ВЛИЯНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ 3D-ПЕЧАТИ НА СТРУКТУРУ, МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ 40X13, ИЗГОТОВЛЕННОЙ ЕВМ

<u>М.ЦИ</u>, С.В. ПАНИН^{1,2}, Ц. ЧЖАН¹ ¹Томский политехнический университет ²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН E-mail: <u>mensyuy1@tpu.ru</u>

Последние годы аддитивные технологии (AT) производства находят все более широкое применение в промышленности. Использование аддитивных технологий открывает новые возможности для изготовления металлических деталей. Нержавеющие стали широко используются в большинстве отраслей промышленности благодаря высокой прочности, ударной вязкости и хорошей коррозионной стойкости. В отличие от ферритных и аустенитных сталей, мартенситная нержавеющая сталь может быть упрочнена в результате термической обработки. Мартенситные нержавеющие стали обладает высокой прочностью, твердостью и коррозионной стойкостью и широко используются для изготовления лопаток паровых турбин, корпусов оборудования в нефтегазовой промышленности, изделий хирургического назначения. Кроме того, данный вид сталей относительно недорог по сравнению с коррозионностойкими высоколегированными сталями других классов [1].

Согласно изотермической кривой ТТТ (температурно-временной-преобразования) и кривой ССТ (превращение при непрерывном охлаждении) для стали 40X13 твердость значительно зависит от условий охлаждения и находится в диапазоне 200-650 HV [2, 3]. При этом конкретный вид АТ, материал фидстока (филамента), размер детали и стратегия 3D-печати оказывают определяющее влияние на формирование структуры и свойств.

Образцы были напечатаны на электронно-лучевой установке (ЭЛС) наплавки проволокой. Установка разработана и изготовлена в Томском политехническом университете [4]. Для проведения механических испытаний было изготовлено 2 партии образцов. Вертикальные и горизонтальные, рисунок 1. Размеры траектории печати из горизонтальных образцов составляли 70×15×14 мм. Размер траектории печати из вертикальных образцов составляли 14×15×70 мм.



Рисунок 1. Схема исследования микроструктуры образцов: а – горизонтальных образцов; b– вертикальных образцов

Фотографии образцов стали 40Х13 исследовали на оптическом микроскопе Axio Observer. На основании представленных на рисунке 1 оптических изображений, морфология и размер мартенситных ламелей (похожие на мартенсит закалки).

Микротвердость измеряли с помощью автоматического комплекса «EMCO-TEST DuraScan-10». Измерения проводились с помощью пирамидки Виккерса при нагрузке 1 кгс и времени выдержки 10 секунд. Микротвердость определяли путем усреднения значений, измеренных в десяти различным точкам. Использовали электромеханическую испытательную машину «UTS-110M-100». Скорость перемещения подвижного захвата составляла 2 мм/мин. Результаты испытаний образцов на одноосное растяжение и микротвёрдость приведены в таблице 1.





Рисунок 2. Микроструктура образцов: а – горизонтальных образцов; b – вертикальных образцов

Видно, что вертикально выращенные образцы EBM 40X13 показали предел прочности при растяжении UTS = 1591 ± 20 МПа и относительное удлинение $\varepsilon = 12\pm1\%$. Горизонтально выращенные заготовки EBM 40X13 отличалась чуть меньшим пределом прочности и в 33 % раза меньшей величиной удлинения до разрушения: показали UTS = 1550 ± 10 M, и $\varepsilon = 8\pm1\%$.

Тип образца	Твёрдость, HV	Предел прочности UTS, МПа	относительное удлинение є, %
EBM 40X13	540±10	1591±20	12±1
Вертикальных			
EBM 40X13	550±10	1550±20	8±1
Горизонтальных			

Таблица 1 – Значение микротвёрдости, предела прочности и относительное удлинение.

Для лучшего понимания причин выявленного различия пластичности исследованных образцов, их поверхности разрушения (после испытаний на растяжение) были проанализированы с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ), рисунок 3. На рисунке 3, а для горизонтально выращенного образца EBM420HD видно развитие межзеренного растрескивания, которое способствовало хрупкому разрушению, что заметно



Рисунок 3. РЭМ-микрофотографии поверхностей разрушения при растяжении: а – горизонтальных образцов; b – вертикальных образцов

снижало величину удлинения при разрушении, $\varepsilon = 8 \pm 1\%$. В случае вертикального выращивания на поверхности разрушения одновременно выявляются зоны с ямочным изломом и плоскостями хрупкой спайности, что указывает на смешанный хрупко/вязкий характер разрушения, рисунок 3, b.

При воздействии электронно-лучевого на проволочный филамент происходит его быстрое плавление и затвердевание, что аналогично процессу закалки. В процессе послойного формования заготовки ранее нанесенный слой претерпевает нагрев и охлаждение, что идентично процессу (локального) отпуска [5]. Таким образом, по мнению авторов, горизонтально и вертикально выращенные детали подвергаются идентичной закалке, но (в силу отличия условий теплоотвода) разной степени отпуска. Предполагается, что отпуск в большей степени развивается в вертикально выращенном образце.

Список литературы

1. Kostina M.V. et al. Corrosion-resistant steels based on Fe–~ 13% Cr: Heat treatment, corrosion-and wear resistance. Review // Izvestiya. Ferrous Metallurgy. – 2023. – V. 66. – N_{2} 1. – P. 8-26.

2. LF A, Garcia C., Lopez V. Continuous cooling transformations in martensitic stainless steels // ISIJ international. – 1994.–V. 34(6). – P. 516–521.

3. Saeidi K. et al. Ultra-high strength martensitic 420 stainless steel with high ductility // Additive Manufacturing. – 2019. – V. 29. – P. 100803.

4. Klimenov V. A. et al. Microstructure and compressive behavior of Ti-6Al-4V alloy built by electron beam free-form fabrication // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2020. – V. 29. – P. 7710-7721.

5. Krakhmalev P. et al. In situ heat treatment in selective laser melted martensitic AISI 420 stainless steels // Materials & Design. – 2015. – V. 87. – P. 380-385.