

Моделирование течения металлических смесей в литейной форме
Simulation of the flow of metal mixtures in the mold

Коротченко А.Ю., Голенков Ю.В., Тверской М.В., Хилков Д.Э.

Korotchenko A.J., Golenkov J.V., Tverskoy M.V., Khilkov D.E.

Аннотация

В статье рассмотрены факторы, влияющие на качество отливок при литье под давлением. Показан многокомпонентный состав металлических смесей, приведены основные характеристики каждого из трех компонентов металлической смеси и их влияние на характер ее течения при литье под давлением.

Ключевые слова: МИМ технология, литье под давлением, металлическая смесь, реология, модели вязкости, скорость сдвига.

Summary

The article considers factors affecting the quality of castings under pressure. Shown a multi-component composition of the metal mixtures, the main characteristics of each of the three components of the metal mixture and their influence on the character of its flow in injection molding.

Key words

MIM technology, injection molding, feedstock, rheology, viscosity models, the shear rate.

Сведения об авторах: Коротченко А.Ю. – д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Литейных технологий» МГТУ им. Н.Э. Баумана, e-mail: kor_15@mail.ru; Голенков Ю.В. – технический директор АО «РПК»; Тверской М.В. – магистрант кафедры «Литейных технологий» МГТУ им. Н.Э. Баумана; Хилков Д.Э. – аспирант той же кафедры.

В работе [1] дано описание технологии литья металлических порошков (МИМ технология), которая позволяет расширить область применения способа литья под давлением для отливок из высокотемпературных сплавов (прежде всего различные марки сталей, сплавы на основе титана, молибдена, сплавы железа с никелем).

Отливки, полученные по МИМ технологии, обладают высокой размерной точностью, повышенными механическими свойствами, высокой чистотой поверхности. Однако чтобы получить отливки с заданными служебными свойствами, необходимо учесть влияние целого ряда факторов, действующих на каждом из четырех этапов технологического цикла изготовления отливок.

В данной статье будет рассмотрен только один этап – этап литья под давлением. Факторы, определяющие качество литья на этом этапе, приведены в табл.1.

Таблица 1

Температурные факторы				
Температура формы	пресс-	Температура расплава в цилиндре (4 зоны)	Скорость вращения	шнека
Скоростные факторы				
Скорость вращения шнека (набор дозы)			Расход подачи расплава (впрыск)	
Силовые факторы				
Противодавление шнека	Давление выдержки	Усилие смыкания пресс-формы	Усилие прилегание сопла	Уплотнение смеси при наборе дозы
Временные факторы				
Время охлаждения отливки	Время задержки дозирования	Время выдержки под давлением	Время задержки впрыска	

Определить степень влияния каждого из факторов, представленных в табл.1, на качество литья и разработать методики управления этими факторами можно двумя путями - экспериментально и теоретически. В настоящей работе остановимся на теоретическом пути исследования особенностей течения металлических смесей в полостях пресс-формы.

Определим, прежде всего, объект исследования. В научно - производственном центре «Технологии инжекционного литья МГТУ им. Н.Э. Баумана» в настоящее время реализован техпроцесс, основанный на металлических смесях немецкой фирмой BASF. Металлические смеси данной фирмы состоят из 40 – 70 % (по объему) из металлического порошка и на 30 – 60 % из связующего, которое в свою очередь на 80 – 98 % (по массе) состоит из полиацетала и на 2 – 20 % из нерастворимого полимера (полиэтилен, полипропилен, полистирол).

Рассмотрим основные характеристики компонентов металлической смеси, и их влияние на характер течения металлической смеси при литье под давлением.

Металлические порошки характеризуются, прежде всего, диаметром частиц, максимальный размер которых обычно не превышает 20 мкм. Средний же размер частиц составляет порядка 5 мкм. В общем случае гранулометрический состав порошка определяется тремя значениями диаметров: d_{10} , d_{50} и d_{90} , которые соответствуют средним значениям 10% порошка от всего объема, 50% и 90% соответственно.

Еще одна важная характеристика - конфигурация частиц. Для снижения сопротивления течения при ЛПД и шероховатости поверхности конечных изделий стремятся использовать частицы со сферической поверхностью.

