

# ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

## МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

«Физическая мезомеханика.

Материалы с многоуровневой иерархически  
организованной структурой и интеллектуальные  
производственные технологии»

6–10 сентября 2021 г.

Томск, Россия

DOI: 10.17223/978-5-907442-03-0-2021-247

## ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРЫ ПРИ СПЕКАНИИ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ 316L, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ FDM ИЗ МЕТАЛЛ-ПОЛИМЕРНОГО ФИДСТОКА

<sup>1,2</sup>Торопков Н.Е., <sup>1,2</sup>Креницын М.Г., <sup>1</sup>Лернер М.И.

<sup>1</sup>*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск*

Нержавеющая сталь 316L – один из наиболее широко используемых сплавов для изготовления деталей в машиностроении, медицине, авиакосмической промышленности и других отраслях. [1]. Порошки сплава 316L используются при производстве деталей различными методами порошковой металлургии, в том числе и методом литья под давлением (PIM-технология) [2,3]. Термопластические композиции на основе металлического порошка с полимерным связующим (сырьем) используются в процессе PIM, сочетающем традиционное литье полимеров под давлением и процесс спекания порошка.

Одной из наиболее распространенных технологий аддитивного получения изделий на сегодня является технология FDM. Технология подразумевает послойную печать расплавленной полимерной нитью (филаментом) и, благодаря технической простоте, доступности материалов и низких затратах на обслуживание, принтеры, работающие по этой технологии, получили широкое распространение не только в промышленности, но и в быту. Однако, ограниченность только полимерными материалами существенно сужает сферы применения FDM-принтеров.

Использование металлонаполненных филаментов позволяет получать металлические изделия методом FDM без усложнения конструкции принтера [4,5]. Для получения металлического изделия полимер удаляют из напечатанного изделия химически либо термически, после чего спекают металлический порошок. Для уменьшения усадки изделий, наполненность полимера металлическим порошком должна быть не менее 60% по объему, однако при такой плотности наполнения возможно застраивание порошка в сопле принтера в процессе печати.

Проблема может быть решена при использовании наноразмерных порошков, однако полимер-металлическая композиция с нанопорошком металла обладает низкой текучестью при расплавлении полимера. Экспериментально было показано, что проблема решается при использовании бимодального нано-микро порошка [6]. При использовании такого порошка филамент обладает хорошей текучестью, а вероятность забивания сопла порошком минимизируется. При этом возможно увеличить загрузку порошка до значений выше 60%.

В настоящей работе были исследованы изделия, напечатанные из бимодального порошка стали 316L, полученного методом электрического взрыва проволоки. Подбор режимов при электрическом взрыве позволяет эффективно регулировать размер частиц в порошке и изменять распределение частиц по размерам. Были исследованы изделия, напечатанные из порошков преимущественно с микрочастицами, преимущественно с наночастицами и с бимодальным распределением, где соотношение микро:нано составляет примерно 50:50 по массе.

Для проведения экспериментов по FDM печати металлонаполненным полимером был приготовлен фидсток в виде гранул для удобства проведения экспериментов. В качестве полимерного связующего использовалось полиэфир-полиамидное (1:5) полимерное связующее с содержанием бимодального порошка 94 мас.%. Бимодальный порошок дважды смешивали с полимерным связующим в одношнековом экструдере Scientific LE45-30 при  $140 \pm 2$  °C для получения однородного сырья.

Было установлено, что наибольшую текучесть имеют полимер-металлические композиции с бимодальным порошком, а композиции только с нанопорошками имеют практически такую же текучесть, как и с микропорошками.

Напечатанные образцы помещали в ацетон на 24 часа при  $40 \pm 1$  °C для удаления связующего. Затем образцы спекались в вакуумной печи, условия спекания определялись на

основании термического разложения исходного сырья. Спекание осуществляли при температурах 1220, 1270 и 1320 °С с выдержкой 1 час, при этом в процессе нагрева осуществлялась ступенчатая выдержка на температурах 200, 450 и 1000 °С по одному часу на каждой температуре.

При увеличении температуры спекания увеличивается также размер зерен независимо от состава фидстока, использованного для получения объемных образцов. Также происходит локализация карбидов в виде включений по границам зерен, легирующие элементы остаются распределенными в образцах хаотично.

В образцах из фидстоков с нанопорошком средний размер зерен меньше, чем у образцов с микропорошком. Наиболее существенна разница в образцах, спеченных при температуре 1320 °С. Такой результат согласуется с литературными данными [7] где при сравнении образцов из фидстоков с микро и нано-микро порошками, последние демонстрируют замедленный рост зерен при спекании, причем с увеличением времени изотермической выдержки рост зерен в нано-микро образцах практически не наблюдается, тогда как в образцах из микронного порошка размер зерен увеличивается практически на порядок в течение 5 часов спекания.

Микроструктура деталей и размер зерна меняются достаточно интенсивно в относительно узком интервале температур от 1220 до 1320 °С. Детали, спеченные при 1270 °С, показывают довольно узкое распределение размеров зерен, при этом максимум распределения приходится на 7,5 мкм при твердости детали 175 HV. Рост размера зерна в деталях, изготовленных из сырья на основе бимодальных порошков, начинается при температурах выше 1270 °С, максимум распределения составляет около 35 мкм. Твердость деталей снижается до 145 HV. Дальнейшее повышение температуры до 1320 °С способствует значительному увеличению размера зерна. Наблюдается широкое распределение зерен по размеру с максимумом распределения при 40 мкм, в то время как отдельные зерна достигают 280 мкм. Это отражается в снижении твердости до 128 HV.

В напечатанных образцах методом рентгеновской томографии были обнаружены периодически повторяющиеся макродефекты, связанные с ошибками в процессе печати по большей части обусловленными недостаточным заполнением материалом локальных областей образца. Однако, после спекания при 1320 °С большинство дефектов устранялись, причем в образцах из нано-микро порошка плотность образцов была наиболее близка к теоретическим значениям плотности.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2021-0007.*

1. Lee W.S., Lin C.F., Liu T.J. Strain rate dependence of impact properties of sintered 316L stainless steel // Journal of Nuclear Materials. 2006. №359. P. 247–257. doi:10.1016/j.jnucmat.2006.09.003
2. Bleyan D., Hausnerova B., Svoboda P. The development of powder injection moulding binders: a quantification of individual components' interactions // Powder Technology. 2015. №286. P. 84–89. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.07.046>
3. Hidalgo J., Jiménez-Morales A., Barriere T., Gelin J.C., Torralba J.M. Capillary rheology studies of INVAR 36 feedstocks for powder injection moulding // Powder Technology. 2015. №273. P. 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.12.027>
4. Toropkov N., Glazkova E., Chumaevskii A., Lerner M. Density and mechanical investigation of sintered Cronix 70 alloy parts produced by additive manufacturing // AIP Conference Proceedings. 2020. Vol. 2310. № 020337. <https://doi.org/10.1063/5.0034876>
5. Toropkov N., Lerner M., Mironov E. Feedstock investigation based on SAE 316L steel bimodal powders and PLA/PMMA for injection molding: An experimental study // AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2167. № 020367. <https://doi.org/10.1063/5.0034876>
6. Glazkova E., Rodkevich N., Toropkov N., Pervikov A., Lerner M. Ti-6Al-4V alloy bimodal powders for powder injection molding // AIP Conference Proceedings. 2020. Vol. 2310. № 020109.
7. Choi J. P. et al. Sintering behavior of 316L stainless steel micro–nanopowder compact fabricated by powder injection molding // Powder Technology. 2015. Vol. 279. P. 196-202.