

8. Nabiev, I. (2021). Strong light-matter coupling for optical switching through the fluorescence and FRET control. *PhysBioSymp 2019. J. Physics: Conference Series...*, 2058, (012001), 1–7.
9. Filatov, Y.D., Sidorko, V.I., Sokhan, S.V. et al. (2023). Roughness of Polished Surfaces of Optoelectronic Components Made of Polymeric Optical Materials. *J. Superhard Mater.*, 45(1), 54–64.
10. Filatov, Yu.D., Boyarintsev, A.Yu, Sidorko, V.I., et al. (2023). Polishing of polystyrene scintillators. *Functional Mater.*, 30(3), 424–430.
11. Poperenko, L.V., & Stashchuk, V.S., *Osnovy fizyky materialiv optotekhniky [Fundamentals of physics of optotechnic materials]*. VPTs Kyivskii universytet [in Ukrainian].
12. Freyk, D.M., Chobaniuk, V.M., Gotra, Z.Iu. et al., *Fizyka protsesiv u napivprovodnykakh ta elementakh elektroniky [Physics of processes in semiconductors and electronic elements]*. Vydavnytstvo Prykarpatskoho natsionalnoho universytetu imeni Vasylia Stefanyka [in Ukrainian].
13. Bardashevskaya, S.D., Budzuliak, I.M., Budzuliak, S.I. et al. (2018). Napivprovodnykovi kvantovi tochky yak materialy dlia lazeriv na ikh osnovi [Semiconductor quantum dots as materials for lasers based on them]. *Fizyka i Khimiia Tverdoho Tila – Solid state physics and chemistry*, 16, 2, 113–129.
14. Korbutiak, D.V., Kovalenko, O.V., Budzuliak, S.I. et al. (2020). *Nanostruktury napivprovodnikovoykh spoluk A₂B₆ [Nanostructures of semiconductor compounds A₂B₆]*. Vydavnytstvo NDU imeni M. Hoholia [in Ukrainian].
15. Saha J., Datta Roy A., Dey D. et al. (2018). Role of quantum dot in designing FRET based sensors. *Materials Today: Proceedings.*, 5(1), 2306–2313.

УДК 621.744

DOI: 10.33839/2708-731X-24-1-354-362

О.О. Матвійчук, канд. техн. наук¹; **Б.М. Савченко**, д-р техн. наук², **В.В. Ярмусевич**³

¹Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська 2, 04074, м. Київ, e-mail: o.o.matviichuk@gmail.com

²Київський національний університет технологій та дизайну, Кафедра хімічних технологій та ресурсозбереження, вул. Немировича-Данченка, 2, кор. 1, м. Київ, Україна

³ТОВ "Ливарна майстерня «ЯРКО» м. Київ, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ СТУПЕНЯ НАПОВНЕННЯ ШЛІКЕРУ З ВОСКУ ТА ПАРАФІНУ ТВЕРДОСПЛАВНОЮ СУМІШШЮ ДЛЯ ІНЖЕКЦІЇ В ЕЛАСТИЧНІ ОБОЛОНКИ

В роботі досліджено вплив ступеня наповнення порошком твердосплавної суміші WC–8% мас. Со воскоподібного шлікеру на його мікротвердість та густину, як критерії здатності до інжекції в виготовлені на основі надрукованих 3D моделей еластичні оболонки за тиску 0,5 бар та температури 90°C. Дослідним шляхом встановлено оптимальний вміст ступеня наповнення шлікеру, необхідний для отримання міцних зразків шляхом інжекції, становить 55–57 % об. Інжекттовані зразки відпалювалися у водні та спікалися по звичайній технології твердосплавного виробництва.

Ключові слова: зв'язуюча система, парафін, бджолиний віск, порошок твердосплавної суміші, 3D-друк прототипів, еластичні оболонки, інжекція.

Вступ

В роботі досліджено можливість виготовлення одиничних складнопрофільних твердосплавних виробів шляхом низькотемпературної інжекції в еластичні оболонки, що були виготовлені на основі надрукованої моделі на 3D принтері методом FDM.

