

НГТУ



НЭТИ

Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Изготовление деталей пресс-форм из сплавов WC-15Co и WC-5Fe-5Ni-5Co с помощью форм, полученных методом фотополимерной 3D-печати

Максим Дворник ^a, Елена Михайленко ^{b, *}, Нурия Власова ^c

Хабаровский федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук, ул. Тихоокеанская, 153, г. Хабаровск, 680042, Россия

^a <https://orcid.org/0000-0002-1216-4438>, maxxxx80@mail.ru; ^b <https://orcid.org/0000-0002-4515-9109>, mea80@list.ru;
^c <https://orcid.org/0000-0003-0198-0912>, Vlasova64@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.7.073

История статьи:

Поступила: 18 февраля 2026
Рецензирование: 26 февраля 2026
Принята к печати: 23 марта 2026
Доступно онлайн: 15 июня 2026

Ключевые слова:

Твердый сплав
Пресс-форма
Режущая пластина
Среднеэнтропийная связка
Износостойкость

Финансирование

Исследование выполнялось по государственному заданию Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-00399-26-00.

АННОТАЦИЯ

Введение. Изготовление пресс-форм из стали или твердого сплава – дорогостоящий этап, существенно влияющий на себестоимость продукции порошковой металлургии, особенно в опытном и мелкосерийном производстве. Перспективным направлением является использование аддитивных технологий для создания оснастки и применение альтернативных, менее дорогих связок для твердых сплавов. **Цель работы:** исследование возможности использования аддитивных технологий для формирования заготовок пресс-форм из сплавов WC-15Co и WC-5Fe-5Ni-5Co и проведение сравнительного анализа фазового состава, микроструктуры, плотности, твердости, вязкости разрушения, прочности и износостойкости данных материалов. **Методы.** Детали пресс-форм (матрицы и пуансоны) из сплавов WC-15Co и WC-5Fe-5Ni-5Co изготавливали методом холодного прессования гранулированных порошков в пресс-формах, полученных фотополимерной 3D-печатью (Water-Wash Resin 2.0, высота слоя 20 мкм) с последующим вакуумным спеканием при 1400 °С. Проведен сравнительный анализ плотности, фазового состава, микроструктуры, твердости, прочности, вязкости разрушения и микроабразивной износостойкости полученных материалов. С помощью опытных твердосплавных пресс-форм методом холодного прессования и спекания при 1450 °С изготовлены режущие пластины SNUM-120408 из сплава ВК6, размеры которых сопоставлены с требованиями ГОСТ 19052–80 и 19042–80, а также с коммерческим аналогом. **Результаты и обсуждение.** Экспериментально подтверждена принципиальная возможность изготовления крупногабаритных (массой до 210 г) деталей твердосплавных пресс-форм с использованием фотополимерной оснастки. Относительная плотность деталей составила 99,1 % для WC-15Co и 98,3 % для WC-5Fe-5Ni-5Co, что незначительно ниже, чем у эталонных образцов, спрессованных при большем давлении в стальной пресс-форме. Показано, что замена кобальтовой связки на среднеэнтропийную Fe-Ni-Co приводит к подавлению роста зерен WC (средний размер 1,18 мкм против 1,40 мкм), что наряду с большей твердостью связки обеспечивает повышение твердости сплава (1070 HV против 1010 HV) и снижение скорости микроабразивного износа на 10 %. Изготовленные пресс-формы позволили получить режущие пластины, геометрические параметры (длина режущей кромки, толщина, радиус скругления) и физико-механические свойства которых соответствуют требованиям ГОСТ 19052–80 и 3882–74, а также находятся на уровне коммерческих аналогов. **Заключение.** Предложенный подход, сочетающий недорогую фотополимерную 3D-печать для создания оснастки и использование твердого сплава со среднеэнтропийной связкой Fe-Ni-Co, позволяет эффективно изготавливать работоспособные твердосплавные пресс-формы для мелкосерийного производства. Сплав WC-5Fe-5Ni-5Co, обладающий повышенной твердостью и износостойкостью, является перспективной заменой стандартному сплаву WC-15Co для данных условий эксплуатации.

Для цитирования: Дворник М.И., Михайленко Е.А., Власова Н.М. Изготовление деталей пресс-форм из сплавов WC-15Co и WC-5Fe-5Ni-5Co с помощью форм, полученных методом фотополимерной 3D-печати // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2026. – Т. 28, № 2. – С. 280–297. – DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28-2-280-297.

Введение

Сплавы на основе карбида вольфрама и кобальта широко используются в качестве инструментального материала благодаря исключительно высокой твердости, износостойкости и вязкости разрушения по сравнению с други-

ми твердыми материалами [1–4]. В частности, твердые сплавы применяются при производстве пресс-форм для изготовления изделий в промышленном масштабе. Актуальным является удешевление методов изготовления твердосплавных деталей пресс-форм, снижение стоимости и совершенствование характеристик используемых порошков [5]. Стоимость и свойства твердых сплавов на основе WC зависят в значительной степени от свойств связующего металла.

Для твердого сплава на основе WC часто в качестве связки выступает кобальт, но он имеет

*Адрес для переписки

Михайленко Елена Альбертовна, к.ф.-м.н., с.н.с.
Хабаровский федеральный исследовательский центр
Дальневосточного отделения Российской академии наук,
ул. Тихоокеанская, 153,
680042, г. Хабаровск, Россия
Тел.: +7 4212 22-69-56, e-mail: mea80@list.ru

ряд недостатков. Это в первую очередь высокая рыночная стоимость из-за повышенного спроса на кобальт для производства аккумуляторов [6] и токсичность как самого кобальта (2-й класс опасности согласно ГОСТ 9721–79), так и его смеси с порошком карбида вольфрама [7, 8]. Кроме того, использование кобальта не всегда придает наилучшие характеристики твердым сплавам.

Fe и Ni, как и Co, принадлежат к VIII группе периодической таблицы Менделеева и могут быть идеальными альтернативными связующими веществами [9]. Более того, связующая фаза из среднеэнтропийного сплава Fe-Ni-Co повышает вязкость разрушения твердого сплава [10]. Заменой части кобальта на никель и железо главным образом пытаются улучшить свойства связующего вещества и снизить затраты на кобальтовый порошок при производстве изделий из твердого сплава. Однако большинство работ сосредоточено на получении и изучении микроструктуры [11, 12], а также основных механических свойств (твердости, прочности, трещиностойкости) сплава с измененным составом связующего вещества [13–19]. Для того чтобы решить проблему замены связующего компонента при производстве твердосплавных пресс-форм, необходимо провести сравнительный анализ фазового состава, микроструктуры, плотности, твердости, вязкости разрушения, прочности и износостойкости вольфрамокобальтового сплава (WC-Co) и аналога со среднеэнтропийной связкой (WC-Fe-Ni-Co).

Дополнительным фактором, повышающим стоимость твердосплавной оснастки, является необходимость ее сложной и дорогостоящей электроэрозионной обработки. Для проведения электроэрозионной обработки необходимы станки, стоимость которых начинается от 600 тыс. руб., CuW-электрод, а потери материала при обработке твердосплавной заготовки существенны. Современные работы демонстрируют возможность получения изделий сложной конфигурации методами 3D-печати. Для их изготовления необходимы 3D-принтеры, стоимость которых начинается от 50 тыс. руб., а потери исходного материала меньше, так как нет необходимости делать запас на электроэрозионную обработку. Продукция, полученная селективным лазерным спеканием или плавлением [12, 19–25], часто уступает по свойствам продукции, изготовлен-

ной по обычной технологии из-за остаточной пористости и нежелательных фазовых превращений, вызванных необходимостью нагрева свыше 2000 °С, который ведет к разложению карбида вольфрама. Использование струйной [26–28] и экструзионной технологий [29] для 3D-печати заготовок из смесей порошков с полимерами сдерживается низкой текучестью композиций и, как следствие, недостаточной плотностью полуфабрикатов.

Перспективным методом признано применение полимерных форм, изготовленных методами 3D-печати, для формования твердосплавных заготовок с их последующим спеканием [30–34]. Этот метод сочетает низкие затраты за счет недорогой 3D-печати и высокие характеристики изделия за счет высокой плотности заготовок. Основными проблемами данного метода остаются низкая жесткость и ограниченная точность пластиковых деталей форм, получаемых методом фотополимерной 3D-печати, что снижает точность твердосплавных заготовок и изделий, изготавливаемых данным методом. Необходимо проверить возможность применения метода для получения твердосплавных деталей пресс-форм, используемых в порошковой металлургии. В частности, можно проверить, что режущая пластина SNUM-120408, изготовленная с помощью формы, полученной данным методом, отвечает требованиям существующих стандартов.

Целью работы является исследование возможности использования аддитивных технологий для формования заготовок пресс-форм из сплавов WC-15Co и WC-5Fe-5Ni-5Co и проведение сравнительного анализа фазового состава, микроструктуры, плотности, твердости, вязкости разрушения, прочности и износостойкости данных материалов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**.

1. Определить фазовый состав, микроструктуру, плотность, твердость, вязкость разрушения, прочность и износостойкость при микроабразивном износе сплавов WC-15Co и WC-5Fe-5Ni-5Co и провести сравнительный анализ.

2. Проверить соответствие основных размеров изготовленных с помощью опытных твердосплавных пресс-форм режущих пластин SNUM-120408 из сплава ВК6 требованиям ГОСТ 19052–80 и 19042-80, а также сравнить их с размерами коммерческой режущей пластины.

В работе впервые использованы фотополимерные пресс-формы для изготовления заготовок пуансонов и матрицы пресс-форм из твердого сплава с альтернативной связкой в виде твердого раствора Co-Fe-Ni. Такой подход значительно облегчает процедуру изготовления пресс-форм для порошковой металлургии.

Методика исследований

Для создания всех образцов в работе применяли среднезернистый порошок WC (марка WC3, КЗТС, Россия). Фотография порошка WC и гранулометрический состав представлены на рис. 1. В качестве связки использовали порошок кобальта (марки ПК-1Э ГОСТ 9721–79, Россия), никеля (ПНК-УТЗ ГОСТ 9722–97) и железа (ЖКВ, ТУ 6-05-0210316-007-88).

