

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ИНЖЕКЦИОННОГО ЛИТЬЯ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВЫХ СМЕСЕЙ****М.В. Тверской**

tversk@mail.ru

SPIN-код: 9409-5925

А.А. Хилкова

kanastasiya_93@mail.ru

SPIN-код: 6320-6323

Д.Э. Хилков

dmitry.hilckov@yandex.ru

SPIN-код: 5567-4791

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация**Аннотация**

Определены реологические свойства металлических порошковых смесей, предназначенных для применения МИМ-технологии. Показаны модели вязкости, которые способны описать поведение металлических порошковых смесей. Приведены результаты определения показателя текучести расплава при различных значениях температуры металлической порошковой смеси с помощью пластометра ИИРТ-5м. Построены зависимости вязкости смеси от скорости сдвига. Рассчитаны значения энергии активации металлической порошковой смеси с использованием уравнения Аррениуса. Для анализа и сравнения рассмотрены четыре состава металлических смесей: три состава смеси зарубежной фирмы Basf марки Catamold и одна смесь, разработанная в лаборатории кафедры «Литейные технологии».

Ключевые слова

МИМ-технология, литье под давлением, вязкость, металлическая смесь, показатель текучести расплава, скорость сдвига, уравнение Аррениуса, энергия активации

Поступила в редакцию 17.10.2018

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

МИМ-технология (metal injection molding) основана на литье металлических порошковых смесей (фидстоков). Данная технология является составной частью более общей РИМ-технологии (powder injection molding), которая, помимо литья металлических порошков, включает также литье керамических порошков (СИМ-технология). Первые упоминания о данной технологии относятся к 80-м годам прошлого столетия. Основное назначение технологии — массовое изготовление сложных по геометрии отливок небольших масс и размеров. В последние несколько лет литье металлических порошков успешно развивается благодаря ряду особенностей, выделяющих этот способ литья среди других уже давно используемых в промышленности специальных способов литья [1].

Исследуемая порошковая композиция состоит из металлического порошка и связующего. В качестве связующего используются полимеры: полиацеталь, полиэтилен высокого давления и стеариновая кислота. Основные характеристики металлической смеси представлены в работе [2].

Одним из наиболее важных параметров металлической смеси служит вязкость. Чистый полимер в расплавленном состоянии ведет себя как неньютоновская жидкость и проявляет вязкопластические свойства [3]. С увеличением скорости сдвига уменьшается вязкость полимера. Металлическая смесь ведет себя подобным образом, но имеет бóльшую вязкость, чем чистый полимер [4].

Эксперименты по изучению вязкости фидстоков проводили на капиллярном реометре ROSAND RH10 английской фирмы Malvern. В экспериментах определяли динамическую вязкость в зависимости от скорости сдвига при рабочей температуре 190 °С. Результаты экспериментов показаны на рис. 1. Зависимости вязкости от скорости сдвига представлены для двух марок металлических смесей фирмы BASF (Catamold 42CrMo4, Catamold 316L) и одной отечественной смеси (сталь 40ХМА).

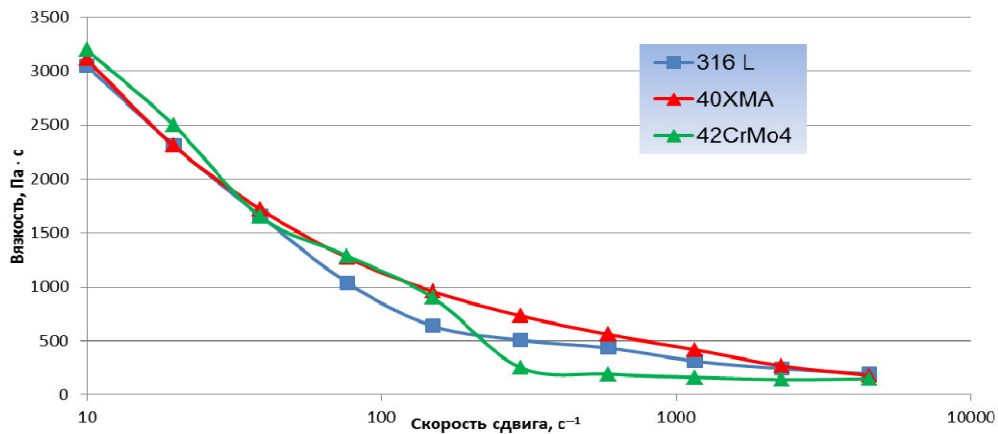


Рис. 1. Зависимость вязкости от скорости сдвига

Полученные графические зависимости вязкости от скорости сдвига можно разделить на три области. Первая область с небольшими скоростями сдвига характеризуется практически ньютоновским поведением смеси. Во второй области происходит нелинейное уменьшение вязкости, а в третьей области наблюдается повторение ньютоновского поведения [5].