Серійне виробництво твердосплавних виробів обмежене уніфікованими і однотипними формами, які випускаються серійно. В дрібносерійному виробництві швидкий прототайпінг одиничних виробів складної форми або великих розмірів залишається актуальним через високу собівартість розробки та виготовлення сталевих прес-форм. Одним зі шляхів вирішення даної проблеми є формування твердосплавних виробів інжекційним литтям в еластичні оболонки, які виготовлені із застосуванням 3D-принтерних технологій, що полягає в наступному: 1) створення 3D-друком прототипів готових виробів з урахуванням коефіцієнтів усадки і допусків на механічну обробку; 2) виготовлення еластичних оболонок за формою надрукованого прототипу; 3) інжекція в еластичні оболонки прототипів виробів термопластифікованими твердосплавними сумішами; 4) спікання твердосплавних заготовок у вакуумному або захисному середовищі з попередньою відгонкою термопластичного зв'язуючого.

В порошковій металургії інжекційне лиття однорідних та сфероїдизованих металевих або металокерамічних порошків та їх сплавів широко розповсюджене і в літературі відоме під аббревіатурою PIM, MIM, CIM. Критичний огляд цього способу добре висвітлений в [1–6]. На теперішній час актуальним залишається пошук зв'язуючих, які б забезпечували якісну інжекцію мікропорошків за низьких температур [4–6]. Для цих цілей, як правило, використовують суміш полімеру з парафіном, з додаванням стеаринової кислоти. В той же час, використання поліетиленів після їх термодеструкції залишає в сформованих виробках певний відсоток золи, який після спікання нікуди не зникає. Найбільш перспективним легкоплавким зв'язуючим для використання в складі шлікеру є парафін, який має нульову зольність та повністю видаляється під час стадії попереднього спікання. В роботах [4–6] досліджувалися шлікери на основі парафіну, що наповнені як сферичними частинками заліза, так і нанодисперсними металокерамічними частинками з метою оптимізації ступеня наповнення та зниження температури інжекції; в роботах продемонстровано, що процес оптимізації є багатопараметричним та складним. Саме по собі використання парафіну з наповнювачем не забезпечує оптимальний ступінь наповнення, при якому він буде вільно текти не розділяючись, а сформований з частинок каркас – зберігати свою форму після його видалення та спікання. Найкращі результати по створенню легкоплавких шлікерів, які б зменшували розділення компонентів шлікеру з часом – це використання загущувачів, одним з яких може бути бджолиний віск; крім того, такий віск містить в своєму складі жирні кислоти, які можуть виконувати роль поверхнево активних речовин для кращого змочування розвиненої поверхні мікрочастинок наповнювача.

На відміну від однорідних металевих порошків сферичної форми, частинки твердосплавної суміші складаються з частинок неправильної форми, в яких карбідні частинки WC можуть мати розміри в діапазоні 0,5–3,5 мкм, а частинки кобальту або нікелю – близько 1 мкм. Використання таких дрібних порошків твердосплавних сумішей потребує оптимізації їх вмісту в легкоплавкому шлікері для отримання міцних заготовок, які б забезпечили отримання відповідної густини в спечених виробках.

Враховуючи вищевикладене, метою роботи було проведення оптимізації ступеня наповнення легкоплавкого шлікеру на основі суміші парафіну та бджолиного воску твердосплавною сумішшю WC–8% мас. Со для інжекційного лиття в еластичні оболонки, що були отримані по надрукованим 3D-моделям, при низькій температурі та тиску.

Матеріали та методика проведення досліджень

Зв'язуюча система складалася з парафіну марки П2 (П) та бджолиного воску (В). Наповнювачем слугувала твёрдосплавна суміш WC–8% мас. Со з середнім розміром частинок 2–2,5 мкм. У даному випадку віск повинен був надати міцності та виступав загущувачем, знижував осадження моделі після лиття. Співвідношення *парафін / віск* становило: 70/30, 60/40 та 50/50 % об. Вміст наповнювача становив 40, 45, 50, 55, 60 % об.

3D друк моделей для виготовлення форм здійснювали на 3D принтері *Prusa i3*. Моделями слугували прості та складні форми, такі як: циліндр, штапик та фреза (рис. 1).