Приготовление двух партий (по 240 г) составов WC-15Co и WC-5Fe-5Ni-5Co осуществляли в шаровой мельнице Retsch PM-400. Процесс

длился 1 ч при скорости вращения 250 об/мин в твердосплавных стаканах с шарами (соотношение материал : шары = 1:5). Для улучшения формуемости в смеси вводили 1,5 % каучука (в виде 5%-го раствора в бензине). После высушивания смесь гранулировали протиркой через сито. Из части полученных гранул в стальной пресс-форме (усилие 200 МПа) формовали образцы-штабики (24×8×8 мм, масса 10 г) для стандартных испытаний. Остальной материал использовали для прессования деталей оснастки в фотополимерных формах под давлением 50 МПа во избежание разрушения последних, так как ранее было определено, что увеличение давления прессования в пластиковых пресс-формах с 50 до 200 МПа слабо влияет на свойства готовых твердосплавных изделий [32].

Порошковую смесь для получения режущих пластин SNUM-120408 (сплав ВК6) готовили аналогичным способом из порошков WC и Co (общая масса 30 г, время смешивания 1 ч).

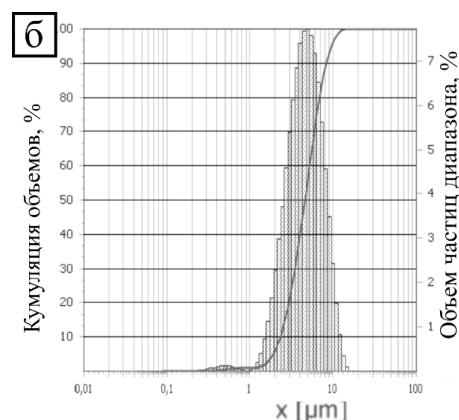
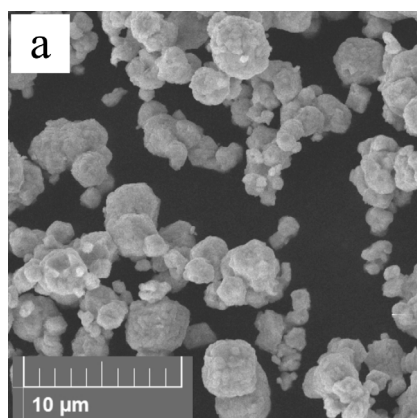


Рис. 1. Фотография частиц порошка и гранулометрический состав порошка WC

Fig. 1. Photograph of powder particles and particle size distribution of WC powder

Была разработана 3D-модель режущей пластины SNUM-120408 в соответствии с требованием ГОСТ 19052–80 (рис. 2, а). Далее была разработана 3D-модель заготовки режущей пластины по определенной ранее усадке заготовок сплава WC-6Co при спекании. 3D-модели заготовки матрицы и пуансона будущей твердосплавной пресс-формы (рис. 2, б, в) были разработаны с учетом усадки материала заготовок деталей пресс-форм при спекании и припуска (0,1 мм) на алмазное шлифование. Усадка деталей пресс-форм рассчитывалась исходя из соотношения плотности материала заготовок после

удаления пластификатора и теоретической плотности сплавов WC-15Co и WC-5Fe-5Ni-5Co. Детали пресс-форм изготавливали методом фотополимерной 3D-печати на 3D-принтере Phrozen Sonic Mini 8K. Высота слоя при 3D-печати составила 20 мкм.

Схемы процесса формования в пластиковой оснастке (из фотополимера Water-WashResin 2.0 (Anycubic, Китай)) отражены на рис. 2, г, д. На рис. 2, е представлены готовые основные детали пластиковой пресс-формы. Из гранул, полученных из WC-15Co и WC-5Fe-5Ni-5Co, прессовали заготовки пуансонов массой 15 г (рис. 2, б)



Рис. 2. Трехмерные модели заготовки режущей пластины (а), твердосплавного пуансона (б) и твердосплавной матрицы (в). Схемы прессования заготовок матрицы (г) и пуансона (д). Детали фотополимерной пресс-формы для изготовления твердосплавных заготовок пресс-формы (е), заготовка матрицы пресс-формы из сплава WC-15Co после прессования (ж)

Fig. 2. Three-dimensional models of: cutting insert blank (a); cemented carbide punch (б); carbide die (в). Diagram of pressing die blanks (г); diagram of pressing punch blanks (д). Components of the photopolymer die for producing cemented carbide die blanks (е); WC-15Co alloy die blank after pressing (ж)

и заготовки матриц пресс-форм массой по 210 г (рис. 2, в). Заготовки штабиков прессовали в стальной пресс-форме при давлении 200 МПа. Заготовки деталей пресс-форм прессовали из сплавов WC-15Co (рис. 2, ж) и WC-5Fe-5Ni-5Co в пластиковых пресс-формах при давлении 50 МПа, чтобы избежать повреждения пластиковых деталей пресс-форм и значительной деформации заготовок. Заготовки режущих пластин массой 8,5 г каждая прессовали в изготовленных из сплавов WC-15Co и WC-5Fe-5Ni-5Co пресс-формах при давлении 200 МПа. Было изготовлено четыре режущих пластины, по две в каждой пресс-форме.

Затем все заготовки пресс-форм помещали в печь Carbolit STF и выполняли отгонку пластификатора в среде аргона в процессе нагрева с 20 до 700 °C со скоростью 1...4 °C/мин. Окончательное спекание проводили в вакууме при максимальной температуре 1400 °C в течение одного часа в той же самой печи после ее очистки. Спекание режущих пластин из сплава ВК6 проводили в этой же печи в течение одного часа при температуре 1450 °C.

После спекания штабики шлифовали и полировали для их соответствия размеру 20×6,5×5,25 мм по стандарту ISO 3327:2009 и для дальнейшего исследования микроструктуры, твердости и прочности. Поверхности деталей пресс-форм шлифовали и полировали для снижения шероховатости. На подготовленных образцах исследовали микроструктуру и твердость. Плотность полученных образцов определяли методом гидростатического взвешивания с помощью аналитических весов Vibra shinko denshi с приставкой. Каждый образец измеряли три раза после высушивания. На испытательном прессе ИП-250М проводили оценку прочности при испытании одного штабика для каждого состава по ГОСТ 20019–74. Фазовый состав исследовали на рентгеновском дифрактометре ДРОН 7М. Твердость определяли с помощью твердомера HVS-50 при нагрузке 30 кгс по пяти измерениям для каждого образца. Размер зерен WC определяли методом случайных секущих (стандартная методика ASTM E112-24) на фотографиях микроструктур по результатам анализа более 300 зерен.

Испытания на износостойкость проводили по схеме «свободный шарик – плоскость» на установке Calotest (CSM Instruments, Швейцария) в соответствии со схемой, представленной в работе [35]. Образцы располагали под углом 40° относительно вертикальной плоскости. Контролем служил твердосплавной шарик массой 59,72 г и диаметром 20 мм. В качестве абразивной среды использовали суспензию абразивных частиц мелкодисперсного (средний размер частиц 5 мкм) оксида алюминия в минеральном масле в массовом соотношении 1:10. Скорость потока суспензии в зоне контакта между шариком и образцом во время испытаний составляла 0,005 мл/мин (1 капля каждые 10 минут). Каждое испытание на микроабразивный износ длилось 30 минут. Каждое измерение проводили трижды. Линейная скорость контртела в точке контакта – 0,51 м/с. Расстояние, пройденное за 30 минут, составило $L = 918$ м.

Объем износа при испытаниях определяли как объем лунки (V) в форме шарового сегмента с диаметром основания d_c и высотой h :

$$V = \pi h^2 \left(\frac{d_c^2}{8h} + \frac{h}{6} \right). \quad (1)$$

Диаметр d_c и высоту h кратера измеряли на профиле центрального сечения лунки, полученного на профилометре. Удельный износ всех материалов рассчитывали по формуле

$$w_S = \frac{V}{PL}, \quad (2)$$

где $P = 0,415$ Н – нормальная нагрузка. После испытания на износостойкость с помощью профилометра Time Group Inc TR200 исследовали профили образованных лунок. С помощью оптического микроскопа «Альтами МЕТ 3 АПО» и растрового микроскопа Tescan Vega исследовали микроструктуру поверхности образцов и образованных лунок. С помощью приставки Oxford X-Max 80 методом ЭДС исследовали составы поверхностей шлифов и лунок.

Были проведены измерения размеров изготовленных режущих пластин с помощью оптического микроскопа и микрометра МК-25 (погрешность 4 мкм). Измерения на разных образцах и разных гранях пластин проводили по три раза для каждого размера. Доверительные интервалы для всех измерений были рассчитаны

с надежностью 0,95 для распределения Стьюдента. В качестве образца для сравнения размеров использовали режущую пластину SNUM 120408 ГОСТ 19052–80 из сплава ВК8.

Результаты и их обсуждение

Плотность и усадка штабиков и деталей пресс-форм

По результатам измерения плотности заготовок штабиков была рассчитана усадка образцов – 21,6 % для WC-15Co и 21,7 % для WC-5Fe-5Ni-5Co. В результате спекания были получены образцы штабиков из сплавов WC-15Co и WC-5Fe-5Ni-5Co плотностью $13,99 \pm 0,01$ г/см³ и $13,88 \pm 0,01$ г/см³ соответственно. Теоретическая плотность, которую принято рассчитывать по правилу смеси ASTM B311-17, для этих сплавов ($\rho_{WC} = 15,65$ г/см³, $\rho_{Fe} = 8,87$ г/см³, $\rho_{Co} = 8,90$ г/см³, $\rho_{Ni} = 8,90$ г/см³) оценочно (без учета растворимости углерода и вольфрама в металлической связке) составляет примерно 14,05 г/см³. В таком случае относительная плотность полученных сплавов составляет 99,6 % для WC-15Co и 98,8 % для WC-5Fe-5Ni-5Co, что соответствует плотности сплава WC-Fe-Ni-Co (99 %), полученного авторами в работе [36]. Плотность сплава WC-15Co оказалась выше, так как кобальт лучше смачивает карбид вольфрама, чем железо и никель. Так, энергии адгезии слоев Fe, Ni, Ni-Co, Ni-Fe, Fe-Ni-Co и WC, рассчитанные методами компьютерного моделирования на основе теории функционала плотности [37–40] и представленные в табл. 1, ниже, чем энергия адгезии слоев кобальта и карбида вольфрама.