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:

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = [1 + \lambda \dot{\gamma}]^{-(n-1)/2},$$

где η_0 и η_{∞} — 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: $\eta_0 = B \exp(T_b / T) \cdot \exp(\beta p)$, здесь B , T_b и β — константы; T и p — темпера-

тура смеси и внешнее давление соответственно, а значение λ определяется из выражения $\lambda = \eta_0 / \tau^*$, где τ^* — характеристическое напряжение сдвига [6].

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) [7]. Таким образом, металлические смеси относятся к вязкопластическим телам.

Для описания вязкопластического поведения предлагается много моделей. Наиболее часто применяют модели Бингама $\tau = \tau_Y + \eta_p \dot{\gamma}$ и Хершеля — Балкли $\tau = \tau_Y + K \dot{\gamma}^n$, где η_p — пластическая вязкость; K и n — константы. Пластическая вязкость в этих моделях отлична от эффективной вязкости и является ее составной частью [8].

Еще одна характеристика, которую стоит отметить — это показатель текучести расплава (ПТР), что соответствует английскому melt mass-flow rate (MFI). Косвенно значение ПТР характеризует реологические свойства фидстока, и прежде всего его вязкость. Согласно ГОСТ 11645–73 (зарубежные аналоги ISO 1133 и ASTM 1238), ПТР соответствует массе материала в граммах, экструдированного из прибора в течение 10 мин при заданных значениях температуры и давления.

Значение ПТР в эксперименте определяли с помощью пластометра ИИРТ-5м. Диаметр капилляра составлял 2,095 мм, приложенная нагрузка соответствовала 21,6 кг. Указанные значения диаметра и нагрузки были равны тем значениям, используемым фирмой BASF при определении ПТР фидстоков марки Catamold. Для сравнения значение ПТР определяли при трех значениях температуры 180, 190 и 200 °С для фидстоков четырех марок — фидстоков Catamold 42CrMo4, 316L, 420W и фидстока на основе стали 40ХМА. Результаты экспериментов показаны в таблице.

Значения показателя текучести расплавов, г/10 мин

Температура, °С	Catamold 42CrMo4	Catamold 316L	Catamold 420W	Сталь 40ХМА
180	253	218	608	243
190	400	330	756	285
200	516	437	960	408

Для фидстоков марки Catamold полученные значения ПТР находятся в пределах технических характеристик, приводимых фирмой BASF [9]. Наилучшей текучестью обладает фидсток Catamold 420W, ПТР которого превышает значения ПТР других фидстоков более чем в 2 раза. При температуре 190 °С фирмой для Catamold 42CrMo4 указано значение ПТР, равное 350, и допустимый разброс значений ПТР имеет диапазон 200...500. Сравнивая данные таблицы,

можно отметить снижение ПТР для фидстока на основе стали 40ХМА, что может быть связано, в частности, с увеличением размера частиц порошка.

Полученные значения ПТР при различных температурах использовали для построения зависимости натурального логарифма ПТР и обратной температуры (рис. 2). Полученные зависимости можно аппроксимировать и привести к линейному виду. Наклон аппроксимирующих прямых позволяет определить энергию активации течения расплавов фидстоков, используя уравнение Аррениуса [10]

$$k(T) = A \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right).$$

Приведем данное уравнение к линейному виду

$$\ln(k) = -\frac{E_A}{R} \cdot \frac{1}{T} + \ln(A)$$

или представим его в общем виде

$$y(x) = ax + b.$$

Из этого следует, что коэффициенты $a = -\frac{E_A}{R}$, $b = \ln(A)$, а аргумент $x = \frac{1}{T}$, где E_A — энергия активации; $R = 8,314$ Дж/(моль·К) — универсальная газовая постоянная; T — температура; A — предэкспоненциальный множитель, который определяется видом реакции.

