

УДК 621.762

В. В. Ивженко, канд. техн. наук

Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИНЖЕКЦИОННОГО ЛИТЬЯ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ WC-Co

The results are given of technological studies of the injection molding of products from metal-ceramic powders-based thermoplastic mixtures. The results are given of influence of the injection molding parameters on the mechanical properties of WC-Co alloys.

Получение изделий из твердых сплавов сложной формы наиболее перспективно с использованием технологии инъекционного формования (ИФ). Метод ИФ изделий из керамических и металлокерамических материалов заключается в структурообразовании монолитного изделия определенной геометрической формы из порошковых смесей и состоит из 5 этапов [1].

Первый этап – подготовка порошков с необходимыми гранулометрическим составом частиц и морфологией.

Второй этап – получение гомогенных смесей порошков со связующими веществами.

Третий этап – выдавливание через инжектор пластифицированной порошковой массы в пресс-форму, рабочая полость которой соответствует конфигурации формируемого изделия.

Четвертый этап – удаление связующего.

Пятый этап – уплотнение заготовок при температурах спекания порошков.

При инъекционном литье керамических и металлокерамических порошков в качестве связующего обычно применяются термопластичные органические связки. К ним относятся органические вещества, которые способны переходить из твердого состояния в жидкое, из жидкого в твердое в результате нагрева и охлаждения. Выбор состава связки производят исходя из основных требований, предъявляемых к термопластичным массам: минимальная концентрация связующего, необходимая для образования литейной системы; максимальный коэффициент упаковки частиц в системе; минимальная вязкость системы; минимальная объемная усадка; максимальная механическая прочность материала после инъекционного литья. В качестве основы термопластичных связующих для керамических и металлокерамических порошков наиболее приемлемыми являются парафиновые связки [2, 3]. Парафин обладает низкими температурами плавления (51 °С) и кристаллизации (54–55 °С), низкой вязкостью (0,73 Па·с при 70 °С), небольшой величиной объемной усадки при охлаждении (10 %). Для улучшения литейной способности в состав термопластичных связующих вводят поверхностно-активные вещества (ПАВ). В качестве ПАВ в состав парафиновой связки вводятся органические вещества: олеиновая и стеариновая кислоты, животные жиры, пчелиный воск и др. [2].

В наших исследованиях использовался парафин и пчелиный воск. Температура плавления пчелиного воска – 59 °С, температура кристаллизации – 61–63 °С. Соотношение компонентов термопластичной связки составляло: 94 % (по массе) парафина, 6 % (по массе) пчелиного воска. Подготовку термопластичных масс проводили на трехскоростном смесительном устройстве объемом 2 л установки для горячего шликерного литья. При исследовании процесса инъекционного литья использовали установку для инъекционного литья термопластичных масс, имеющую систему вакуумирования рабочего объема [4]. Отгонка связующего осуществлялась в вакуумных шкафах СНВС-4,5 в засыпке из оксида алюминия. Спекание изделий проводилось в трубчатой четырехзонной печи модели 12.092. Для прове-

дения исследований использовался порошок марки BK15 со средним размером частиц 1,1 мкм. Фазовый состав порошка составлял 86 % (по массе) WC, 14 % (по массе) Co.