Для получения частиц порошка используется целый ряд методов, среди которых восстановление из оксидов и водных растворов; плазменная, центробежная и газовая атомизация (распыление); химическая диссоциация карбониллов и др. На рис.1 показана типичная кривая распределения частиц порошка по фракциям и форма получаемых частиц порошка.

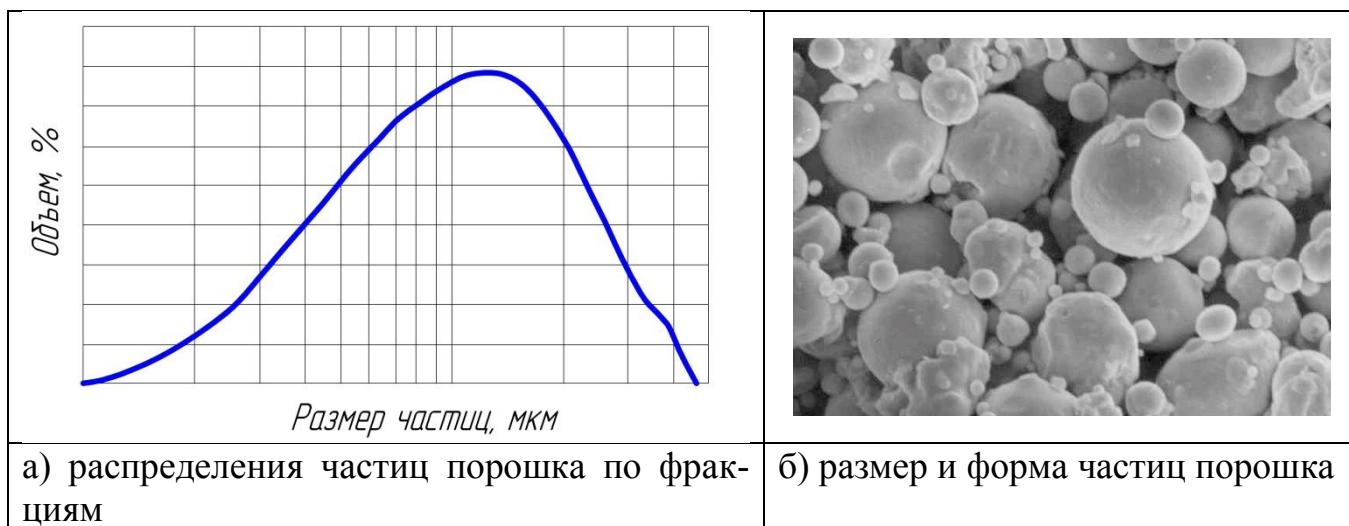


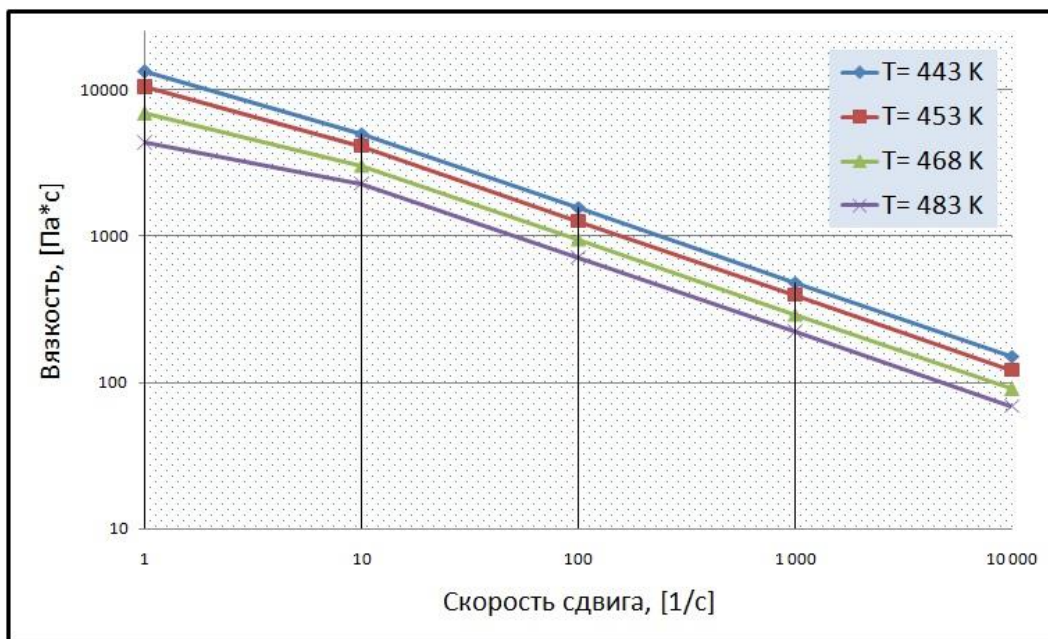
Рис.1. Характеристики порошка

Гранулометрический состав и конфигурация частиц порошка – вот два фактора, которые определяют такие ключевые свойства металлической смеси как вязкость смеси, процент порошка в объеме смеси (долю твердой фазы) и спекаемость смеси. Доля твердой фазы напрямую связана с точностью геометрии конечных изделий. Чем выше доля твердой фазы, тем меньше усадка деталей при спекании, тем выше размерная точность. Но при этом возрастает вязкость