

Литература

1. ГОСТ Р 52641-2006. Имплантаты для хирургии. Стандартный метод испытаний для проверки на сдвиг фосфатно-кальциевых и металлических покрытий. – М. : «СтандартИнформ», 2007. – 15 с.

2. Киселев М.Г., Дроздов А.В., Борисов В.А. Влияние электроконтактной обработки с ультразвуком на параметры поверхностей титановых имплантов. Материалы VI международной научно-технической конференции «Современные методы и технологии создания и обработки материалов». – Мн. : 2011. – С. 129–136.

3. Киселев М.Г., Дроздов А.В., Борисов В.А. Применение электроконтактной виброударной обработки для модификации образцов титановых имплантатов. Сборник докладов международного симпозиума «Инженерия поверхности. Новые порошковые композиционные материалы. Сварка». – Мн. : 2011. – С. 53–57.

4. Савич В.В. Модификация поверхности титановых имплантатов и ее влияние на их физико-химические и биомеханические параметры в биологических средах / В.В. Савич, Д.И. Сарака, М.Г. Киселев, М.Г. Макаренко; под научн. ред. В.В. Савича. – Мн. : «Бел. навука», 2012. – 244 с.

УДК 621.762

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО: НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ

Савич В.В.

Институт порошковой металлургии НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Металлургические аддитивные технологии (далее – АТ) создали уникальные возможности для рационального конструирования из титановых, жаростойких и алюминиевых сплавов, легированных сталей, полиметаллов деталей машин и приборов сложной формы, содержащих замкнутые внутренние полости, облегчающих конструкцию без ущерба ее прочности, каналы охлаждения или коммуникаций гидро- и пневмосистем [1]. До недавнего времени считалось, что область АТ – индивидуальное и мелкосерийное производство, что связано с известными недостатками АТ: высокие требования к узкому грансоставу исходных порошков и к их сферичности [2]; для тонкостенных изделий необходимо выстраивать поддержки, которые затем надо удалять; необходимо в любом случае отделять построенную деталь от технологического поддона; габариты изделий ограничены размерами рабочей зоны используемой установки (на сегодняшний день для подавляющего большинства не более 500-800 мм), поскольку построение ведется в атмосфере аргона либо вакуума; для приемлемой механической прочности, в первую очередь – усталостной, полученные АТ детали необходимо подвергать дополнительной обработке температурой и давлением – ГИП (горячему изостатическому прессованию); низкая скорость построения (как правило, часы, десятки и даже сотни часов для относительно крупных деталей). В то же время недавно отпразднованный дочерним предприятием корпорации General Electric – компанией GE Additive company 10-летний юбилей производства ацетабулярного компонента Delta-TT Cup (рис. 1) тотального эндопротеза тазобедренного сустава [3] в суммарном количестве 100 000 штук приводит к мысли о том, что правильная организация даже

при не очень новом оборудовании АТ позволяет успешно решать масштабные задачи.



Рисунок 1 – Ацетабулярный компонент Delta-TT Cup

Целью данной работы является анализ тенденций в совершенствовании материалов и методов АТ, направленных на повышение производительности и снижение себестоимости – главных задач любого производства.

Компания Matsuura Machinery предлагает гибридную технологию – сочетание SLM-технологии и механообработки [4]. В рабочей камере машины LUMEX Avance-25 ведется послойное построение детали, как и в других АТ машинах. Через каждые 10 слоев производится чистовое фрезерование выращенной части детали (шпиндель 43000 мин⁻¹). Другой тип АТ – прямого наплавления порошка в сочетании с механической обработкой в одном цикле реализует на машине MU-8000V Laser EX компания Okuma [5]. Обе комбинированные технологии позволяют решить две проблемы АТ: повышение производительности с учетом постобработки и повышение размерной точности посадочных поверхностей. Кроме того, расширяются и технологические возможности.

Перспективным методом повышения производительности АТ становится технология Binder Jet Metal Additive Manufacturing [6]. Чем-то эта технология напоминает МММ: и там, и там полимерное связующее удерживает частицы металла в формовке и удаляется перед или в процессе спе-

кания. Однако скорость формирования порошковой смеси с жидкой связкой достигает $100 \text{ см}^3/\text{ч}$ (методами SLS и SLM – всего до $15\text{-}20 \text{ см}^3/\text{ч}$), шероховатость поверхности формовки в этом случае – $Ra 6 \mu\text{м}$ без финишной обработки.

Повысить производительность процесса АТ можно и традиционно: оптимизацией и уплотнением размещения формовок на платформе построения [7]. Представленный на рис. 2 пример показывает, что за счет рационального и трехмерного расположения формуемых деталей можно достичь заполнения 82 % объема камеры построения.