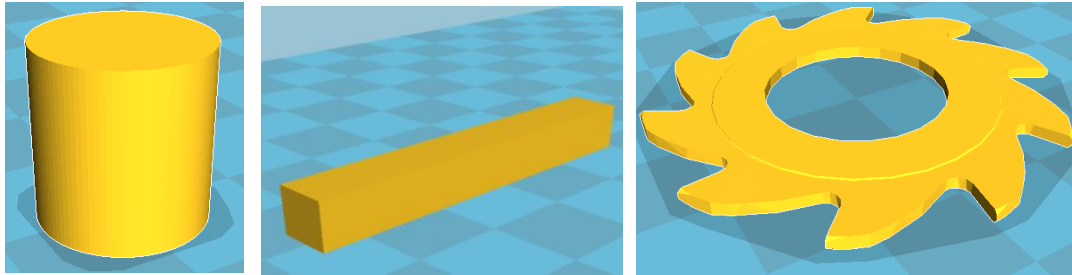


Рис. 1. Моделі для виготовлення еластичних оболонок під інжекційне литво

Форми еластичних оболонок для інжекційного литва виготовляли з двокомпонентних силіконів, якими заливалися надруковані моделі. Методологія виготовлення форм моделей та види матеріалів, які застосовуються для їх виготовлення, приведено в [7]. Після застигання силікону моделі вирізалися майстром таким чином, щоб форма була роз'ємною та мала отвори для виходу повітря. Всі форми містили вільний об'єм для прибутку шлікеру та були перевірені восківкою ювелірним воском (рис. 2) за допомогою інжектора LOGIMEC 1500D (1.5 л) виробництва Італія (рис. 3). Інжектор має електронне регулювання температури до 99 °С з точністю підтримання $\pm 0,1$ °С; максимально можливий тиск до 1,5 атм в інжекторі створюється за допомогою ручного насоса; інжектор оснащений спеціальним клапаном з резервним завантаженням, що забезпечує безперервну струю воску без повітряних бульбашок. Інжекцію здійснювали за температури 90 °С під тиском 0,5 бар.

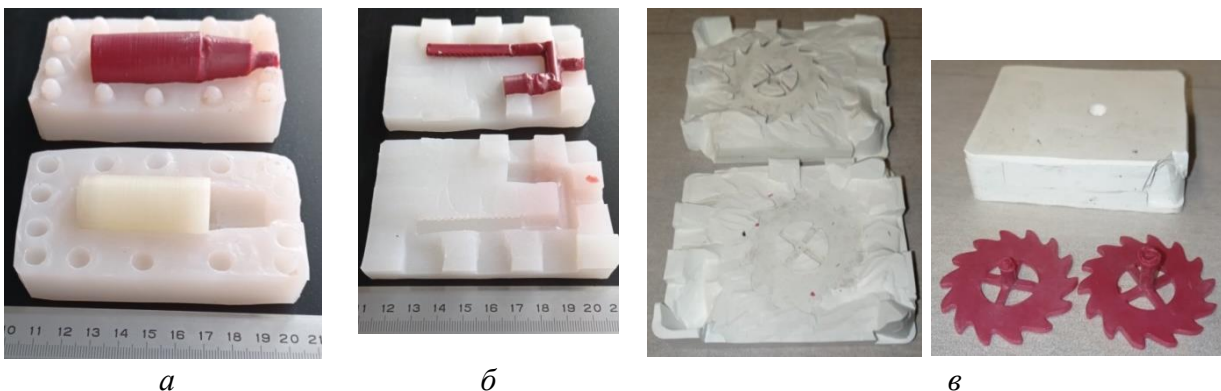


Рис. 2. Розкриті силіконові форми з моделлю та восківкою лиття: циліндр (а), штапик та циліндрик (б), фреза (в)

Приготовлену твердосплавну суміш змішували з воском та парафіном в планетарному млині протягом 10 хв при швидкості 260 об/хв. Приготування термопластичної суміші парафіну з воском та порошком твердосплавної суміші в планетарному млині призводило до її розігріву, плавлення з утворенням крупних гранул, які в подальшому додатково подрібнювали, перетирали через сито з розміром комірки 1–2 мм для повного усереднення; суміш засипали в інжектор, плавили, витримували при температурі лиття деякий час для видалення бульбашок повітря. Зразки сумішей були відлиті у прямокутні форми для вимірювання їх мікротвердості після вистигання та визначення густини.



Рис. 3. Восковий інжектор LOGIMEC 1500D

Оптимізацію вмісту наповнювача здійснювали шляхом вимірювання мікротвердості відливок за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3.