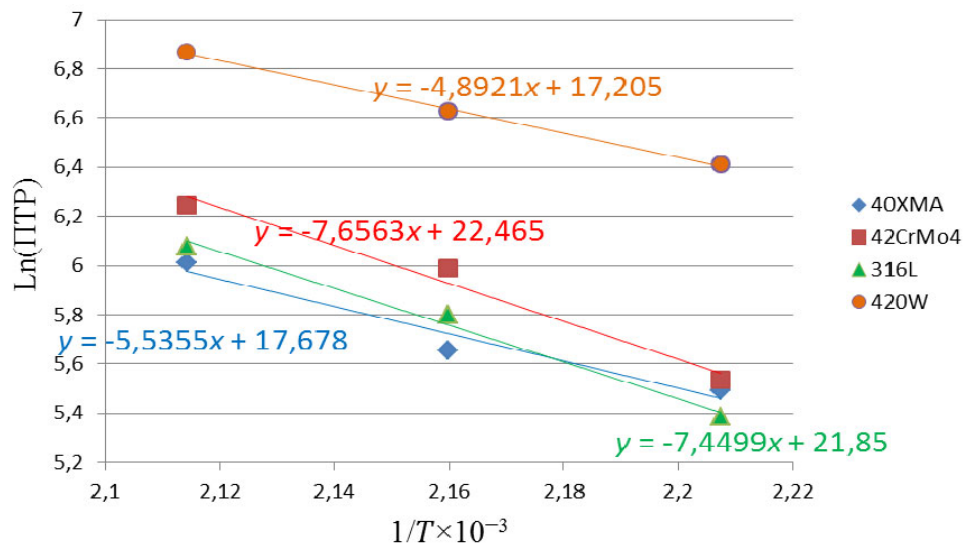


Рис. 2. Зависимость натурального логарифма ПТР и обратной температуры

С математической точки зрения, энергия активации — это произведение тангенса угла наклона прямой и универсальной газовой постоянной. Результаты рассчитанных значений энергии активации для всех рассматриваемых фидстоков приведены ниже:

Марка фидстока	Catamold 316L	Catamold 420W	Catamold 42CrMo4	40ХМА
E_{A} , кДж\моль	61	41	64	46

Как физический параметр, энергия активации показывает степень зависимости вязкости от температуры. Чем больше значение энергии активации, тем более чувствителен материал к температуре [11]. Эксперименты показали, что сталь 40ХМА имеет меньшую энергию активации, чем зарубежный аналог 42CrMo4. Поэтому небольшие колебания температуры и давления в процессе формования изделия на ТПА вызывают резкое изменение вязкости, но не приводят к концентрации напряжений, трещин и искажений в отливомой детали.

Литература

- [1] Коротченко А.Ю., Турунтаев И.В., Тверской М.В., Хилков Д.Э. Развитие специальных способов литья. *Литейное производство*, 2017, № 2, с. 21–24.
- [2] Коротченко А.Ю., Котомин С.В., Тверской М.В., Хилков Д.Э. Разработка нового состава металлической порошковой смеси для литья под давлением. *Литейное производство*, 2018, № 2, с. 23–27.
- [3] Heaney D.F. *Handbook of metal injection molding*. Woodhead Publishing, 2012, 604 p.
- [4] Малкин А.Я., Исаев А.И. *Реология: концепция, методы, приложения*. Санкт-Петербург, Профессия, 2010, 560 с.
- [5] Коротченко А.Ю., Голенков Ю.В., Тверской М.В., Хилков Д.Э. Моделирование течения металлических смесей в литейной форме. *Литейное производство*, 2017, № 5, с. 18–22.
- [6] Bilolov V.V., Kowalski L., Duszcyk J., Katgerman L. The effect of constitutive description of PIM feedstock viscosity in numerical analysis of the powder injection molding process. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, vol. 178, no. 1-3, pp. 194–199.
- [7] Fester V., Slatter P., Alderman N. Resistance coefficients for non-Newtonian flows in pipe fittings. URL: <http://www.intechopen.com/books/rheology/resistance-coefficients-for-non-newtonian-flows-in-pipe-fittings> (дата обращения 20.09.2018).
- [8] Bilovol V.V. *Mould filling simulations during powder injection moulding*. Ph. D. Thesis. Delft, The Netherlands, Delft University of Technology, 2003, 142 p.
- [9] Калинин Э.Л., Саковцева М.Б. *Свойства и переработка термопластов*. Ленинград, Химия, 1983, 288 с.
- [10] Mohamad Nora N.H., Muhamad N., Ismail M.H., Jamaludin K.R., Ahmad S., Ibrahim M.H.J. Flow behavior to determine the defects of green part in metal injection molding. *IJMMME*, 2009, vol. 24, no. 1, pp. 70–75.
- [11] Azaman N.E.B., Raza M.R., Muhamad N., Akhtar M.N., Bakar A.S. Rheological study of copper and copper grapheme feedstock for powder injection molding. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 790, no. 1, art. 012008.