Исходя из разной относительной плотности пористость штабиков из сплава WC-15Co оказалась меньше (0,4 %), чем пористость образцов из сплава WC-5Fe-5Ni-5Co (1,2 %). Определение пористости по относительной плотности позволяет приблизительно оценить пористость образцов. ГОСТ 3882–74 допускает отклонения в плотности до 2,5 %. При этом увеличение пористости негативно влияет на твердость и прочность твердых сплавов.

Форма и размеры полученных деталей опытных пресс-форм удовлетворяют требованиям, предъявляемым к твердосплавной пресс-форме (рис. 3). Плотность матрицы пресс-формы из WC-15Co составила $13,92 \pm 0,02$ г/см³, из

Энергии адгезии металлических связей с поверхностью WC, рассчитанные методами компьютерного моделирования

Adhesion energies of metallic bonds to the WC surface calculated using computer modeling methods

Металлическая связь в сплаве / Metallic bond in the cement carbide	Энергия адгезии, Дж/м ² / Adhesion energy (J/m ²)	Источник / Reference
Fe	3,44	[37]
Ni	4,61	[38]
Co	6,85...8,78	[39], [40]
Ni-Fe	4,688...4,809	[38]
Ni-Co	4,72...4,786	[38]
Fe-Ni-Co	6,574	[40]



WC-15Co WC-5Fe-5Ni-5Co

Рис. 3. Фотография полученных деталей пресс-форм из сплавов WC-15Co и WC-5Fe-5Ni-5Co

Fig. 3. Photograph of the obtained die components made of WC-15Co and WC-5Fe-5Ni-5Co cemented carbides

WC-5Fe-5Ni-5Co – $13,81 \pm 0,02$ г/см³. Ранее было установлено, что на плотность изделий из твердых сплавов, изготовленных с помощью пластиковых пресс-форм, давление прессования оказывает незначительное влияние [32, 33]. Поэтому, несмотря на меньшее давление прессования, относительная плотность деталей пресс-форм из сплавов WC-15Co (99,1 %) и WC-5Fe-5Ni-5Co (98,3 %) оказалась немного ниже плотности штабиков. Отклонения относительной плотности деталей пресс-формы 0,9 и 1,7 % находятся в рамках допуска ГОСТ 3882–74. Незначительное снижение плотности происходит из-за большей высоты изделий и большей неравномерности распределения плотности в заготовках деталей пресс-форм, а также из-за затруднения

прессования в результате увеличения силы трения заготовки о стенки матрицы пластиковой пресс-формы.

Фазовый состав, микроструктура и механические свойства сплавов WC-15Co и WC-5Fe-5Ni-5Co

Фазовый состав полученных сплавов отличается лишь положением пика фазы кобальта в сплаве WC-15Co и твердого раствора Fe-Ni-Co в сплаве WC-5Fe-5Ni-5Co (рис. 4). Если в сплаве WC-15Co положение пика строго соответствует ГЦК-фазе кобальта, то в сплаве WC-5Fe-5Ni-5Co наблюдается значительное уменьшение интенсивности и небольшое смещение. Это происходит из-за формирования многокомпонентного

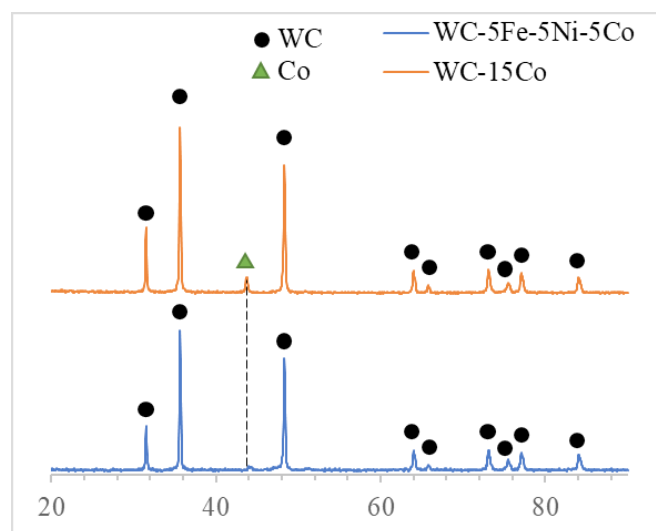


Рис. 4. Фазовый состав полученных сплавов

Fig. 4. Phase composition of the obtained alloys

неупорядоченного твердого раствора, состоящего из атомов железа, никеля и кобальта. Наблюдается небольшое изменение относительных интенсивностей пиков кристаллической решетки WC, которое можно объяснить разной формой кристаллов, формирующихся в процессе спекания в результате перекристаллизации через жидкую фазу.

Анализ микроструктуры подтвердил (рис. 5), что полученные сплавы состоят только из связки и зерен WC. Никаких отдельных фаз в сплаве WC-5Fe-5Ni-5Co не обнаружено. Это подтверждает формирование однородного твердого раствора, состоящего из атомов железа, никеля и кобальта. Тем не менее можно заметить, что зерна WC в сплаве WC-5Fe-5Ni-5Co имеют значительно больше отклонений от правильной формы, чем в сплаве WC-15Co. Это вызвано тем, что скорость роста зерен перекристаллизацией через жидкую фазу в сплаве WC-5Fe-5Ni-5Co меньше, соответственно рост зерен и формирование правильной огранки в таком сплаве замедлен. По сравнению с кобальтовым связующим многокомпонентная связка подавляет рост зерен WC благодаря эффекту замедленной диффузии. Известно, что при этом средний размер зерен WC уменьшается с увеличением содержания многокомпонентного связующего [41]. Это объясняет перераспределение высот пиков фазы WC на рис. 4. Согласно данным из научной литературы, твердость Co и Fe-Ni-Co (160...260 HV) примерно одинакова [42]. Из-за меньшего размера зерен (1,18 мкм) твердость сплава WC-5Fe-5Ni-5Co (1070 ± 20 HV) оказалась больше, чем твердость сплава WC-15Co (1010 ± 30 HV), средний диа-

метр зерен WC в котором равен 1,40 мкм. Это примерно соответствует разнице в твердости сплавов со связками Co и Fe-Ni-Co, наблюдаемой в других исследованиях [43]. Предварительные испытания двух образцов дали близкие значения прочности (2180 МПа для WC-15Co и 1970 МПа для WC-5Fe-5Ni-5Co), что соответствует гипотезе об отсутствии резких отличий в прочности, однако для статистически значимого вывода требуются дополнительные исследования.

Испытания на износ показали, что средний диаметр и глубина лунок в образцах из сплава WC-5Fe-5Ni-5Co (рис. 6, *г-д*, рис. 7, *б*) меньше, чем в образцах из сплава WC-15Co (рис. 6, *а, б*, рис. 7, *а*). В первую очередь это связано с меньшим размером зерен и большей твердостью сплава WC-5Fe-5Ni-5Co. В микроструктуре лунки из сплава WC-15Co (рис. 6, *в*) видно, что кобальт практически полностью удален в результате абразивного воздействия частиц оксида алюминия. В микроструктуре поверхности лунки твердого сплава WC-15Co видно множество крупных зерен WC, частично подвергшихся воздействию абразива. То есть значительная часть зерен вырывается в результате межкристаллитного разрушения под воздействием абразива. В то же время в микроструктуре лунки сплава WC-5Fe-5Ni-5Co (рис. 6, *е*) значительно больше зерен WC со следами абразивного воздействия, что говорит о преимущественно транскристаллитном характере разрушения. При этом в данном образце (рис. 6, *е*) величина углублений между зернами WC, образованных в результате удаления связки, заметно меньше, чем в сплаве WC-15Co (рис. 6, *в*).

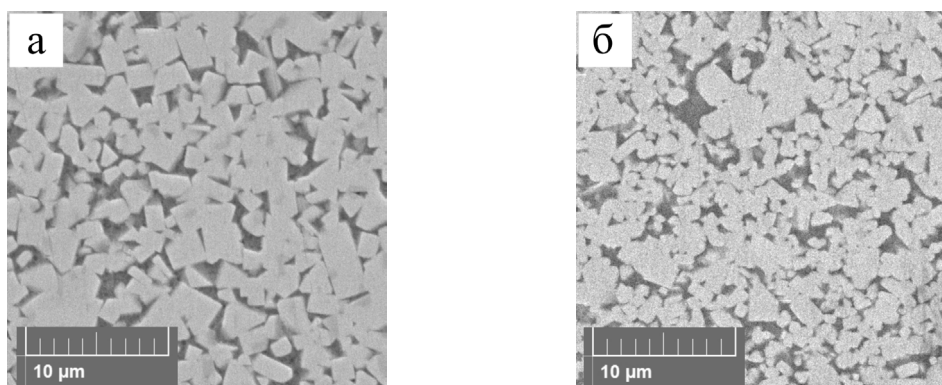


Рис. 5. Микроструктуры сплавов WC-15Co (*а*) и WC-5Fe-5Ni-5Co (*б*)

Fig. 5. Microstructures of WC-15 Co (*a*) and WC-5Fe-5Ni-5Co cemented carbides (*b*)

