing 3D printing. *Materials Letters*. 2022;306:130979.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130979>
28. Liu K., Zhou C., Chen F., Sun H., Zhang K. Fabrication of complicated ceramic parts by gelcasting based on additive manufactured acetone-soluble plastic mold. *Ceramics International*. 2020;46(16):25220–25229.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.06.313>
29. Dvornik M.I., Mikhailenko E.A., Burkov A.A., Kolzun D.A., Shichalin O.O. 3D printed plastic molds utilization for WC–15Co cemented carbide cold pressing. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2023;106312.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2023.106312>
30. Дворник М.И., Михайленко Е.А., Бурков А.А., Кользун Д.А. Зависимость плотности, твердости, прочности и размеров образцов твердого сплава WC–15Co от содержания пластификатора в заготовках, полученных при использовании пластиковой пресс-формы, изготовленной методом 3D-печати. *Перспективные материалы*. 2024;(3):33–44.
<https://doi.org/10.30791/1028-978X-2024-3-33-44>
 Dvornik M.I., Mikhailenko E.A., Burkov A.A., Kolzun D.A. Dependence of the density, hardness, strength and sizes of WC–15Co hard alloy samples on the plasticizer content in samples got using a 3D printed mold. *Perspektivnye materialy*. 2024;(3):33–44. (In Russ.).
<https://doi.org/10.30791/1028-978X-2024-3-33-44>
31. Niesz D.E. A review of ceramic powder compaction. *KONA Powder and Particle Journal*. 1996;14:44–51.
<https://doi.org/10.14356/kona.1996009>
32. Xu Z.K., Meenashisundaram G.K., Ng F.L. High-density WC–45Cr–18Ni cemented hard metal fabricated with binder jetting additive manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping*. 2022;17(1):92–104.
<https://doi.org/10.1080/17452759.2021.1997006>
33. Konyashin I., Hinnens H., Ries B., Kirchner A., Kloeden B., Kieback B., Nilen R.W.N., Sidorenko D. Addi-

tive manufacturing of WC–13%Co by selective electron beam melting: Achievements and challenges. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2019;84:105028.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2019.105028>

34. Fries S., Vogelpoth A., Kaletsch A., Broeckmann C. Influence of post heat treatment on microstructure and fracture strength of cemented carbides manufactured using laser-

based additive manufacturing. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2023;111:106085.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2022.106085>

35. Zhao Z., Liu R., Chen J., Xiong X. Additive manufacturing of cemented carbide using analogous powder injection molding feedstock. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2023;111:106095.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2022.106095>

Сведения об авторах



Information about the Authors

Максим Иванович Дворник – к.т.н., ст. науч. сотрудник, заведующий лабораторией порошковой металлургии, Институт материаловедения Хабаровского федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения РАН (ИМ ХФИЦ ДВО РАН)

 **ORCID:** 0000-0002-1216-4438


 **E-mail:** maxxxx80@mail.ru

Елена Альбертовна Михайленко – к.ф.-м.н., ст. науч. сотрудник лаборатории порошковой металлургии ИМ ХФИЦ ДВО РАН

 **ORCID:** 0000-0002-4515-9109

 **E-mail:** mea80@list.ru

Александр Анатольевич Бурков – к.ф.-м.н., ст. науч. сотрудник, заведующий лабораторией «Физико-химические основы материалов» ИМ ХФИЦ ДВО РАН

 **ORCID:** 0000-0002-5636-4669

 **E-mail:** burkovalex@mail.ru

Евгений Витальевич Черняков – лаборант лаборатории порошковой металлургии ИМ ХФИЦ ДВО РАН

 **E-mail:** tchernyakoffevgeny@yandex.ru

Maksim I. Dvornik – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Head of the Laboratory of Powder Metallurgy, Institute of Materials Science, Khabarovsk Federal Research Center, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (IMS KhFRC of FEB RAS)

 **ORCID:** 0000-0002-1216-4438


 **E-mail:** maxxxx80@mail.ru

Elena A. Mikhailenko – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Laboratory of Powder Metallurgy, IMS KhFRC FEB RAS

 **ORCID:** 0000-0002-4515-9109

 **E-mail:** mea80@list.ru

Aleksandr A. Burkov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Head of the Laboratory “Physical and Chemical Bases of Materials”, IMS KhFRC FEB RAS

 **ORCID:** 0000-0002-5636-4669

 **E-mail:** burkovalex@mail.ru

Evgeny V. Chernyakov – Laboratory Assistant, Laboratory of Powder Metallurgy, IMS KhFRC FEB RAS

 **E-mail:** tchernyakoffevgeny@yandex.ru

Вклад авторов



Contribution of the Authors

М. И. Дворник – определение цели работы, разработка пластиковых пресс-форм, проведение экспериментов, анализ результатов, написание статьи, формулировка выводов исследования.

Е. А. Михайленко – приготовление смесей и исходных образцов, участие в обсуждении результатов, написание статьи.

А. А. Бурков – проведение экспериментов, участие в обсуждении результатов.

Е. В. Черняков – приготовление смесей и исходных образцов, прессование режущих пластин.

M. I. Dvornik – defined he research objectives, conducted experiments, developed the plastic molds, authored the article, and formulated the study’s conclusions.

E. A. Mikhailenko – prepared the mixtures and initial samples, participated in the discussion of the results, and contributed to writing the article.

A. A. Burkov – conducted experiments and contributed to the discussion of the results.

E. V Chernyakov – prepared the mixtures and initial samples, and pressed the cutting inserts.

Статья поступила 11.03.2024 г.
 Доработана 27.04.2024 г.
 Принята к публикации 30.04.2024 г.

Received 11.03.2024
 Revised 27.04.2024
 Accepted 30.04.2024