Тверской Михаил Вадимович — аспирант кафедры «Литейные технологии», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Хилкова Анастасия Андреевна — аспирант кафедры «Литейные технологии», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Хилков Дмитрий Эдуардович — аспирант кафедры «Литейные технологии», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Коротченко Андрей Юрьевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Литейные технологии», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

STUDY OF PARTICULARITIES OF METAL POWDER MIXTURES INJECTION MOLDING

M.V. Tverskoi

tversk@mail.ru

SPIN-code: 9409-5925

A.A. Khilkova

kanastasiya_93@mail.ru

SPIN-code: 6320-6323

D.E. Khilkov

dmitry.hilckov@yandex.ru

SPIN-code: 5567-4791

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The rheological properties of the metal powder mixtures used in MIM-technology are defined. The viscosity models capable of describing the behavior of metallic powder mixtures are presented. The results of measuring metal powder mixtures melt flow index at different mixture temperatures using tester IIRT-5m are given. The relationships between the mixture viscosity and shear rate are plotted. The metal powder mixture activation energy values are calculated using Arrhenius equation. Four metallic mixtures were compared and analyzed: 3 mixtures of the product line Catamold produced by BASF and the mixture created in the laboratory of the department of Casting Technology.

Keywords

MIM-technology, injection molding, viscosity, metallic mixture, melt flow index, shear rate, Arrhenius equation, activation energy

Received 17.10.2018

© Bauman Moscow State Technical University, 2018

References

- [1] Korotchenko A.Yu., Turuntaev I.V., Tverskoy M.V., Khilkov D.E. The development of special methods of casting. *Liteynoe proizvodstvo* [Foundry. Technologies and Equipment], 2017, no. 2, pp. 21–24.
- [2] Korotchenko A.Yu., Kotomin S.V., Tverskoy M.V., Khilkov D.E. The development of a new composition of the metal powder mixture to injection molding. *Liteynoe proizvodstvo* [Foundry. Technologies and Equipment], 2018, no. 2, pp. 23–27.
- [3] Heaney D.F. Handbook of metal injection molding. Woodhead Publishing, 2012, 604 p.
- [4] Malkin A.Ya., Isaev A.I. Reologiya: kontseptsiya, metody, prilozheniya [Rheology: conception, methods, applications]. Sankt-Petersburg, Professiya publ., 2010, 560 p.
- [5] Korotchenko A.Yu., Golenkov Yu.V., Tverskoy M.V., Khilkov D.E. Simulation of the flow of metal mixtures in the mold. *Liteynoe proizvodstvo* [Foundry. Technologies and Equipment], 2017, no. 5, pp. 18–22.
- [6] Bilolov V.V., Kowalski L., Duszcyk J., Katgerman L. The effect of constitutive description of PIM feedstock viscosity in numerical analysis of the powder injection molding process. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, vol. 178, no. 1-3, pp. 194–199.
- [7] Fester V., Slatter P., Alderman N. Resistance coefficients for non-Newtonian flows in pipe fittings. Available at: <http://www.intechopen.com/books/rheology/resistance-coefficients-for-non-newtonian-flows-in-pipe-fittings> (accessed 20 September 2018).

- [8] Bilovol V.V. Mould filling simulations during powder injection moulding. Ph. D. Thesis. Delft, The Netherlands, Delft University of Technology, 2003, 142 p.
- [9] Kalinchev E.L., Sakovtseva M.B. Svoystva i pererabotka termoplastov [Properties and recycling of thermoplastics]. Leningrad, Khimiya publ., 1983, 288 p.
- [10] Mohamad Nora N.H., Muhamad N., Ismail M.H., Jamaludin K.R., Ahmad S., Ibrahim M.H.J. Flow behavior to determine the defects of green part in metal injection molding. *IJMME*, 2009, vol. 24, no. 1, pp. 70–75.
- [11] Azaman N.E.B., Raza M.R., Muhamad N., Akhtar M.N., Bakar A.S. Rheological study of copper and copper grapheme feedstock for powder injection molding. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 790, no. 1, art. 012008.

Tverskoi M.V. — Postgraduate student, Department of Casting Technology, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Khilkova A.A. — Postgraduate student, Department of Casting Technology, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Khilkov D.E. — Postgraduate student, Department of Casting Technology, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Korotchenko A. U., Doc. Sc. (eng), head of the Department of Casting Technology, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.