металлической смеси (проблемы при ЛПД) и при высокой доле порошка возрастает вероятность образования пустот между частицами, не заполненных связующим полимером, что может привести к нарушению связей между частицами и вызвать искажения в конфигурации деталей.

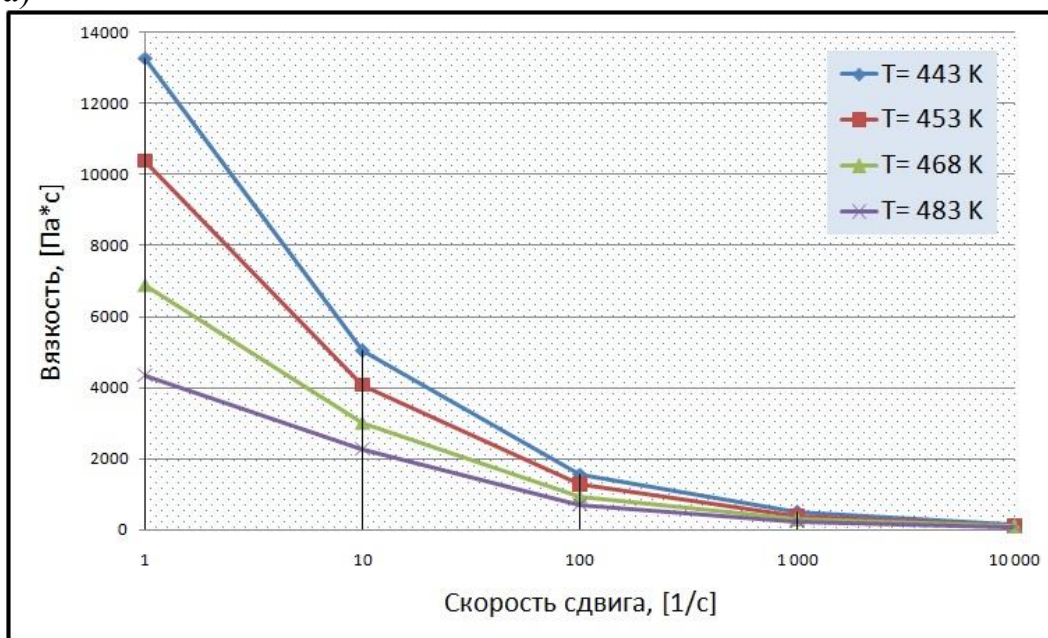
Полимер в металлической смеси выступает в роли связующего, основные задачи которого – это перемещение порошка по технологической цепочке изготовления детали; придание необходимой манипуляторной прочности сырой детали и сохранение прочности детали после выплавки основной части связующего. Количество полимера в смеси должно быть с одной стороны как можно меньше (снижается усадка деталей при спекании), а с другой стороны не ниже объема, необходимого для заполнения всех пустот между частицами и придания необходимой прочности детали на промежуточных этапах ее изготовления.