Инжекционное литье осуществляется путем заполнения металлической формы термопластичной массой, разогретой до заданной температуры, и выдержки под давлением на протяжении времени, необходимого для охлаждения массы в форме. В наших исследованиях использовались пресс-формы для получения изделий размером $32 \times 45 \times 6,3$ мм (объем $9,1 \text{ см}^3$) и $6 \times 6 \times 40$ мм (объем $1,4 \text{ см}^3$). Эксперименты при давлении инжектирования $2 \div 9,5$ МПа проводили на установке для инжекционного литья. Эксперименты при давлении 0,5 МПа проводили на установке для шликерного литья. Время выдержки под давлением после инжектирования массы в пресс-форму составляло 8–10 с [4]. При исследовании процесса проводилась оценка изделий на наличие таких типичных для технологии горячего шликерного литья дефектов, как недолив и неслитины [2]. Недолив – это дефект, вызванный отверждением литейной системы до полного заполнения объема формы. Неслитины – это результат неполноценного слияния нескольких потоков шликера из-за их сильного охлаждения и затверждения поверхностных слоев вещества литейной системы. Плотность и пористость материалов определяли по методике, регламентированной ГОСТ 20018–74. Определение характеристик прочности материалов проводили на универсальной испытательной машине UTS-100 методом трехточечного изгиба на призматических образцах размером $5 \times 5 \times 35$ мм при расстоянии между опорами 30 мм. Скорость нагружения составляла $6,5 \cdot 10^{-5}$ м/с.

Установлено, что при температуре в рабочем цилиндре ($T_{\text{ц}}$) ниже $60 \text{ }^\circ\text{C}$ и исследуемых давлениях формования (0,5–9,5 МПа) впрыскивание термопластичной массы в пресс-форму не происходит. При $T_{\text{ц}} > 82 \text{ }^\circ\text{C}$ наблюдается значительное вспучивание термопластичной массы в питателе установки. В таблице приведены результаты исследования влияния температуры и давления на характер дефектов в модельных изделиях из термопластичных материалов на основе порошка WC–Co.

Для сравнения в таблице представлены также результаты аналогичного исследования модельных изделий из термопластичного материала на основе керамического порошка AlN– Y_2O_3 . Исследования показали, что инжектирование термопластичной массы на основе керамического порошка происходит без видимых дефектов при температурах процесса 68–82 $^\circ\text{C}$. При меньших температурах наблюдаются такие дефекты, как недолив и неслитины. Инжектирование термопластичной массы на основе карбида вольфрама происходит при более низких температурах процесса, а именно – при 62–74 $^\circ\text{C}$. При температуре процесса 76 $^\circ\text{C}$ инжектирование массы в пресс-форму невозможно из-за ее расслоения в объеме рабочего цилиндра на парафин и порошок. Очевидно, такое отличие эффективного интервала температуры инжектирования термопластичных масс на основе керамических и металлокерамических порошков связано с большой разностью в удельном весе порошков: с повышением температуры значительно уменьшается вязкость литейной системы, тяжелые частицы карбида вольфрама не удерживаются молекулярными связями со связующим и оседают под действием силы тяжести.

На рис. 1 представлены результаты исследования зависимости плотности термопластичного материала на основе карбида вольфрама от давления инжектирования при температурах процесса 62; 68; 74 $^\circ\text{C}$. Плотность материала увеличивается на ~3,5 % с увеличением давления от 0,5 до 7–9,5 МПа при температуре 68 $^\circ\text{C}$. При этом в 3–4 раза уменьшается разброс значений плотности образцов. С увеличением температуры процесса с 68 до 74 $^\circ\text{C}$ плотность уменьшается и разброс значений плотности увеличивается.

Влияние режимов инъекционного литья на характер дефектов в модельных изделиях из термопластичных материалов

Характеристика термопластичной массы	Температура формования, °С	Давление формования, МПа	Дефект	
Состав шихты: 95 % AlN–5 % Y ₂ O ₃ Средний размер частиц порошка 1,2 мкм Весовое содержание связующего 11,6 % Объемное содержание связующего 32,4 % Вязкость 26 Н·с/м ²	60	0,5	Нет заполнения	
		2,0	Недолив	
		9,5	Недолив	
	62	0,5	Нет заполнения	
		2,0	Неслитины	
		9,5	Неслитины	
	68	0,5	Нет дефектов	
		2,0	Нет дефектов	
	82	0,5	Нет дефектов	
		2,0	Нет дефектов	
	Состав шихты: 85 % WC–15 % Co Средний размер частиц порошка 1,1 мкм Весовое содержание связующего 5,5 % Объемное содержание связующего 47,5 % Вязкость 24 Н·с/м ²	60	0,5	Нет заполнения
			2,0	Неслитины
9,5			Неслитины	
62		0,5	Нет дефектов	
		2,0	Нет дефектов	
74		0,5	Нет дефектов	
		2,0	Нет дефектов	
76		0,5	Расслоение массы	
		9,5	Расслоение массы	