Розрахунок густини композиції. Зазвичай в процесі приготування сумішей зв'язуючого з наповнювачем вміст компонентів беруть у відсотках за об'ємом, тому для розрахунку густини композиції користувалися формулами:

1) визначення концентрації наповнювача за об'ємом

$$C_{\% \text{ об}} = \frac{V_{\text{н}}}{V_{\text{зв}} + V_{\text{н}}}, \quad (1)$$

де $V_{\text{н}}$, $V_{\text{зв}}$ – об'єми наповнювача та зв'язуючого;

2) густина композиції виражатиметься співвідношенням

$$\rho_{\text{к}} = \rho_{\text{зв}} + (\rho_{\text{н}} - \rho_{\text{зв}}) \cdot C_{\% \text{ об}} \quad (2)$$

де $\rho_{\text{зв}}$ та $\rho_{\text{н}}$ – густина зв'язуючого та наповнювача відповідно.

Густину відливок визначали гідростатичним зважуванням; як відрізняють густини зразків, визначені різними методами в композиціях з восковим зв'язуючим, розглянуто в роботі [8].

Результати досліджень та їх обговорення

Виміряні значення мікротвердості, густини та коерцитивної сили відливок суміші парафіну з воском, наповнених порошком WC–8% мас. Со, приведені в табл. 1 та 2. На рис. 4 приведено графічну залежність розрахованої та виміряної експериментально густини зразків від вмісту наповнювача, при співвідношенні парафіну до воску 70/30. З рисунку 4 видно, що виміряні значення густини збігаються з розрахованими лише при ступені наповнення 60 %, що може бути пояснено наявністю вільного об'єму у вигляді закритих пор [6]. На рис. 5 приведено графічну залежність мікротвердості наповненого шлікеру зі співвідношенням парафіну та воску 70/30. Як видно з табл. 1 та рис. 5, зміна вмісту WC–8% мас. Со з 55 до 60 % об. призводить до стрімкого збільшення мікротвердості в два рази з 69 до 140 МПа, в той час як при наповненні від 40 до 55 % вона змінюється полого.

Можна припустити, що при співвідношенні парафіну та воску 70/30 граничний вміст суміші ВК8 становить 55 %. Тому для покращення міцності та пластичності було виготовлено такі ж шлікери зі співвідношенням парафіну та воску 60/40 та 50/50 % об., властивості яких приведено в табл. 2. Побудовані гістограми твердості залежно від вмісту воску в парафіні на рисунку 6 демонструють, що при однаковому вмісті наповнювача додавання воску знижує твердість.

Таблиця 1. Властивості відлитих зразків з різним вмістом суміші WC–8% мас. Со в зв’язуючому, в якому співвідношення П та В: 70/30 % об.

Об’ємний вміст складових, %		Властивості			
WC–8% мас. Со	П/В	Густина розрах/вимір, г/см ³		К.с., кА/м	Тверд. HV ₅₀ , МПа
40	60	6,48	6,50	6,7	24
45	55	7,18	6,90	8,2	31
50	50	7,87	7,50	9,9	42
55	45	8,56	8,10	12,0	69
60	40	9,26	9,30	11,4	140

Таблиця 2. Властивості відлитих зразків з різним вмістом суміші ВК8 в зв’язуючому, в якому співвідношення П та В: 70/30, 60/40 та 50/50 % об., а вміст твёрдосплавної суміші ВК8 55, 57, 60 % об.

Об’ємний вміст складових, %			Властивості			
ВК8	П+В	П/В	Густ. розрах, г/см ³	Густ. Факт., г/см ³	К.с., кА/м	Тверд. HV ₅₀ , МПа
55	45	70/30	8,56	8,10	12,0	69
55	45	60/40	8,56	7,52/ 8,4	11,2	59
55	45	50/50	8,84	8,08/ 8,3	11,3	52
57	43	50/50	9,25	8,73/ 8,8	12,6	83
60	40	50/50	8,56	7,88/ 9,0	12,3	98

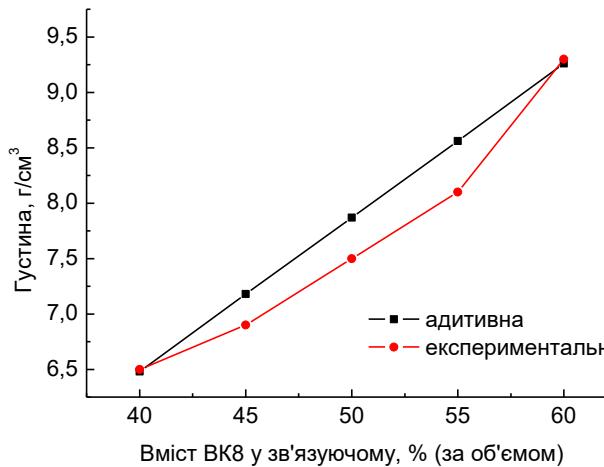


Рис. 4. Залежність розрахованої по формулі адитивності та виміряної експериментально густини відливок від вмісту наповнювача WC–8% мас. Со, при співвідношенні парафіну до воску 70/30