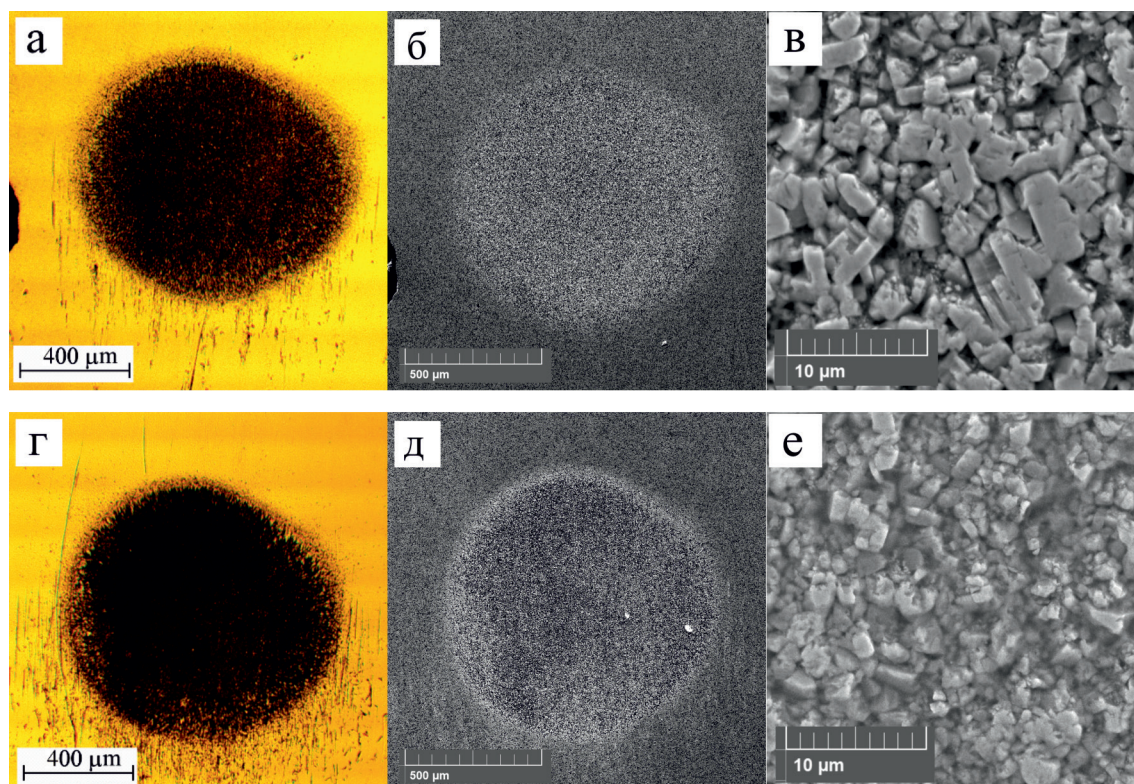


Рис. 6. Фотографии лунок после микроабразивного износа в сплаве WC-15Co (а–в) и WC-5Fe-5Ni-5Co (г–е), полученные на оптическом (а, г) и растровом (б, в, д, е) микроскопах

Fig. 6. Photographs of wear craters after microabrasive wear in the WC-15 Co (a–в) and WC-5Fe-5Ni-5Co (г–е) cemented carbide specimens, obtained using optical (а, г) and scanning electron microscopes (б, в, д, е)

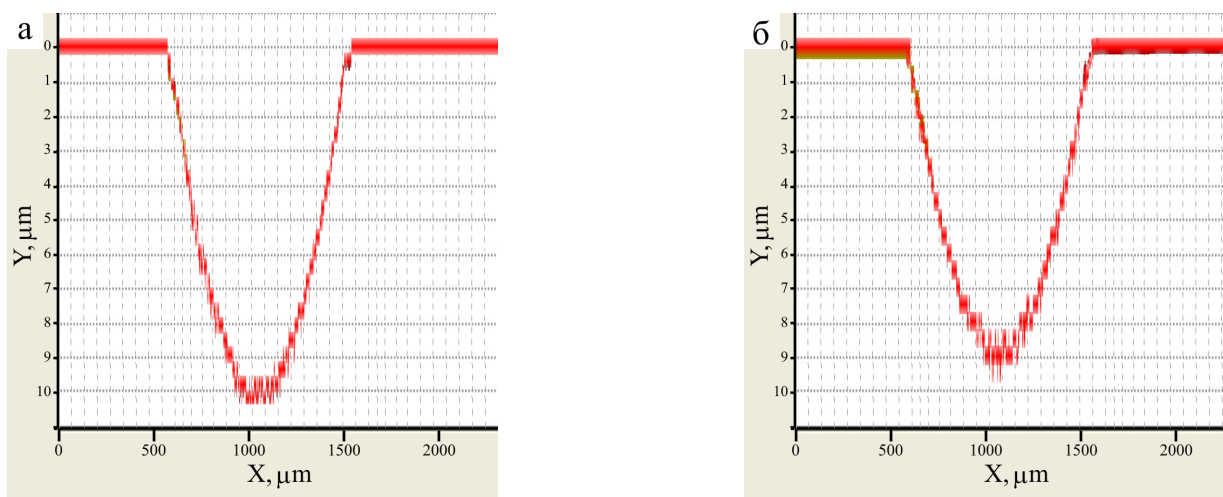


Рис. 7. Профили лунок износа образцов WC-15Co (а) и WC-5Fe-5Ni-5Co (б)

Fig. 7. Wear crater profiles of WC-15 Co (а) and WC-5Fe-5Ni-5Co cemented carbide specimens (б)

Концентрации металлов в сплаве WC-15Co (рис. 8, а) и в сплаве WC-5Fe-5Ni-5Co (рис. 8, в) с учетом наличия углерода в требуемой концентрации близки к заявляемым составам. Концентрацию углерода не определяли, так как

метод энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии дает слишком низкую точность для этого компонента. В поверхностях лунок, образованных в результате микроабразивного износа, концентрация металлов связки (Co, Fe,

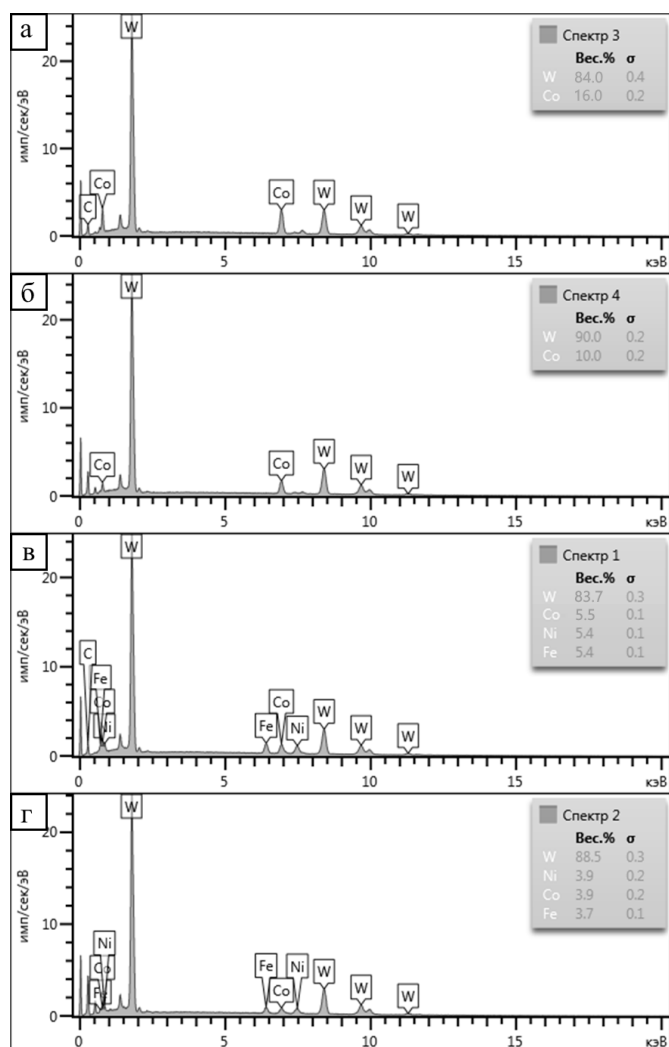


Рис. 8. Спектры исходных (а, в) и изношенных (б, г) поверхностей твердых сплавов WC-15Co (а, б) и WC-5Fe-5Ni-5Co (в, г)

Fig. 8. Spectra of the initial (a, в) and worn (б, г) surfaces of WC-15 Co (а, б) and WC-5Fe-5Ni-5Co (в, г) cemented carbide samples

Ni) снижается в обоих сплавах, что соответствует наблюдаемым изменениям микроструктуры (рис. 6, в, е). При этом относительная концентрация кобальта (без учета углерода) в сплаве WC-15Co снижается с 16,0 до 10,0 %. Суммарная относительная концентрация металлов связки (без учета углерода) в сплаве WC-5Fe-5Ni-5Co (Fe, Ni, Co) снижается с 16,5 до 11,5 %. То есть относительное снижение концентрации связки в сплаве WC-5Fe-5Ni-5Co (30,3 %) на 7,2 % ниже, чем в сплаве WC-15Co (37,5 %). Это подтверждает то, что в сплаве WC-5Fe-5Ni-5Co связка удаляется на меньшую глубину из-за большей твердости. Рост твердости и уменьшение размера зерен WC способствуют росту износостойкости

твердых сплавов при микроабразивном износе [1, 2]. Из-за большей твердости и меньшего размера зерен скорость износа сплава с многокомпонентной связкой (WC-5Fe-5Ni-5Co) оказалась на 10 % ниже, чем скорость износа сплава WC-15Co (рис. 9). Однако такое изменение скорости износа не превышает погрешности измерения.