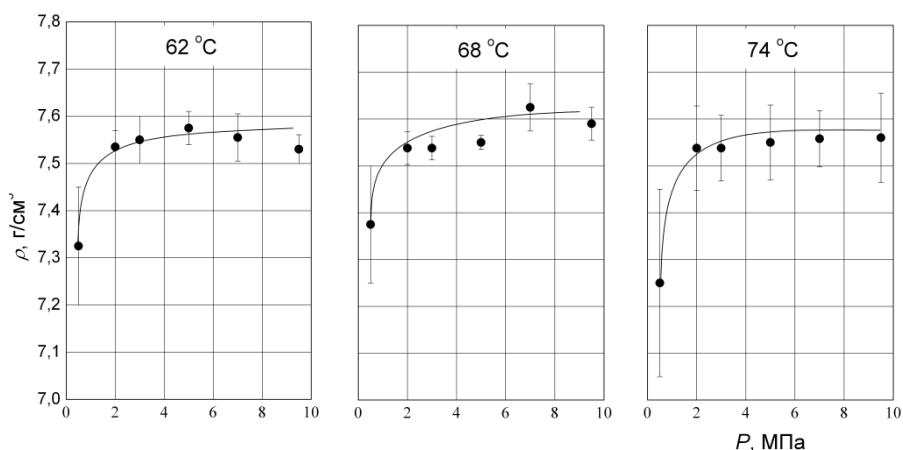


Рис. 1. Зависимость плотности (ρ) термопластичных материалов 52,5 % (по объему) (WC–Co) – 47,5 % (по объему) парафина от давления инъектирования (P) при температурах процесса 62 °С; 68 °С; 74 °С.

На рис. 2 представлены результаты исследования зависимости предела прочности при изгибе термопластичного материала на основе карбида вольфрама от давления инжектирования при различных температурах процесса. Прочность материала, полученного при 62 °С, увеличивается на ~ 11 % с увеличением давления от 0,5 до 3–9,5 МПа. Более высокие значения прочности материала получены при температуре 68 °С и давлениях 3–5 МПа. При давлениях формования 5–9,5 МПа наблюдается падение прочности термопластичного материала. Прочность материала, полученного при 74 °С, уменьшается на ~ 12 % с увеличением давления от 0,5 до 9,5 МПа.

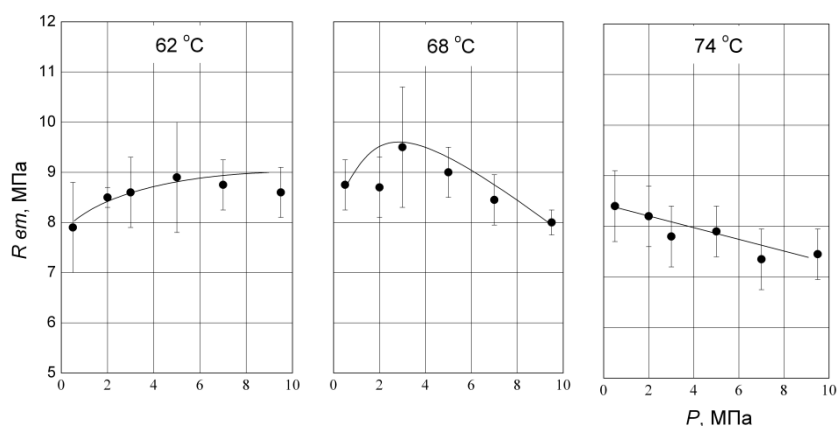


Рис. 2. Зависимость предела прочности при изгибе (R_{em}) термопластичных материалов 52,5 об. % (WC–Co) – 47,5 % (по объему) парафина от давления инжектирования (P) при температурах процесса 62 °С; 68 °С; 74 °С.