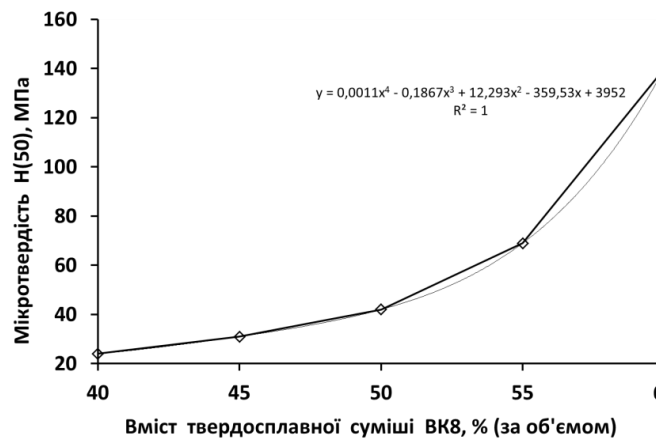


Рис. 5. Мікротвердість відливок в залежності від вмісту WC–8% мас. Со при співвідношенні парафіну до воску 70/30

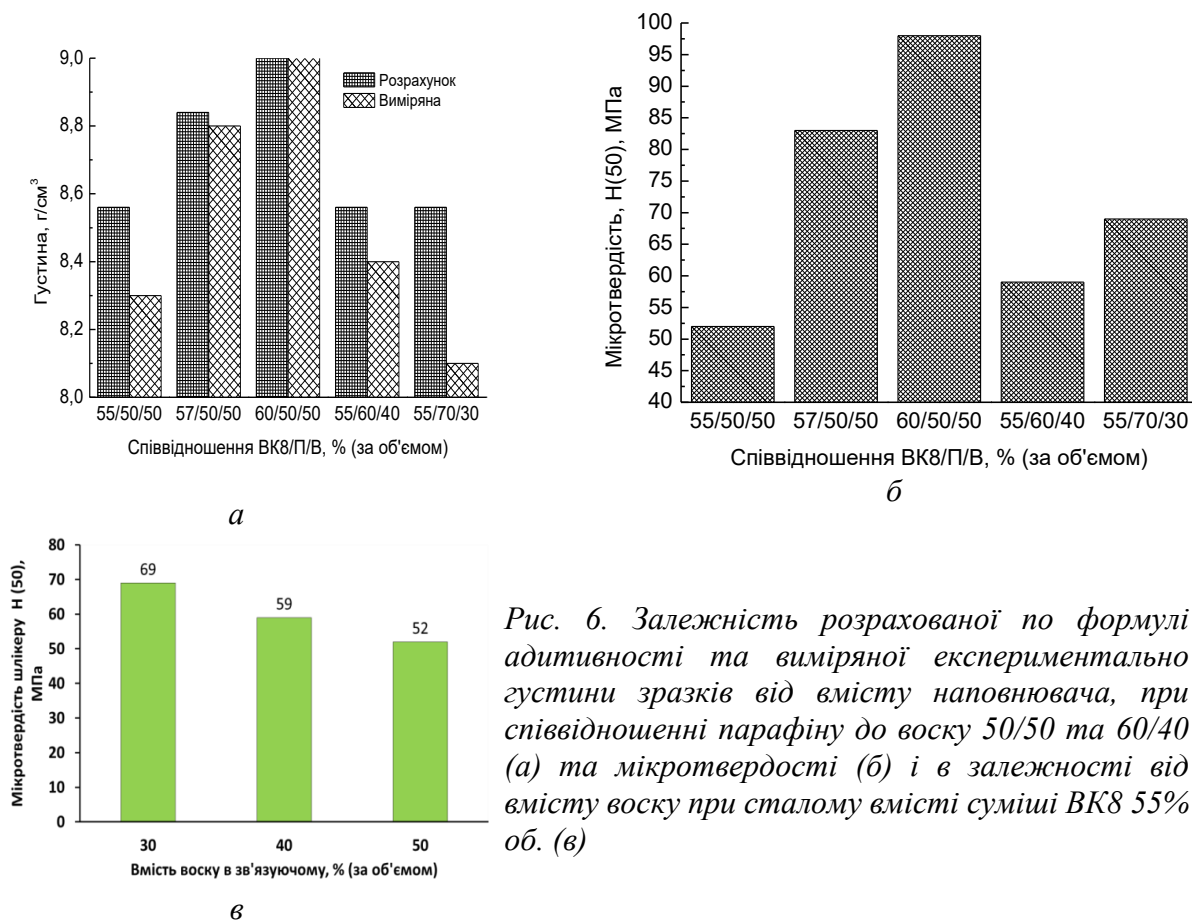


Рис. 6. Залежність розрахованої по формулі адитивності та виміряної експериментально густини зразків від вмісту наповнювача, при співвідношенні парафіну до воску 50/50 та 60/40 (а) та мікротвердості (б) і в залежності від вмісту воску при сталому вмісті суміші ВК8 55% об. (в)

Для випробовування шлікерів були приготовлені суміші з наповненням 60, 57 та 55 % об., де відношення П/В було 50/50, тому що додавання воску знижує мікротвердість. Слід зазначити, що суміші з вмістом наповнювача 60 % об. не утворюють гранул, а лише крупний порошок, тобто суміш не сплавляється від нагріву (рис. 7, а).

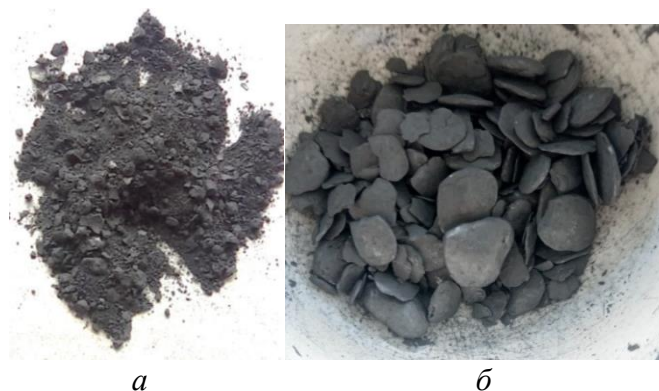


Рис. 7. Результат змішування парафіну з воском та сумішшю ВК8 в планетарному млині: а – вміст наповнювача 60 % об., відношення парафіну до воску: 50/50; б – вилучені гранули при вмісті наповнювача 57 % об., П/В, 50/50.