Итак, металлическая смесь состоит из нескольких компонентов, среди которых сложные полимеры и металлические порошки. Описание течения металлической смеси под действием внешней нагрузки возможно с помощью математического аппарата, разработанного в реологии. Согласно [2], реальные жидкости представляют собой сложные реологические тела, и металлическая смесь обладает всеми основными реологическими свойствами – упругостью, вязкостью и пластичностью.

В многочисленных работах, посвященных изучению течения металлических смесей (далее просто смесей), особое внимание уделяется вязкости смеси и изменению вязкости при изменении скорости сдвига и температуры. Для изучения течения используются вискозиметры различных типов, а для измерения теплоты, выделяющейся при течении, калориметры. На рис.2,а показаны типичные зависимости вязкости смеси от скорости сдвига и температуры смеси [3].



а)



б)

Рис.2. Зависимость вязкости смеси от скорости сдвига и температуры

Характер кривых на рис.2 показывает, что смеси можно отнести к неньютоновским жидкостям (напряжения сдвига не пропорциональны скоростям сдвига), обладающим свойством тиксотропии (вязкость уменьшается с увеличением скоростей сдвига). Кривые, изображенные на рис.2,а даны в логарифмических координатах. Многие исследователи выделяют три характерные области на этих кривых. В первой области, с малыми скоростями сдвига, имеет место ньютоновское поведение смеси. Вторая область – нелинейное уменьшение вязкости, и третья область – область повторного ньютоновского поведения.

На рис.2,б показаны эти же кривые, только по оси ординат отложены абсолютные значения. Хорошо видно, что даже при малых скоростях сдвига вязкость существенно изменяется, и говорить о ньютоновском поведении смеси не приходится.

Для описания этих особенностей предложен целый ряд моделей, одной из которых является выражение для зависимости эффективной вязкости η от скорости сдвига $\dot{\gamma}$, предложенное Карро [3]: $\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = [1 + (\lambda \dot{\gamma})^2]^{(n-1)/2}$, где η_0 и η_∞ есть вязкости при бесконечно малых и больших скоростях сдвига соответственно; λ - характеристическая константа с размерностью времени; n - эмпирическая постоянная. Значение η_0 определяется так же, как и в модели Кросса: $\eta_0 = \text{Веpr}(T_b/T) \exp(\beta p)$, где B , T_b и β - константы; T и p - температура смеси и внешнее давление соответственно, а значение λ находится из выражения $\lambda = \eta_0 / \tau^*$, где τ^* - характеристическое напряжение сдвига.

Модели Карро и Кросса описывают течения жидкостей при любых, сколь угодно малых напряжениях сдвига. Однако, как показал целый ряд экспериментов, у металлических смесей существует предел текучести τ_Y , и если действующие напряжения сдвига меньше этого предела, то смесь ведет себя как твердое тело (течение отсутствует). Таким образом, металлические смеси относятся к вязкопластическим телам. Для описания вязкопластического поведения предлагается много моделей. Наиболее часто упоминаются модели Бингама $\tau = \tau_Y + \eta_p \dot{\gamma}$ и Хершеля - Балкли $\tau = \tau_Y + K \dot{\gamma}^n$ [3], где η_p - пластическая вязкость; K и n - константы. Пластическая вязкость в этих моделях отлична от эффективной вязкости и является ее составной частью.

Приведенные здесь модели вязкого и пластического поведения жидкостей получены в условиях одномерного течения. Для моделирования двух- и трехмерного течений используемые модели, кроме всего прочего, должны быть сформулированы еще и в инвариантной форме [3].

Таким образом, при моделировании течения смесей в полостях пресс-форм литья под давлением необходимо учесть целый ряд факторов, среди которых вязкое и пластическое течение, неньютоновское поведение смеси, явление тиксотропии, наличие двух- и трехмерного течений, учет теплоты, выделяющейся при течении; полное или частичное (проскальзывание) прилипание смеси к стенкам каналов и др.

На кафедре «Литейных технологий» МГТУ им. Н.Э. Баумана более десяти лет для моделирования литейных процессов используется пакет программ FLOW-3D. Данный пакет относится к группе CFD (Computational Fluid Dynamics) программ и предоставляет средства моделирования течений для инженеров, исследующих динамику поведения жидкостей и газов в широком диапазоне промышленных приложений и физических процессов. В данном пакете отражены все физические процессы, позволяющие учесть все вышеизложенные факторы, имеющие место при течении смесей в полостях пресс-форм литья под давлением.