Такой характер зависимости предела прочности при изгибе от давления формования материала при температурах процесса 68 и 74 °С связан с явлением упругого последействия [6].

На рис. 3 представлена зависимость изменения размеров модельных изделий из термопластичного материала на основе карбида вольфрама от давления инжектирования. С увеличением давления усадка уменьшается, а при давлениях 7–9,5 МПа и температуре процесса 74 °С она уменьшается более чем в два раза. В результате упругого последействия напряжения, которые возникают в термопластичном материале, приводят к микрорастрескиванию и снижению прочности материала.

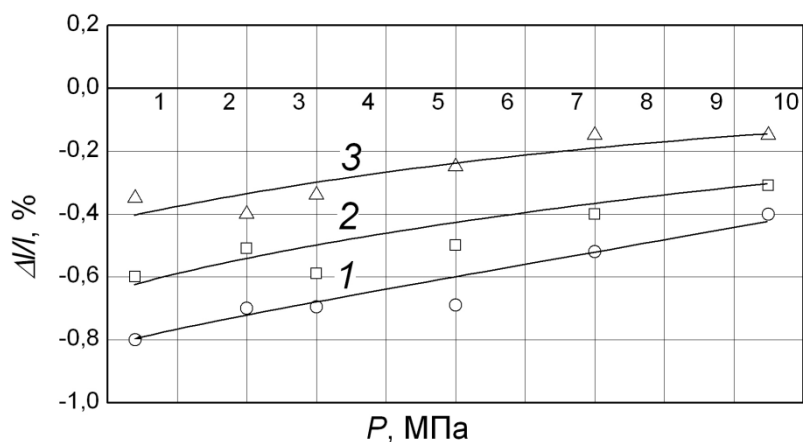


Рис. 3. Зависимость изменения размеров модельных изделий ($\Delta l/l$) из термопластичного материала 52,5 % (по объему) (WC–Co) – 47,5 % (по объему) парафина при охлаждении пресс-форм от давления инжектирования (P) при температурах процесса: 1 – $T_{ц}$ = 62 °С; 2 – $T_{ц}$ = 68 °С; 3 – $T_{ц}$ = 74 °С.

В результате проведенных исследований можно сделать вывод, что основными параметрами, которые определяют эффективность инжектирования, является уровень температуры в рабочем тракте. Определен эффективный градиент температуры для получения термопластичных материалов на основе металлокерамических порошков (62–76 °С). При более низких температурах процесс инжектирования не реализуется или проходит с технологическими дефектами (недолив, неслитины). При более высоких температурах в связи с расслоением термопластичной массы процесс невозможен. Установлено, что при увеличении давления инжектирования уменьшается усадка модельных изделий. Этот эффект является следствием упругого последействия материала после снятия давления. Определено, что упругое последействие снижает механические свойства термопластичного материала из-за микрорастрескивания. Исследования зависимостей плотности и предела прочности при изгибе от давления инжектирования показали, что на формирование механических свойств термопластичного материала влияют два фактора, которые действуют в противоположных направлениях: увеличение плотности и увеличение упругого последействия при увеличении давления инжектирования.

На рис. 4 представлены результаты исследования зависимости плотности твердого сплава 85 % (по массе) WC–15 % (по массе) Co от давления формования при инъекционном литье. При увеличении давления от 0,5 до 2–9,5 МПа плотность материала увеличивается на 2,5–4,5 %. Разброс значений уменьшается в 3–5 раз. При этом наиболее высокие значения плотности получены на образцах, инжектированных при температуре 68 °С и давлении 3–9,5 МПа: плотность материала образцов составляет 13,58–13,84 г/см³. При температуре инжектирования 74 °С получены наиболее низкие значения плотности во всем исследуемом диапазоне давлений, однако при этом рост плотности при увеличении давления от 0,5 до 9,5 МПа составляет 4,5 %.