Утворення сплавлених гранул (роздавлених сфероїдів) ще може відбуватися при вмісті наповнювача 57 % об. (проміжна точка), в інших випадках такі гранули повністю сферичні або наплаваються на розмельні тіла.

На основі встановленого вмісту 57 % об суміші ВК8 у шлікері було проінжектовано виробу у формі фрез (рис. 8). Парафін та віск були відігнані у водневому середовищі при температурі 220 °С [9], а повністю відгонку було завершено при температурі 700-740 °С, спікання

здійснено при 1400 °С також у водневому середовищі. Втрата ваги під час відгонки зі ступенем

наповнення від 55 до 57 % об. змінюється від 4,1 до 5,5 % мас. Вироби з вмістом воску 30 % розсипалися. Необхідно відмітити, що такі тонкі вироби є крихкими, а тому потребують обережного поводження. Причому якісно оцінена міцність таких виробів не залежить від вмісту бджолиного воску. На рисунку 9 показано упаковку виробів після відгонки та спікання.

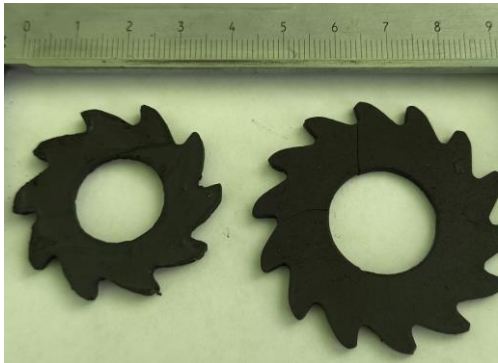


Рис. 8. Тонкі інжектвані вироби різного розміру з вмістом наповнювача 55 (а) та 57 (б) % об.