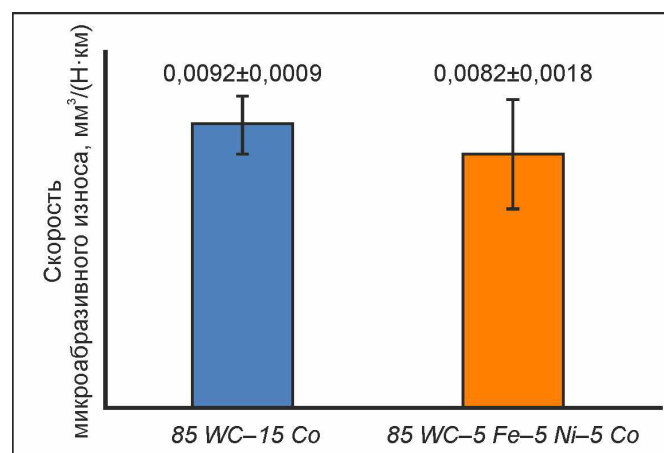


Рис. 9. Сравнение скорости микроабразивного износа твердосплавных образцов

Fig. 9. Comparison of the microabrasive wear rate of cemented carbide specimens

Апробация полученных пресс-форм

Использование обеих опытных твердосплавных пресс-форм для изготовления заготовок твердосплавных пластин SNUM-120408 из сплава ВК6 оказалось успешным (рис. 10). Полученные пластины соответствуют по плотности ($14,85 \pm 0,01$ г/см³) и твердости (1380 ± 10 HV) требованиям ГОСТ 3882–74. Внешне отличить пластины, изготовленные с использованием пресс-формы из сплава WC-5Fe-5Ni-5Co, от пластин, изготовленных с использованием пресс-формы из сплава WC-15Co, практически невозможно (рис. 10). Можно ожидать, что за счет большей износостойкости срок службы пресс-формы из сплава WC-5Fe-5Ni-5Co в условиях абразивного износа малой интенсивности будет выше, чем у пресс-формы из сплава WC-15Co.

Размеры полученных пластин соответствуют ГОСТ 19052–80. На рис. 11 показан пример обеспечения необходимого радиуса скругления режущих пластин SNUM-120408, равный 0,8 мм. На рис. 11, а видно, что высокая точность 3D-печати обеспечила необходимый радиус

Рис. 10. Режущие пластины, изготовленные с помощью экспериментальных пресс-форм и коммерческий аналог

Fig. 10. Cutting inserts manufactured using experimental dies and a commercial counterpart

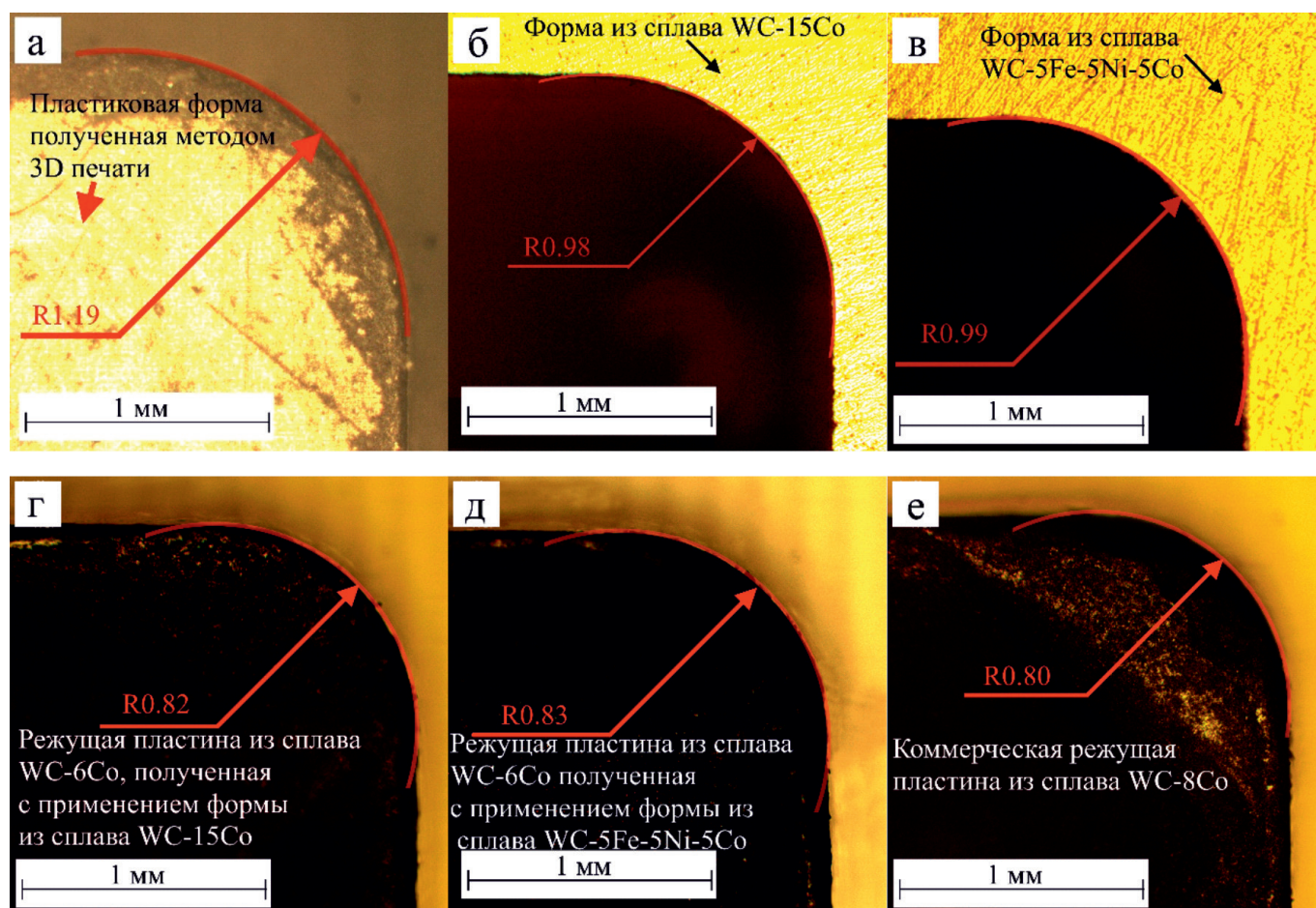


Рис. 11. Фотографии скругления пластиковой матрицы для прессования заготовки пресс-формы, полученной методом 3D-печати (а), фотографии матриц пресс-форм для прессования заготовок режущих пластин, изготовленных из сплава WC-15Co (б) и WC-5Fe-5Ni-5Co (в), скругление изготовленных режущих пластин (г, д), скругление коммерческой режущей пластины (е)

Fig. 11. Photograph of the rounded plastic die for pressing a die blank obtained by 3D printing (a). Photograph of die for pressing cutting insert blanks from the WC-15Co cemented carbide (б). Photograph of die for pressing cutting insert blanks from the WC-5Fe-5Ni-5Co cemented carbide (в). Corner rounding of the manufactured cutting inserts (г, д). Corner rounding of a commercial cutting insert (е)

скругления пластиковой формы, рассчитанный с учетом усадки пресс-формы и заготовки изделия на 21,6 и 21,7 % для WC-Co и WC-5Fe-5Ni-5Co соответственно ($1,19 = 0,8 \cdot 1,22 \cdot 1,22$) при спекании. На рис. 11, б видно, что спеченная матрица пресс-формы из сплава WC-15Co имеет близкое к запланированному значение радиуса скругления с учетом дальнейшей усадки заготовки режущей пластины ($0,98 = 0,8 \cdot 1,22$). Радиус скругления формы из сплава WC-5Fe-5Ni-5Co (рис. 11, в) оказался немного больше (0,99 мм) из-за меньшей усадки пресс-формы. Радиусы скругления режущих пластин, полученных после прессования заготовок в пресс-формах из сплавов WC-15Co (рис. 11, з) и WC-5Fe-5Ni-5Co (рис. 11, д), оказались немного больше запланированного (0,82 и 0,83 мм вместо 0,80 мм) из-за сложности прогнозирования усадки при спекании опытных образцов. Тем не менее полученные режущие пластины близки по радиусу скругления и другим основным размерам к требуемым размерам (ГОСТ 19052–80, с учетом допусков ГОСТ 19042–80) и мало отличаются по основным размерам (табл. 2) от аналогичной коммерческой пластины (рис. 11, е). Допуски для диаметра отверстия и радиуса скругления не найдены.

Заключение

В работе экспериментально подтверждена эффективность комбинированного подхода к изготовлению твердосплавной оснастки, сочета-

ющего недорогую фотополимерную 3D-печать пресс-форм и последующее холодное прессование с вакуумным спеканием.

1. Несмотря на меньшее давление прессования (50 МПа) в пластиковых формах по сравнению со стальными (200 МПа), относительная плотность полученных деталей пресс-форм (матриц массой до 210 г) из сплавов WC-15Co и WC-5Fe-5Ni-5Co составила 99,1 % и 98,3 % соответственно, что незначительно ниже плотности эталонных образцов и соответствует требованиям ГОСТ 3882–74. Установлено, что замена традиционной кобальтовой связки на среднеэнтропийную Fe-Ni-Co в сплаве WC-5Fe-5Ni-5Co приводит к изменению комплекса механических свойств. Более низкая энергия адгезии и замедленная диффузия в многокомпонентной связке подавляют рост зерен WC (1,18 мкм против 1,40 мкм у WC-15Co), что наряду с высокой твердостью самой связки обеспечивает повышение твердости сплава (1070 HV против 1010 HV). Это, в свою очередь, обуславливает снижение скорости микроабразивного износа на 10 % (в пределах погрешности измерения) по сравнению со сплавом WC-15Co. Сплав WC-15Co демонстрирует более высокие показатели плотности (99,6 %) и прочности при изгибе (2180 МПа против 1970 МПа). Показано, что механизм микроабразивного износа исследованных сплавов различается. В сплаве WC-15Co преобладает межкристаллитное разрушение с вырыванием зерен и интенсивным удалением связки (снижение концентрации Co на 37,5 %).

Таблица 2

Table 2

Размерные характеристики режущих пластин SNUM-120408

Dimensional characteristics of SNUM-120408 cutting inserts

Материал пресс-формы / Die material	Длина режущей кромки, l , мм / Cutting edge length, l (mm)	Толщина, s , мм / Thickness, s (mm)	Диаметр отверстия d_1 , мм / Hole diameter d_1 (mm)	Радиус скругления, r , мм / Corner radius, r (mm)
WC-15 Co	$12,82 \pm 0,01$	$4,78 \pm 0,01$	$5,15 \pm 0,05$	0,82
WC-5Fe-5Ni-5Co	$12,80 \pm 0,01$	$4,78 \pm 0,01$	$5,15 \pm 0,05$	0,83
Коммерческая пластина из BK8 / Commercial WC-8Co insert	$12,62 \pm 0,01$	$4,84 \pm 0,01$	$4,85 \pm 0,05$	0,8
ГОСТ 19052–80, ГОСТ 19042–80 / GOST 19052–80, GOST 19042–80	$12,7 \pm 0,13$	$4,76 \pm 0,13$	5,16	0,8



В сплаве WC-5Fe-5Ni-5Co износ носит преимущественно транскристаллитный характер с меньшей глубиной удаления связки (снижение суммарной концентрации Fe-Ni-Co на 30,3 %), что подтверждает его повышенную сопротивляемость абразивному воздействию.

