

**УДК 621.74.043.2**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ УВЕЛИЧЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МІМ-ТЕХНОЛОГИЕЙ**

Мороз Роман Алексеевич

*Магистр 1 год,  
кафедра «Литейные технологии»  
Московский государственный технический университет*

*Научный руководитель: Д.Э. Хилков,  
кандидат наук, МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедра "Литейные технологии"*

МІМ-технология (Metal Injection Molding) — перспективный метод производства сложных металлических деталей с высокой точностью и минимальной постобработкой. Технологический процесс изготовления готовых изделий состоит из нескольких этапов: изготовление термопластического шликера, получение литых заготовок («сырых» деталей), удаление связующего, спекание готового изделия. Однако ключевым ограничением технологии остаётся низкая плотность «сырых» деталей на стадии литья под давлением на ТПА (термопластавтомате), что приводит к значительной усадке, которая может достигать 20%. В работе проведён анализ современных методов повышения плотности и предложены инновационные решения, направленные на оптимизацию процесса и расширение области применения МІМ.

Основной акцент сделан на увеличении плотности упаковки металлического порошка в «сырой» детали. Традиционные методы включают оптимизацию параметров литья (температуры, давления, скорости впрыска), использование бимодальных порошков, где сочетание частиц разного размера теоретически повышает плотность до 82–83% [1, 2]. Однако на практике агломерация мелких частиц и неравномерное распределение фракций ограничивают эффективность таких подходов. Также важную роль играет морфология порошка: сферические частицы малых размеров и с низкой шероховатостью демонстрируют лучшую упаковку, но их стоимость и сложность получения ограничивают целесообразность применения. Ещё одним направлением стало использование низковязких связующих и добавок, снижающих трение между частицами. Это позволяет увеличить загрузку порошка до 75% без ухудшения реологических свойств суспензии, но стоит отметить, что универсального подхода к решению, поставленной задачи нет. Для каждого материала и геометрии детали требуется индивидуальный подход. Поэтому данная тема представляет множество возможностей для проведения научных исследований.

В работе предлагаются инновационные методы, которые гипотетически позволяют увеличить плотность «сырой» детали. Один из них — предварительное удаление связующего через узкие элементы формы в виде перфорированных стенок в пресс-форме (Рис. 1).

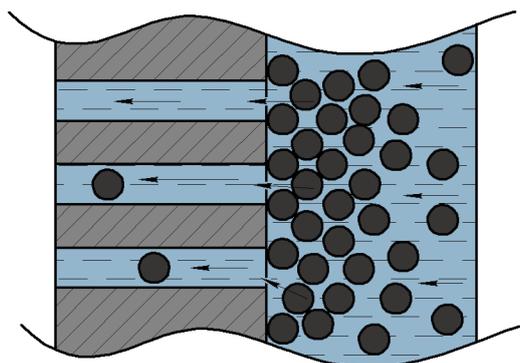


Рис. 1. Уплотнение фильтрованием

Это позволит снизить объём связующего в заготовке без потери формы, увеличив долю металлического порошка. Размер перфораций, рекомендуется брать меньше диаметра основной фракции порошка. Однако, исследования фильтрационных процессов, показывают, что даже при больших размерах канала образуется «мост» из частиц, препятствующий выносу порошка [3]. Для решения поставленной задачи рассмотрен накопленный опыт из теории фильтрации. Также предлагается улучшить предыдущий метод за счёт вакуумирования со стороны фильтра, что может дополнительно помочь удалению связки в случаях, когда вязкость связующего не позволяет эффективно выдавливать полимер из полости формы.

Другой метод — применение магнитного поля для ориентации игольчатых ферромагнитных частиц (например, в сплавах NdFeB или для некоторых сталей), что теоретически должно улучшить плотность упаковки частиц (Рис. 2).

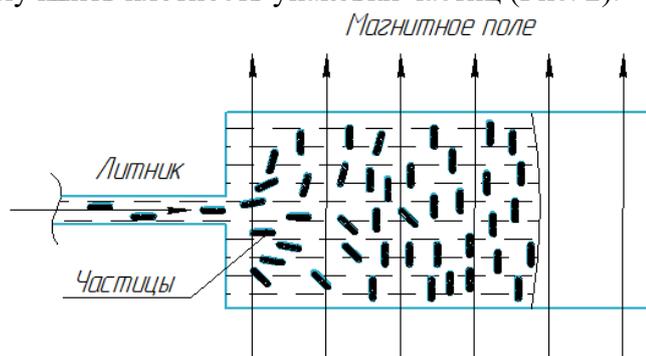


Рис. 2. Ориентация частиц в процессе литья

Хотя эксперименты демонстрируют успешную ориентацию частиц для инъекционного литья [4], для МИМ-процессов требуются дополнительные исследования из-за более высокой концентрации частиц в суспензии.

## Литература

1. Mityukov, A.V.; Govorov, V.A.; Malkin, A.Y.; Kulichikhin, V.G. Rheology of Highly Concentrated Suspensions with a Bimodal Size Distribution of Solid Particles for Powder Injection Molding. *Polymers* 2021, 13, 2709. <https://doi.org/10.3390/polym13162709>
2. Klas Boivie, Limits of Loose Metal Powder Density in the Sinterstation. <http://dx.doi.org/10.26153/tsw/3319>
3. Белоглазов И.Н., Голубев В.О. Основы расчета фильтрационных процессов. – М.: Издательский дом «Руда и Металлы», 2002. – 210 с., ил.
4. Sahbi Aloui, Mohammed El Yaagoubi, Bernhard Münster, Dietmar Schwegler, Influence of the magnetic field during injection molding on the mechanical behavior of thermoplastic copolyester elastomers filled with strontium ferrite, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 351, 2023, 114177, ISSN 0924-4247, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114177>