Рис. 9. Вироби після відгонки зв'язуючого (П/В) (а) та спечені вироби (б) з композиції 55 % ВК8+(50 % П+50 % В)

Після спікання вироби мали густину 13,9–14,0 г/см³ та коерцитивну силу 9,1–9,4 А/см. Оптимальний вміст твёрдосплавної суміші в шлікері, виготовленому на основі воскоподібних речовин для інжекційного формування, не повинен перевищувати 57 % об., що забезпечує низькі тиски інжекції та високу текучість розплаву. Отримане значення об'ємного вмісту наповнювача було близьке до значень, отриманих в роботі [6] для карбонільного заліза (58 % об.), але необхідно враховувати, що такі порошки мають більш однорідний розподіл за розмірами та гладку поверхню, що забезпечує більшу рухливість частинок в розплаві.

Зв'язок між станом поверхні та видом металу розглянуто в роботах [8, 9]. Там чітко продемонстровано, що значення мікротвердості композитів від вмісту наповнювача має неоднозначний характер, що може як збільшуватися, так і зменшуватися, або мати залежності з мінімумом. Тому метод оцінки шлікеру по значеннях мікротвердості для металокерамічних матеріалів може бути застосований лише для малого вмісту металевого зв'язуючого.

Висновки

1. Встановлено, що формування виробів складної форми, а особливо тонкої товщини, може бути здійснено в еластичних оболонках, що виготовлені на основі 3D моделей або надруковані на 3D принтері.

2. Встановлено, що прийнятний вміст середньозернистої твёрдосплавної суміші з малим вмістом зв'язуючого металу у зв'язуючій системі парафін/віск для лиття деталей складної форми, при якому розігріта суміш здатна сама текти і розтікатися по порожнинах форми під дією тиску 0,5 бар, становить 55–57 % об.

3. Одним з критеріїв оптимального вмісту наповнювача в зв'язуючому є його здатність сплавлятися у крупні гранули розміром до 10 мм у діаметрі під час змішування в планетарному млині або ж наплавлятися на розмельні тіла.

4. Використання зв'язуючого парафіну і воску дозволяє отримати легкоплавкі та швидкі в приготуванні композиції для лиття складних форм.

5. Встановлено, що ступінь наповнення значно впливає на значення густини та мікротвердості: фактична густина композитних зразків після лиття менше розрахованої по формулі адитивності при вмісті зв'язуючого в діапазоні від 45 до 57 % об.

6. Отримані експериментальні дані можуть бути розповсюджені на інші подібні системи при створенні шлікерів для низькотемпературного лиття з малим вмістом металу зв'язки в металокерамічній суміші.

O. O. Matviichuk¹, B. M. Savchenko², V. V. Yarmusevich³

¹*V. M. Bakul Institute for Superhard Materials NAS of Ukraine*

²*Kyiv National University of Technologies and Design*

³*YARKO Foundry Workshop LLC*

OPTIMIZATION OF THE DEGREE OF FILLING THE SLIP MADE OF WAX AND PARAFFIN WITH CEMENTED CARBIDE MIXTURE FOR INJECTION INTO ELASTIC SHELLS

The paper examines the influence of the degree of powder filling of the cemented carbide mixture WC–8 wt%. Co waxy slip on its microhardness and density, as criteria for the ability to inject at a pressure of 0.5 bar and a temperature of 90°C into elastic shells made on the basis of 3D printed models. Experimentally, it was established that the optimal content of the degree of filling of the slip needed for obtaining strong samples by injection is 55–57% by volume. The injected samples were annealed in hydrogen and sintered according to the usual technology of hard alloy production.

Key words: binder system, paraffin, beeswax, cemented carbide powder, 3D printing of prototypes, elastic shells, injection.

Література

1. German, R. M. Powder Injection Moulding. Metals Powder Industries Federation. Princeton, New Jersey, USA, 1990. 521 p.
2. German, R.M., Bose, A. Injection Moulding of Metals and Ceramics. Metals Powder Industries Federation, Princeton, New Jersey, USA, 1997. 413 p.
3. González-Gutiérrez J., Stringari G. B., Emri I. Powder injection molding of metal and ceramic parts. *Some Critical Issues for Injection Molding* / Dr. Jian Wang (Ed.). InTech 2012. <https://doi.org/10.5772/38070>.
4. Ивженко В. В., Попов В. А., Сарнавская Г. Ф. Исследование процесса смешивания термопластичных масс на основе порошков тугоплавких соединений и парафина. *Сверхтвердые материалы*. 2008, № 3. Р. 56–61.
5. Ивженко В.В., Попов В.А., Сарнавская Г.Ф. Исследование процессов смешивания и инжекционного литья термопластичных масс на основе нанодисперсных порошков тугоплавких соединений и парафина. *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения*. Сб. науч. тр. Вып. 14. К.: ИМ ім. В.М. Бакуля НАН України, 2011С. 572–578.
6. Tafti A. A., Demers V., Vachon G., Brailovski V. Effect of Binder Constituents and Solids Loading on the Rheological Behavior of Irregular Iron-Based Feedstocks *J. Manuf. Sci. Eng.* 2021. Vol. 143, N3. 031002.
7. Федоров, М. М., Фесенко А. М. Технологія і обладнання ювелірного лиття: підручник для студентів спеціальності «Металургія» спеціалізації «Ювелірне та художнє литво». Краматорськ: ДДМА, 2016. 182 с.
8. Бондаренко В.П., Євдокимова О.В., Матвійчук О.О. Кутах К.Є., Цисар М.О.