2. Практическая значимость работы подтверждена успешным использованием изготовленных пресс-форм из обоих сплавов для получения режущих пластин SNUM-120408 из сплава ВК6. Геометрические параметры пластин (длина режущей кромки 12,80...12,82 мм, толщина 4,78 мм, диаметр крепежного отверстия 5,15 мм, радиус скругления 0,82...0,83 мм), их плотность (14,85 г/см³) и твердость (HRA 89) находятся в пределах допусков, установленных ГОСТ 19052–80, ГОСТ 19042–80 и ГОСТ 3882–74, и соответствуют уровню аналогичной коммерческой режущей пластины. Материал пресс-формы не оказал значительного влияния на качество готовых изделий при меньшей себестоимости за счет использования менее ценных компонентов.

Список литературы

1. Дворник М.И., Мокрицкий Б.Я., Зайцев А.В. Сравнительный анализ микроабразивной износостойкости традиционных твердых сплавов и субмикронного твердого сплава WC-8Co-1Cr₃C₂ // Вопросы материаловедения. – 2015. – № 1 (81). – С. 45–51.
2. Дворник М.И., Зайцев А.В. Сравнительный анализ износостойкости субмикронного твердого сплава WC-8Co-1Cr₃C₂ и традиционных твердых сплавов при сухом трении // Перспективные материалы. – 2015. – № 5. – С. 34–41.
3. Ефимович И.А., Золотухин И.С., Завьялов Е.С. Температурный коэффициент линейного расширения вольфрамокобальтовых твердых сплавов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 3. – С. 129–140. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.3-129-140.
4. Повышение стойкости зубьев буровых долот за счет изменения технологии их изготовления / Дж.Б. Тошов, Д.М. Фозилов, К.К. Елемесов, У.Н. Рузиев, Д.Н. Абдуллаев, Д.Д. Басканбаева, Л.Р. Бекирова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 112–124. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-112-124.
5. Белоусова В.П., Попова М.Н., Белоусов А.Л. Экономико-технологические аспекты организации производства изделий из порошковых материалов на машиностроительных предприятиях // Конструкции из композиционных материалов. – 2007. – № 4. – С. 122–126.
6. Gent W.E., Busse G.M., House K.Z. The predicted persistence of cobalt in lithium-ion batteries // Nature Energy. – 2022. – Vol. 7 (12). – P. 1132–1143. – DOI: 10.1038/s41560-022-01129-z.
7. Armstead A.L., Li B. Nanotoxicity: emerging concerns regarding nanomaterial safety and occupational hard metal (WC-Co) nanoparticle exposure // International Journal of Nanomedicine. – 2016. – Vol. 11. – P. 6421–6433. – DOI: 10.2147/IJN.S121444.
8. Armstead A.L., Li B. In vitro inflammatory effects of hard metal (WC-Co) nanoparticle exposure // International Journal of Nanomedicine. – 2016. – Vol. 11. – P. 6195–6206. – DOI: 10.2147/IJN.S121176.
9. Comparative study of WC-based hard alloys fabrication via spark plasma sintering using Co, Fe, Ni, Cr, and Ti binders / O.O. Shichalin, I.Yu. Buravlev, E.K. Papynov, A.V. Golub, A.A. Belov, A.A. Buravleva, V.N. Sakhnevich, M.I. Dvornik, N.M. Vlasova, A.V. Gerasimenko, V.P. Reva, A.A. Yudakov // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2022. – Vol. 102. – P. 105725. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2021.105725.
10. Fracture behavior of cemented carbides with CoNiFe medium entropy alloy binder / C. Qian, K. Li, H. Cheng, W. Zhang, X. Jiang, Y. Liu // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2021. – Vol. 98. – P. 105547. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2021.105547.
11. Mechanical properties and microstructure of WC-Fe-Ni-Co cemented carbides prepared by vacuum sintering / Y. Gao, B.-H. Luo, K. He, H. Jing, Z. Bai, W. Chen, W.-W. Zhang // Vacuum. – 2017. – Vol. 143. – P. 271–282. – DOI: 10.1016/j.vacuum.2017.06.028.
12. Chang S.-H., Chang M.-H., Huang K.-T. Study on the sintered characteristics and properties of nanostructured WC-15 wt%(Fe-Ni-Co) and WC-15 wt% Co hard metal alloys // Journal of Alloys and Compounds. – 2015. – Vol. 649. – P. 89–95. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.07.119.
13. Comparative study of the microstructure and mechanical properties of WC/High-speed steel composite materials prepared with Co, Ni, and Fe binders / H. Li, H. Zhang, D. Chen, Z. Jiang // JOM. – 2024. – Vol. 76 (5). – P. 2120–2131. – DOI: 10.1007/s11837-024-06429-1.
14. Soria-Biurrun T., Sanchez-Moreno J.M., Frisk K. Experimental and theoretical study of WC-40Fe-20Co-40Ni // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2022. – Vol. 102. – P. 105719. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2021.105719.
15. Experimental investigation and thermodynamic modelling of WC-Fe-Ni-Co-Cr cemented carbides / T. Soria-Biurrun, S. Sridar, K. Frisk, W. Xiong,

- J.M. Sánchez-Moreno // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2024. – Vol. 124. – P. 106824. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2024.106824.
16. Effect of Cr_3C_2 addition on microstructure and mechanical properties of WC-CoNiFe cemented carbides / J. Wu, D. Ren, B. Xie, R. He, Z. Geng, Z. Zhang, Y. Liu, D. Wang, Y. Zhu, W. Zhang // Metals. – 2024. – Vol. 14 (8). – P. 895. – DOI: 10.3390/met14080895.
17. Densification of WC-Fe-Ni-Co-Cr cemented carbides processed by HIP after sintering: effect of WC powder particle size / T. Soria-Biurrun, L. Lozada-Cabezas, J. Navarrete-Cuadrado, F. Ibarreta-Lopez, R. Martinez-Pampliega, J.M. Sánchez-Moreno // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2023. – Vol. 110. – P. 105994. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2022.105994.
18. Овчаренко А.Г., Козлюк А.Ю., Курепин М.О. Повышение износостойкости пластин из твердого сплава // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2010. – № 2 (47). – С. 13–15.
19. Structure and properties of WC-Fe-Ni-Co nanopowder composites for use in additive manufacturing technologies / M. Krinitcyn, N.V. Svarovskaya, N. Rodkevich, E. Ryumin, M. Lerner // Metals. – 2024. – Vol. 14 (2). – P. 167. – DOI: 10.3390/met14020167.
20. Microstructure analysis of high density WC-Co composite prepared by one step selective laser melting / J. Chen, M. Huang, Z.Z. Fang, M. Koopman, W. Liu, X. Deng, Z. Zhao, S. Chen, S. Wu, J. Liu, W. Qi, Z. Wang // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2019. – Vol. 84. – P. 104980. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2019.104980.
21. 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. – Vol. 782. – P. 440–450. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.12.187.
22. 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. – Vol. 527 (29–30). – P. 7585–7592. – DOI: 10.1016/j.msea.2010.08.075.
23. Khmyrov R.S., Safronov V.A., Gusarov A.V. Synthesis of nanostructured WC-Co hardmetal by selective laser melting // Procedia IUTAM. – 2017. – Vol. 23. – P. 114–119. – DOI: 10.1016/j.piutam.2017.06.011.
24. Laser powder bed fusion of cemented carbides by developing a new type of Co coated WC composite powder / L. Zhang, C. Hu, Y. Yang, R.D.K. Misra, K. Kondoh, Y. Lu // Additive Manufacturing. – 2022. – Vol. 55. – P. 102820. – DOI: 10.1016/j.addma.2022.102820.
25. Effect of binder saturation and drying time on microstructure and resulting properties of sinter-HIP binder-jet 3D-printed WC-Co composites / A. Mostafaei, P.R. De Vecchis, K.A. Kimes, D. Elhassid, M. Chmielus // Additive Manufacturing. – 2021. – Vol. 46. – P. 102128. – DOI: 10.1016/j.addma.2021.102128.
26. Mechanical and microstructural characterization of WC-Co consolidated by binder jetting additive manufacturing / M. Mariani, I. Goncharov, D. Mariani, G.P. De Gaudenzi, A. Popovich, N. Lecis, M. Vedani // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2021. – Vol. 100. – P. 105639. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2021.105639.
27. Material extrusion-based three-dimensional printing of WC-Co alloy with a paste prepared by powder coating / H. Kim, J.I. Kim, Y.D. Kim, H. Jeong, S.S. Ryu // Additive Manufacturing. – 2022. – Vol. 52. – P. 102679. – DOI: 10.1016/j.addma.2022.102679.
28. Effect of printing parameters on sintered WC-Co components by binder jetting / M. Mariani, D. Mariani, G.P. De Gaudenzi, N. Lecis // European Journal of Materials. – 2022. – Vol. 2 (1). – P. 365–380. – DOI: 10.1080/26889277.2022.2076617.
29. Fused filament fabrication of WC-10Co hardmetals: a study on binder formulations and printing variables / J.D. Rubiano Buitrago, A.F. Gil Plazas, L.A. Boyacá Mendivelso, L.K. Herrera Quintero // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2024. – Vol. 8 (3). – P. 118. – DOI: 10.3390/jmmp8030118.
30. Dependence of density, hardness, strength, and dimensions of WC-15 Co hard alloy samples on the plasticizer content in workpieces obtained using a plastic mold made by 3D printing / M.I. Dvornik, E.A. Mikhailenko, A.A. Burkov, D.A. Kolzun // Inorganic Materials: Applied Research. – 2024. – Vol. 15 (5). – P. 1457–1465. – DOI: 10.1134/S2075113324701132.
31. Возможность использования неразъемной испаряемой пластиковой формы, полученной методом 3D-печати, для формования твердосплавной фрезы / М.И. Дворник, Е.А. Михайленко, А.А. Бурков, Е.В. Черняков // Цветные металлы. – 2025. – № 8. – С. 36–42. – DOI: 10.17580/tsm.2025.08.04.
32. 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. Черняков // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2024. – Т. 18, № 5. – С. 55–65. – DOI: 10.17073/1997-308X-2024-5-55-65.
33. 3D printed plastic molds utilization for WC-15Co cemented carbide cold pressing / M.I. Dvornik, E.A. Mikhailenko, A.A. Burkov, D.A. Kolzun // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2023. – Vol. 115. – P. 106312. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2023.106312.