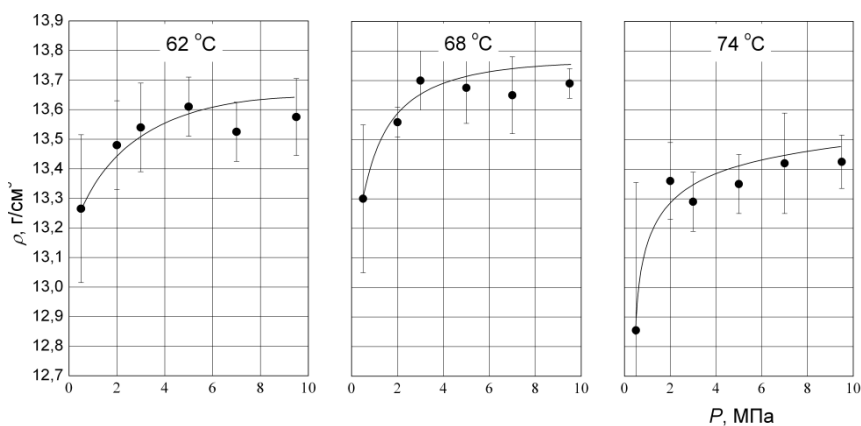


Рис. 4. Зависимость плотности материалов (ρ) 85 % (по массе) WC–15 % (по массе) Co от давления формования (P) при температурах процесса 62 °С; 68 °С; 74 °С.

На рис. 5 представлены результаты исследования зависимости предела прочности при изгибе твердого сплава 85 мас. % WC–15 % (по массе) Co от давления формования при инъекционном литье.

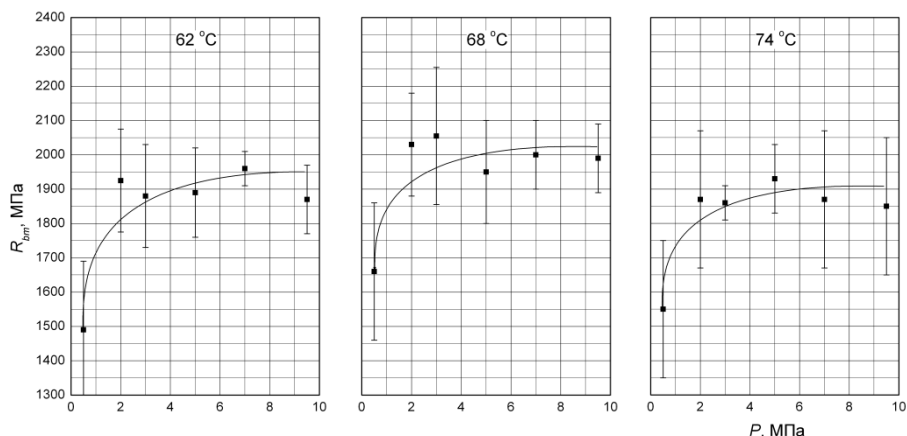


Рис. 5. Зависимость предела прочности при изгибе (R_{bm}) материала 85 % (по массе) WC–15 % (по массе) Co от давления формования (P) при температурах процесса 62 °C; 68 °C; 74 °C.

При увеличении давления от 0,5 до 2–9,5 МПа прочность материала увеличивается на 24–33 %. При этом наиболее высокие результаты (1900–2300 МПа) получены на образцах, инжестированных при температуре 68 °C (согласно ГОСТ 3882–74 «Спеченные твердые сплавы», предел прочности при изгибе для марки твердого сплава ВК15 должен составлять 1900 МПа). При повышении температуры с 68 до 74 °C предел прочности при изгибе уменьшается на 5–10 % (плотность твердых сплавов уменьшается на 1–2 %). Таким образом, с увеличением температуры инжестирования механические свойства твердых сплавов возрастают до определенной величины температуры процесса.