Так, вязкое течение описывается моделью, которое в расчетах было приведено к виду, предложенному Карро. Значения вязкости в зависимости от скорости сдвига и температуры в расчетах подчинялись кривым, показанным на рис.2.

Для описания вязкопластического поведения смеси в пакете FLOW-3D предусмотрена возможность задания пользователем любой реологической модели. По умолчанию заложена модель, которая является разновидностью моделей

Бингама – Шведова. Эта модель состоит из трех элементов: последовательно соединенных упругого и пластического тел в параллель с вязким телом. Данная модель и использовалась в дальнейших расчетах. Из литературных источников были выбраны значения модуля сдвига равного $2,9 \times 10^8$ Па и предела текучести $6,53 \times 10^6$ Па.

Перед тем как моделировать заполнение смесью реальных пресс-форм, необходимо удостовериться в адекватности расчетных данных практике. С этой целью на экспериментальном стенде был реализован процесс заполнения прозрачной формы свободной струей смеси. Результаты экспериментов показаны на рис.3.



Рис.3. Заполнение формы на стенде

На рис.3 представлены последовательные (слева – направо) кадры видеосъемки заполнения формы смесью. Видно как струя, выйдя из сопла, сохраняет свою форму и заполняет полость в виде жгута, послойно наматываясь снизу вверх. Данный эксперимент наглядно подтверждает наличие у смеси не только вязких, но и упругих и пластических свойств и говорит о сложном характере течения смеси в форме.

После проведения серии экспериментов, был выполнен расчет заполнения смеси в пакете FLOW– 3D. Краевые условия в расчете соответствовали эксперименту; упругие, вязкие и пластические свойства задавались по моделям, описанным выше. Теплофизические свойства взяты из литературных источников и равнялись свойствам смесей марки Catamold немецкой фирмы BASF. Результаты расчетов показаны на рис.4.

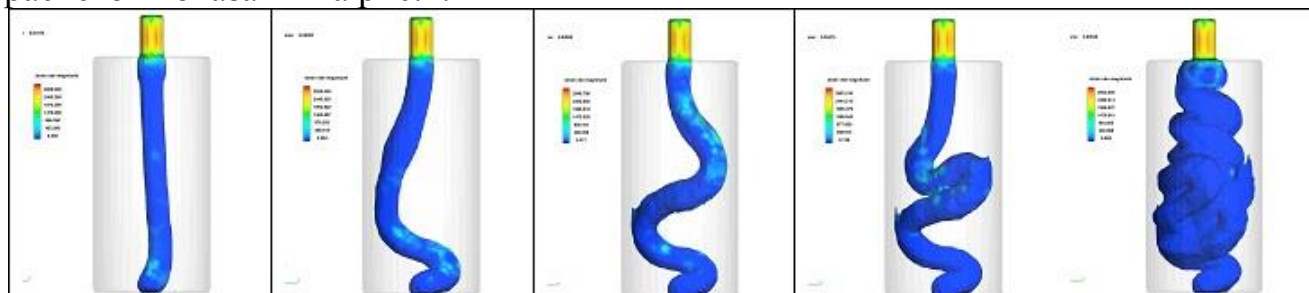


Рис.4. Моделирование заполнения формы в пакете FLOW– 3D

Сравнив результаты расчетов с натурными испытаниями можно говорить о том, что в расчете адекватно воспроизводятся основные особенности струйного течения металлических смесей в полости формы. Таким образом, выбранные расчетные схемы, физические модели и исходные значения параметров позволяют адекватно моделировать упруго вязкопластическое течение металлической смеси в полостях пресс-форм при литье под давлением.

Список литературы

1. Коротченко А.Ю., Турунтаев И.В., Тверской М.В., Хилков Д.Э. Развитие специальных способов литья // Литейное производство - 2017. №2. - С.21-25.
2. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: концепции, методы, приложения / Пер. с англ. – СПб.: ЦОП «Профессия» – 2010. – 560 с.
3. Bilovol V. V. Mould filling simulations during powder injection moulding / Ph. D. Thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands – 2003. -142 с.