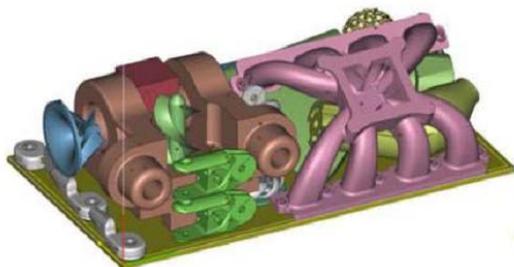


Рисунок 2 – Рациональное заполнение камеры построения

Еще один традиционный путь создания промышленного АТ производства – линейаризация: работа одновременно на большом количестве машин – 20, 30, 50 – что стало уже нормой у лидеров отрасли по всему миру.

Накопление экспериментальных результатов и смелые идеи при их реализации разрушают стереотипы АТ. Так авторы работы [8] успешно показали не только принципиальную возможность построения 3D объектов из тугоплавкого порошка вольфрама при мощности лазера 300 Вт и даже 250 Вт, но и необязательность выделения узкой фракции и сферических частиц (рис. 3). Да, в этом случае остаются отдельные изолированные поры, но их можно ликвидировать дополнительной обработкой ГИП. Однако стоимость такого полидисперсного и несферического порошка вольфрама несравнимо меньше, чем сферического.

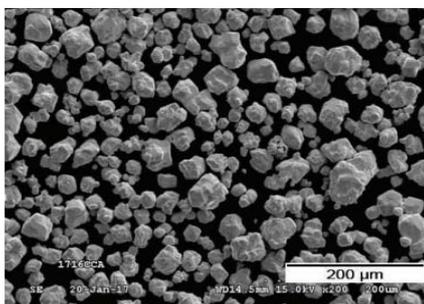


Рисунок 3 – Морфология частиц порошка вольфрама марки AM W300, использованного в АТ [8]

Еще дальше пошли авторы работы [9], которые сознательно использовали в АТ известный в порошковой металлургии прием, когда в исходную шихту из крупных частиц порошка вводят определенное количество мелких частиц того же

химического состава. Мелкие частицы заполняют поры между крупными, повышают плотность укладки (рис. 4) и, тем самым, плотность и прочность готового изделия.

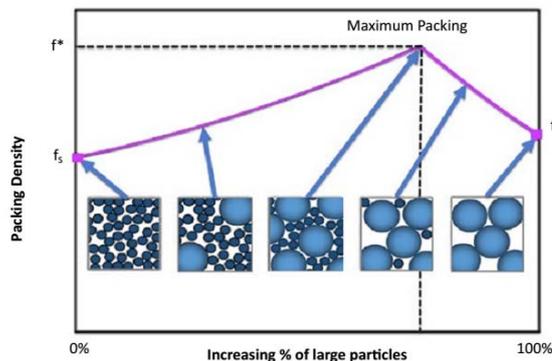


Рисунок 4 – Плотность упаковки бидисперсных частиц [9]

Перспективным методом повышения производительности АТ является использование в одной машине двух лазеров для построения. Так новый комплекс Concept Laser X line 2000R имеет не только одну из самых больших областей печати ($800 \times 400 \times 500 \text{ мм}$), но и параллельно работает двумя лазерами мощностью по 1 кВт [10], что в 2 раза повысило скорость построения.

В заключении следует отметить некоторые тенденции в развитии металлургических АТ, приближающих их к промышленным как с точки зрения повышения производительности, так и снижения себестоимости:

- сочетание в одной машине технологии SLS, SLM или DMD с механической высокоскоростной и прецизионной многошпиндельной обработкой.
- оснащение машины двумя лазерами, работающими параллельно;
- все более широкое применение технология Binder Jet Metal Additive Manufacturing;
- использование более дешевых несферических и полидисперсных смесей порошков, в том числе и после рециклинга, при отработке соответствующих режимов АТ.

Традиционные пути – рациональное моделирование наиболее плотного заполнения камеры построения различными деталями из одного порошка, а также создание производств с десятками однотипных машин, работающих параллельно, дает ощутимый эффект в промышленном АТ-производстве.

Литература

- 1 Савич В.В. Уникальные возможности металлургических аддитивных технологий при конструировании деталей машин и приборов // Материалы докладов 10-й международной научно-технической конференции «Приборостроение–2017». – Минск : БНТУ, 2017. – С. 232–236.
- 2 Порошковая металлургия – одна из первых аддитивных технологий / Ильющенко А.Ф.,

Савич В.В. // Аддитивные технологии, материалы и конструкции: Материалы науч.-тех. конф. (Гродно, 5-6 октября 2016 г.) / Нац. акад. наук Беларуси [и др.]; редколл.: А.И. Свириденко (гл. ред.) [и др.]. – Гродно, ГрГУ, 2016. – 274 с. – С. 20–30.

3 Celebrating ten years of metal AM hip cups as GE launches validation consultancy for medical devices // Metal Additive Manufacturing | Spring 2018. Vol. 4 No. 1. – P. 11.