На рис. 6 представлены результаты исследования зависимости твердости по Виккерсу твердого сплава 85 % (по массе) WC–15 % (по массе) Co от давления формования при инжестивном литье.

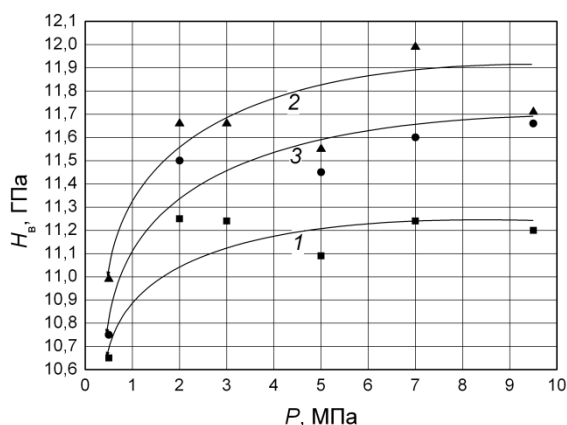


Рис. 6. Зависимость твердости (H_v) материала 85 % (по массе) WC – 15 % (по массе) Co от давления формования (P) при температурах процесса: 62 °C (1); 68 °C (2); 74 °C (3).

При увеличении давления от 0,5 до 2–9,5 МПа твердость материала увеличивается на 8–12 %. При этом более высокие значения твердости наблюдаются в образцах, полученных при температурах инжестирования 68 °C и 74 °C. Исследование твердости материалов по Роквеллу показали, что эта характеристика для всех образцов, полученных при давлении 2–9,5 МПа, практически одинакова и составляет 86–87 HRA (согласно ГОСТ 3882–74 «Спеченные твердые сплавы», твердость твердого сплава ВК15 должна составлять 86,0 HRA).

Таким образом, наиболее оптимальной температурой процесса инъекционного литья термопластичных масс на основе порошка карбида вольфрама является 68 °С. При более высоких температурах происходит изменение в литейных свойствах термопластичной массы из-за расслоения частиц порошка WC и парафина. Это приводит к неоднородности термопластичного материала, неравномерной усадке при спекании и, в результате, к неоднородности спеченного твердого сплава.

На основании проведенных исследований можно сделать заключение, что основными параметрами технологии ИФ твердых сплавов являются температура и давление при инъекционном литье, которые определяют коэффициент упаковки, однородность структуры термопластичного материала и механические свойства твердого сплава.

Литература

1. Powder injection molding / German r. m. // Metal Powd. Industr. Fed. (MPIF), Princeton, USA. – 1990. – 521 p.
2. Грибовский П. О. Керамические твердые схемы. – М.: Энергия, 1971. – 448 с.
3. Li Y., Huang B., Qu X. Viscosity and melt rheology of metal injection moulding feedstocks // Powder Metallurgy. – 1999. – 42, N. 1. – P. 86–90.
4. Новиков Н. В., Ивженко В. В., Попов В. А. и др. Оборудование для инъекционного литья термопластичных масс на основе керамических и металлокерамических порошков // Порошковая металлургия. – 2004. – № 9–10. – С. 119–127.
5. Новиков Н. В., Ивженко В. В., Лещук А. А. и др. Экспериментальные исследования и моделирование инъекционного литья изделий сложных форм из технической керамики // Сверхтв. материалы. – 2004. – № 5. – С. 3–19.
6. Технологическое исследование закономерностей инъекционного формования изделий сложной формы из технической керамики и компьютерная оптимизация процесса: Отчет о НИР / ИСМ НАН Украины. – № ГР 0101U006189. – К., 2005. – 153 с.

Поступила 05.07.07.