34. Cast WC-Co alloy-based tool manufacturing using a polymeric mold prepared via digital light processing 3D printing / H. Kim, J.I. Kim, Y.D. Kim, H. Jeong, S.S. Ryu // *Materials Letters*. – 2022. – Vol. 306. – P. 130979. – DOI: 10.1016/j.matlet.2021.130979.

35. Dependence of wear rate of sintered WC and cemented carbides on hardness and cobalt content during free ball micro-abrasive wear test / M.I. Dvornik, O.O. Shichalin, E.A. Mikhailenko, N.M. Vlasova, E.V. Chernyakov // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2025. – Vol. 134. – P. 107495. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2025.107495.

36. Effect of Fe/Ni ratio on the microstructure and properties of WC-Fe-Ni-Co cemented carbides / Y. Gao, B.H. Luo, K.J. He, W.W. Zhang, Z.H. Bai // *Ceramics International*. – 2018. – Vol. 44 (2). – P. 2030–2041. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.10.149.

37. First-principles calculation on the relationships of h-WC/ γ -Fe interface / Z. Shi, S. Liu, Y. Gao, Y. Zhou, Y. Wang, Y. Liu // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. – 2018. – Vol. 123. – P. 11–18. – DOI: 10.1016/j.jpcs.2018.07.006.

38. Effect of solute elements (Cr, Mo, Fe, Co) on the adhesion properties of WC/Ni-based binder interface: A first-principles study / K. Lu, Y. Liu, H. Zhang, Z. Wang, C. Liu, Y. Zhou // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2021. – Vol. 98. – P. 105563. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2021.105563.

39. Gnidenko A.A. First principle simulation of the Co layers behavior on a surface of hexagonal tungsten carbide // *Physics Procedia*. – 2012. – Vol. 23. – P. 132–135. – DOI: 10.1016/j.phpro.2012.01.033.

40. Li H., Zhang H., Jiang Z. Investigation of the effect of partial Co substitution by Ni and Fe on the interface bond strength of WC cemented carbide based on first-principles calculations // *Materials Today Communications*. – 2024. – Vol. 40. – P. 109470. – DOI: 10.1016/j.mtcomm.2024.109470.

41. Fabrication and characterization of WC-AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy composites by spark plasma sintering / W. Luo, Y. Liu, Y. Luo, M. Wu // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2018. – Vol. 754. – P. 163–170. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.04.260.

42. A new hardness model for materials design in cemented carbides / M. Walbrühl, D. Linder, J. Agren, A. Borgenstam // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2018. – Vol. 75. – P. 94–100. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2018.04.004.

43. Effect of WC grain size on mechanical properties and microstructures of cemented carbide with medium entropy alloy Co-Ni-Fe binder / C. Qian, K. Li, X.Y. Guo, B. Liu, Z.Y. Long, Y. Liu // *Journal of Central South University*. – 2020. – Vol. 27 (4). – P. 1146–1157. – DOI: 10.1007/s11771-020-4355-5.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2026 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).

Manufacturing of die components from WC–15Co and WC–5Fe–5Ni–5Co alloys using dies obtained by photopolymer 3D printing

Maksim Dvornik^a, Elena Mikhailenko^b, Nuriya Vlasova^c

Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 153 Tikhookeanskaya Str., Khabarovsk, 680042, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0002-1216-4438>,  maxxxx80@mail.ru; ^b  <https://orcid.org/0000-0002-4515-9109>,  mea80@list.ru;

^c  <https://orcid.org/0000-0003-0198-0912>,  Vlasova64@yandex.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 18 February 2026

Revised: 26 February 2026

Accepted: 23 March 2026

Available online: 15 June 2026

Keywords:

Cemented carbide

Die

Cutting insert

Medium-entropy binder phase

Wear resistance

Funding

The study was carried out under the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 075-00399-26-00.

ABSTRACT

Introduction. Manufacturing steel or carbide dies is an expensive process, significantly impacting the cost of powder metallurgy products, especially in pilot and small-scale production. A promising direction is the use of additive manufacturing for tooling fabrication and the application of alternative, less expensive binders for cemented carbides. **The purpose of this work** is to investigate the feasibility of using additive manufacturing for forming die blanks from WC–15 Co and WC–5 Fe–5 Ni–5 Co cemented carbides and to conduct a comparative analysis of their phase composition, microstructure, density, hardness, fracture toughness, strength, and wear resistance. **Methods.** Die components (dies and punches) made of WC–15 Co and WC–5 Fe–5 Ni–5 Co alloys were fabricated by cold pressing of granulated powders in dies obtained by photopolymer 3D printing (*Water-Wash Resin 2.0*, layer height 20 µm), followed by vacuum sintering at 1,400 °C. A comparative analysis was performed to evaluate the density, phase composition, microstructure, hardness, strength, fracture toughness, and microabrasive wear resistance of the obtained materials. Using the experimental cemented carbide dies, *SNUM-120408* cutting inserts made of WC–6 Co cemented carbide were produced by cold pressing and sintering at 1,450 °C. The insert dimensions were compared with the requirements of *GOST 19052-80*, *GOST 19042-80* and a commercial counterpart. **Results and Discussion.** The fundamental feasibility of manufacturing large-sized cemented carbide die components (weighing up to 210 g) using photopolymer tooling has been experimentally confirmed. The relative density of the components was 99.1% for WC–15 Co and 98.3% for WC–5 Fe–5 Ni–5 Co, which is slightly lower than that of reference samples pressed at higher pressure in a steel die. It is shown that replacing the cobalt binder with a medium-entropy Fe–Ni–Co binder suppresses WC grain growth (average grain size: 1.18 µm vs. 1.40 µm). This, together with the higher hardness of the binder, results in increased alloy hardness (1,070 HV vs. 1,010 HV) and a 10% reduction in the microabrasive wear rate. The manufactured dies produced cutting inserts whose geometric parameters (cutting edge length, thickness, corner radius) and physical and mechanical properties comply with the requirements of *GOST 19052-80* and *GOST 3882-74* and are comparable to commercial counterparts. **Conclusion.** The proposed approach, combining low-cost photopolymer 3D printing for tooling fabrication with the use of a medium-entropy Fe–Ni–Co-bonded cemented carbide, enables the efficient production of functional cemented carbide dies for small-scale production. The WC–5 Fe–5 Ni–5 Co cemented carbide, exhibiting higher hardness and wear resistance, is a promising alternative to the standard WC–15 Co cemented carbide for these operating conditions.

For citation: Dvornik M.I., Mikhailenko E.A., Vlasova N.M. Manufacturing of die components from WC-15Co and WC-5Fe-5Ni-5Co alloys using dies obtained by photopolymer 3D printing. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2026, vol. 28, no. 2, pp. 280–297. DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.2-280-297. (In Russian).

References

1. Dvornik M.I., Mokritsky B. Ya., Zaitsev A.V. Sravnitel'nyi analiz mikroabrazivnoi iznosostoykosti traditsionnykh tverdykh splavov i submikronnogo tverdogo splava WC-8Co-1Cr₃C₂ [Comparative analysis microabrasive wear traditional submicron carbide and tungsten carbide WC-8Co-1Cr₃C₂]. *Voprosy materialovedeniya = Inorganic Materials: Applied Research*, 2015, no. 1 (81), pp. 45–51. (In Russian).
2. Dvornik M.I., Zaitsev A.V. Sravnitel'nyi analiz iznosostoykosti submikronnogo tverdogo splava WC-8Co-1Cr₃C₂ i traditsionnykh tverdykh splavov pri sukhom trenii [Comparative analysis of wear resistance of submicron

* Corresponding author

Mikhailenko Elena A., Ph.D. (Physics and Mathematics), Senior researcher
Khabarovsk Federal Research Center FEB RAS,
153 Tikhookeanskaya Str.,
680042, Khabarovsk, Russian Federation
Tel.: +7 4212 22-69-56, e-mail: mea80@list.ru



hard alloy WC-8Co-1Cr₃C₂ and traditional hard alloys under dry friction]. *Perspektivnye materialy = Inorganic Materials: Applied Research*, 2015, no. 5, pp. 34–41. (In Russian).

3. Efimovich I.A., Zolotukhin I.S., Zav'yalov E.S. Temperaturnyi koeffitsient lineinogo rasshireniya vol'framokobal'tovykh tverdykh splavov [Thermal coefficient of linear expansion of tungsten-cobalt cemented carbide]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 3, pp. 129–140. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.3-129-140.

4. Toshov J.B., Fozilov D.M., Yelemessov K.K., Ruziev U.N., Abdullayev D.N., Baskanbayeva D.D., Bekirova L.R. Povyshenie stoikosti zub'ev burovnykh dolot za schet izmeneniya tekhnologii ikh izgotovleniya [Increasing the durability of drill bit teeth by changing its manufacturing technology]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 4, pp. 112–124. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.4-112-124.

5. Belousova V.P., Popova M.N., Belousov A.L. Ekonomiko-tekhnologicheskie aspekty organizatsii proizvodstva izdelii iz poroshkovykh materialov na mashinostroitel'nykh predpriyatiyakh [Economic technological aspects of organization of articles production manufacture of wares under on nonspecialized machine-building enterprises]. *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov = Composite Materials Constructions*, 2007, no. 4, pp. 122–126.