4 Hybrid Metal 3D Printer LUMEX Avance-25 & Applications/ https://teknologiateollisuus.fi/sites/default/files/file_attachments/1300_matsuura.pdf

5 Okuma Introduces New Hybrid 3D Printer and CNC Machine // <https://3dprint.com/220638/okuma-hybrid-3d-printer-cnc/>

6 Emily-Jo Hopson. Digital Metal: High-precision Additive Manufacturing technology from a

metal powder giant / Metal Additive Manufacturing | Spring 2018. Vol. 4. No. 1. – P. 103–111.

7 David Whittaker. Alternative metal Additive Manufacturing technologies highlighted at Euro PM2017 // Metal Additive Manufacturing | Spring 2018. Vol. 4. No. 1. – P. 131–140.

8 Direct metal laser sintering/selective laser melting of tungsten powders / Ravi K. Enneti, Rick Morgan, Thomas Wolfe and all // Volume 53, No. 4, 2017 International Journal of Powder Metallurgy. – P. 23–31.

9 Debbie Huck-Jones. Beyond particle size: Exploring the influence of particle shape on metal powder performance // Metal Additive Manufacturing | Winter 2017. Vol. 3. No. 4. – P. 99–103.

10. GE Additive Machines: Direct Metal Laser Melting (DMLM) machines // <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/machines/dmlm-machines/x-line-2000r>.

УДК 538.2; 620.179.14

РАСЧЕТ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ НА ЧАСТНЫХ ПЕТЛЯХ МАГНИТНОГО ГИСТЕРЕЗИСА

Сандомирский С.Г.

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Одна из областей применения приборов магнитной структуроскопии – контроль структурно-го состояния и прочностных характеристик термически обработанных стальных изделий. Физической основой такого контроля является высокая чувствительность магнитных свойств сталей к изменениям их структуры. В большинстве случаев используют характеристики предельной петли магнитного гистерезиса материала изделия: коэрцитивную силу H_{cs} , остаточную намагниченность M_{rs} , намагниченность M_s технического насыщения [1]. Их измерение стандартными методами не производитительно. Это обуславливают применение бесконтактного намагничивания изделий в разомкнутой магнитной цепи и получения информации об их остаточной намагниченности M_d при движении изделий [2].

Но изделия имеют размагничивающий фактор N [3] и в разомкнутой магнитной цепи их материал намагничивается по частным петлям магнитного гистерезиса. Методика расчета M_d стальных изделий, намагниченных на частных петлях магнитного гистерезиса, разработана в [4, 5]. Но в результате многочисленных исследований, обобщенных в [6, 7], использованные в [4] формулы уточнены.

Цель доклада – корректировка методики расчета остаточной намагниченности M_d изделия при намагничивании в разомкнутой магнитной цепи и ее использование для анализа зависимости M_d стальных изделий от режима их термической обработки.

При расчете использованы следующие экспериментально обоснованные формулы.

Для основной кривой намагничивания:

$$M_m = \chi_a \frac{H_{cs}^2 H_m}{H_m^2 + H_{cs}^2} + \frac{M_s}{\pi} \frac{H_m^2}{H_m^2 + k_0 H_{cs}^2} \times \left[\sum_{n=0}^1 (-1)^n \arctg \frac{H_{cs} + (-1)^n H_m}{H_0} \right] \quad (1)$$

Для нисходящей ветви ветвей петли гистерезиса:

$$M = \chi_a \frac{H_{cs}^2 H}{H^2 + H_{cs}^2} \pm \frac{M_s}{\pi} \frac{H_m^2}{H_m^2 + k_0 H_{cs}^2} \times \left[2 \arctg \frac{H_{cs} + H}{H_0} - \sum_{n=0}^1 \arctg \frac{H_{cs} + (-1)^n H_m}{H_0} \right] \quad (2)$$

где M – намагниченность материала в поле H на ветвях петли гистерезиса после намагничивания в поле H_m до намагниченности M_m ,

$$K_{II} = M_{rs} / M_s, T = \operatorname{tg}(\pi K_{II} / 2), \tau = 1 \text{ м/кА},$$

$$H_0 = \frac{H_{cs}}{T}, k_0 = \frac{M_s}{\pi} \frac{\arctg(2H_{cs}/H_0)}{M_C - \chi_a H_{cs}/2} - 1,$$

$$\chi_a \approx \frac{[0,5 + 0,06\pi H_{cs} - (0,068\pi H_{cs})^2] M_{rs}}{(2,9 + 35e^{-1,75\pi H_{cs}}) H_{cs}} - 1,$$

$$M_C \approx 0,67 [0,5 + 0,06\pi H_{cs} - (0,068\pi H_{cs})^2] M_{rs}.$$

На первом этапе расчета, решая совместно уравнение (1) и уравнение $H_m = H_e - NM_m$, находили M_m и H_m в изделии при намагничивании во внешнем поле H_e .