Композитний матеріал порошок заліза–парафін для 3D друку методом пошарового наплавлення. *Порошкова металургія*. 2020, № 11/12. С.146–155.

9. Бондаренко В.П., Матвійчук О.О., Хусейн О. О., Кутах К.Є., Євдокимова О. В., Цисар М. О., Гнатенко І. В. Вплив вмісту зв'язуючого на фізико-механічні властивості композитних матеріалів типу порошок металу – воскоподібна речовина. *Науковий вісник івано-франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2020. № 2(49) С. 39–52. [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2020-2\(49\)-39-52](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2020-2(49)-39-52)

Надійшла 09.10.24

Reference

1. German, R. M. (1990). *Powder Injection Moulding*. Metals Powder Industries Federation.
2. German, R.M. & Bose, A. (1997). *Injection Moulding of Metals and Ceramics*. Metals Powder Industries Federation.
3. González-Gutiérrez J., Stringari G. B., & Emri I. (2012). Powder Injection Molding of Metal and Ceramic Parts. *Some Critical Issues for Injection Molding*, Dr. Jian Wang (Ed.). InTech.
4. Ivzhenko, V. B., Popov, V. A., & Sarnavskaia, H. F. (2008). Issledovanie protsessa smeshivaniia termoplastychnykh mass na osnove poroshkov tuhoplavkikh soedinenii i parafina [Investigation of the mixing process of thermoplastic masses based on refractory compound powders and paraffin]. *Sverkhtverdye materialy – Superhard materials*, 3, 56–61 [in Russian].
5. Ivzhenko, V.V., Popov, V.A., & Sarnavskaia, H.F. (2011). issledovanie protsessov smeshivaniia i inzhektsionnoho litia termoplastychnykh mass na osnove nanodispersnykh poroshkov tuhoplavkikh soedinenii i parafina [Investigation of mixing and injection molding of thermoplastic masses based on nanodispersed powders of refractory compounds and paraffin]. *Porodorazrushaiushchii i metalloobrabatyvaiushchii instrument – tekhnika i tekhnologiiia ego izgotovleniia i primeneniia – Rock Destruction and Metal-Working Tools – Techniques and Technology of the Tool Production and Applications*. (14nd Issue, p. 572–578). ISM im. V.N. Bakulia, NAN Ukrainy [in Russian].
6. Tafti A. A., Demers V., Vachon G., Brailovski V. (2021). Effect of Binder Constituents and Solids Loading on the Rheological Behavior of Irregular Iron-Based Feedstocks. *J. Manuf. Sci. Eng*, 143(3), 031002.
7. Fedorov, M. M., Fesenko, A. M. (2016). *Tekhnolohiia i obladnannia yuvelirnoho lyttia [Jewelry casting technology and equipment]*. DDMA.
8. Bondarenko, V. P., Evdokymova, O. V., Matviichuk, O. O, et al. (2021). Iron–Paraffin Composite Material for 3D Printing by Fused Deposition Modeling Method. *Powder Metall Met Ceram.*, 59, 730–738. <https://doi.org/10.1007/s11106-021-00208-2>.
9. Bondarenko, V. P., Matviichuk, O. O, Khuseyn, O. O., et al. (2020). Vplyv vmistu zv'iazuiuchoho na fizyko-mekhanichni vlastyvoli kompozytnykh materialiv typu poroshok metalu – voskopodibna rechovyna [Influence of binder content on physical and mechanical properties of composite materials such as metal powder-waxy substance]. *Naukovyi visnyk ivano-frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu – Scientific Bulletin of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas*, 2(49), 3952. [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2020-2\(49\)-39-52](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2020-2(49)-39-52)