6. Gent W.E., Busse G.M., House K.Z. The predicted persistence of cobalt in lithium-ion batteries. *Nature Energy*, 2022, vol. 7 (12), pp. 1132–1143. DOI: 10.1038/s41560-022-01129-z.

7. Armstead A.L., Li B. Nanotoxicity: emerging concerns regarding nanomaterial safety and occupational hard metal (WC-Co) nanoparticle exposure. *International Journal of Nanomedicine*, 2016, vol. 11, pp. 6421–6433. DOI: 10.2147/IJN.S121444.

8. Armstead A., Li B. In vitro inflammatory effects of hard metal (WC-Co) nanoparticle exposure. *International Journal of Nanomedicine*, 2016, vol. 11, pp. 6195–6206. DOI: 10.2147/IJN.S121176.

9. Shichalin O.O., Buravlev I.Y., Papynov E.K., Golub A.V., Belov A.A., Buravleva A.A., Yudakov A.A. Comparative study of WC-based hard alloys fabrication via spark plasma sintering using Co, Fe, Ni, Cr, and Ti binders. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2022, vol. 102, p. 105725. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2021.105725.

10. Qian C., Li K., Chen S., Liu Y., Wang B., Liu Y. Fracture behavior of cemented carbides with CoNiFe medium entropy alloy binder. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2021, vol. 98, p. 105547. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2021.105547.

11. Gao Y., Luo B.H., He K.J., Jing H.B., Bai Z.H., Chen W., Zhang W.W. Mechanical properties and microstructure of WC-Fe-Ni-Co cemented carbides prepared by vacuum sintering. *Vacuum*, 2017, vol. 143, pp. 271–282. DOI: 10.1016/j.vacuum.2017.06.028.

12. Chang S.-H., Chang M.-H., Huang K.-T. Study on the sintered characteristics and properties of nanostructured WC-15 wt%(Fe-Ni-Co) and WC-15 wt% Co hard metal alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, vol. 649, pp. 89–95. DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.07.119.

13. Li H., Zhang H., Chen D., Jiang Z. Comparative study of the microstructure and mechanical properties of WC/High-speed steel composite materials prepared with Co, Ni, and Fe binders. *JOM*, 2024, vol. 76 (5), pp. 2120–2131. DOI: 10.1007/s11837-024-06429-1.

14. Soria-Biurrun T., Sánchez-Moreno J.M., Frisk K. Experimental and theoretical study of WC-40Fe-20Co-40Ni. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2022, vol. 102, p. 105719. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2021.105719.

15. Soria-Biurrun T., Sridar S., Frisk K., Xiong W., Sánchez-Moreno J.M. Experimental investigation and thermodynamic modelling of WC-Fe-Ni-Co-Cr cemented carbides. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2024, vol. 124, p. 106824. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2024.106824.

16. Wu J., Ren D., Xie B., He R., Geng Z., Zhang Z., Zhang W. Effect of Cr₃C₂ addition on microstructure and mechanical properties of WC-CoNiFe cemented carbides. *Metals*, 2024, vol. 14 (8), p. 895. DOI: 10.3390/met14080895.

17. Soria-Biurrun T., Lozada-Cabezas L., Navarrete-Cuadrado J., Ibarreta-Lopez F., Martinez-Pampliega R., Sanchez-Moreno J.M. Densification of WC-Fe-Ni-Co-Cr cemented carbides processed by HIP after sintering: effect of WC powder particle size. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2023, vol. 110, p. 105994. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2022.105994.

18. Ovcharenko A.G., Kozlyuk A.Yu., Kurepin M.O. Povyshenie iznosostoikosti plastin iz tverdogo splava [The increase of wear resistance for the hard-facing alloys plates]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2010, no. 2 (47), pp. 13–15.

19. Krinitcyn M., Svarovskaya N.V., Rodkevich N., Ryumin E., Lerner M. Structure and properties of WC-Fe-Ni-Co nanopowder composites for use in additive manufacturing technologies. *Metals*, 2024, vol. 14 (2), p. 167. DOI: 10.3390/met14020167.
20. 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, vol. 84, p. 104980. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2019.104980.
21. 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, vol. 782, pp. 440–450. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.12.187.
22. 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, vol. 527 (29–30), pp. 7585–7592. DOI: 10.1016/j.msea.2010.08.075.
23. Khmyrov R.S., Safronov V.A., Gusarov A.V. Synthesis of nanostructured WC-Co hardmetal by selective laser melting. *Procedia IUTAM*, 2017, vol. 23, pp. 114–119. DOI: 10.1016/j.piutam.2017.06.011.
24. 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, vol. 55, p. 102820. DOI: 10.1016/j.addma.2022.102820.
25. Mostafaei A., De Vecchis P., 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, vol. 46, p. 102128. DOI: 10.1016/j.addma.2021.102128.
26. 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, vol. 100, p. 105639. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2021.105639.
27. Kim H., Kim J.I., Kim Y.D., 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, vol. 52, p. 102679. DOI: 10.1016/j.addma.2022.102679.
28. Mariani M., Mariani D., De Gaudenzi G.P., Lecis N. Effect of printing parameters on sintered WC-Co components by binder jetting. *European Journal of Materials*, 2022, vol. 2 (1), pp. 365–380. DOI: 10.1080/26889277.2022.2076617.
29. Rubiano Buitrago J.D., Gil Plazas A.F., Boyacá Mendivelso L.A., Herrera Quintero L.K. Fused filament fabrication of WC-10Co hardmetals: a study on binder formulations and printing variables. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2024, vol. 8 (3), p. 118. DOI: 10.3390/jmmp8030118.
30. Dvornik M.I., Mikhailenko E.A., Burkov A.A., Kolzun D.A. Dependence of density, hardness, strength, and dimensions of WC-15 Co hard alloy samples on the plasticizer content in workpieces obtained using a plastic mold made by 3D printing. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2024, vol. 15 (5), pp. 1457–1465. DOI: 10.1134/S2075113324701132.
31. Dvornik M.I., Mikhailenko E.A., Burkov A.A., Chernyakov E.V. Vozmozhnost' ispol'zovaniya neraz'emnoi isparyaemoi plastikovoi formy, poluchennoi metodom 3D-pechati, dlya formovaniya tverdosplavnoi frezy [The possibility of using an evaporable plastic block mold made by 3D printing for forming a hard alloy milling cutter]. *Tsvetnye metally*, 2025, no. 8, pp. 36–41. DOI: 10.17580/tsm.2025.08.04. (In Russian).
32. Dvornik M.I., Mikhailenko E.A., Burkov A.A., Chernyakov E.V. Issledovanie kharakteristik rezhushchikh plastin iz tverdogo splava WC-5TiC-10Co, poluchennykh s primeneniem plastikovoi formy, izgotovlennoi metodom 3D-pechati [Investigation of the properties of wc-5tic-10co cutting inserts produced using a 3D-printed plastic mold]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya = Powder Metallurgy and Functional Coatings*, 2024, vol. 18, no. 5, pp. 55–65. DOI: 10.17073/1997-308X-2024-5-55-65.
33. Dvornik M.I., Mikhailenko E.A., Burkov A.A., Kolzun D.A. 3D printed plastic molds utilization for WC-15Co cemented carbide cold pressing. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2023, vol. 115, p. 106312. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2023.106312.
34. Kim H., Kim J.I., Kim Y.D., Jeong H., Ryu S.S. Cast WC-Co alloy-based tool manufacturing using a polymeric mold prepared via digital light processing 3D printing. *Materials Letters*, 2022, vol. 306, p. 130979. DOI: 10.1016/j.matlet.2021.130979.
35. Dvornik M.I., Shichalin O.O., Mikhailenko E.A., Vlasova N.M., Chernyakov E.V. Dependence of wear rate of sintered WC and cemented carbides on hardness and cobalt content during free ball micro-abrasive wear test. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2025, vol. 134, p. 107495. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2025.107495.



36. Gao Y., Luo B.H., He K.J., Zhang W.W., Bai Z.H. Effect of Fe/Ni ratio on the microstructure and properties of WC-Fe-Ni-Co cemented carbides. *Ceramics International*, 2018, vol. 44 (2), pp. 2030–2041. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.10.149.
37. Shi Z., Liu S., Gao Y., Zhou Y., Wang Y., Liu Y. First-principles calculation on the relationships of h-WC/ γ -Fe interface. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2018, vol. 123, pp. 11–18. DOI: 10.1016/j.jpcs.2018.07.006.
38. Lu K., Liu Y., Zhang H., Wang Z., Liu C., Zhou Y. Effect of solute elements (Cr, Mo, Fe, Co) on the adhesion properties of WC/Ni-based binder interface: A first-principles study. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2021, vol. 98, p. 105563. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2021.105563.
39. Gnidenko A.A. First principle simulation of the Co layers behavior on a surface of hexagonal tungsten carbide. *Physics Procedia*, 2012, vol. 23, pp. 132–135. DOI: 10.1016/j.phpro.2012.01.033.
40. Li H., Zhang H., Jiang Z. Investigation of the effect of partial Co substitution by Ni and Fe on the interface bond strength of WC cemented carbide based on first-principles calculations. *Materials Today Communications*, 2024, vol. 40, p. 109470. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2024.109470.
41. Luo W., Liu Y., Luo Y., Wu M. Fabrication and characterization of WC-AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy composites by spark plasma sintering. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, vol. 754, pp. 163–170. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.04.260.
42. Walbrühl M., Linder D., Agren J., Borgenstam A. A new hardness model for materials design in cemented carbides. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2018, vol. 75, pp. 94–100. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2018.04.004.
43. Qian C., Li K., Guo X.Y., Liu B., Long Z.Y., Liu Y. Effect of WC grain size on mechanical properties and microstructures of cemented carbide with medium entropy alloy Co-Ni-Fe binder. *Journal of Central South University*, 2020, vol. 27 (4), pp. 1146–1157. DOI: 10.1007/s11771-020-4355-5.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2026 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).