

УДК 534.8

ПЕРСПЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ СТРУКТУРЫ 3D ИЗДЕЛИЙ

М.С. Захаренко, Е.М. Акулова

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О.Сухого», г. Гомель, Республика Беларусь

В настоящее время активно разрабатываются различные методы аддитивного производства, которые позволяют послойно создавать детали из металлов и сплавов. Технологии 3D-печати металлических изделий на основе проволоки, например, аддитивное электродуговое выращивание (англ. Wire + arc additive manufacturing (WAAM)) [1] и электронно-лучевая аддитивная технология (англ. Electron beam freeform fabrication (EBF3)) [2], привлекают значительное внимание вследствие дешевизны данных методов. Однако в процессе послойного производства материал многократно проходит ряд термических циклов, которые включают в себя нагрев, переплав и охлаждение. Как следствие особенностью изделий, изготовленных с помощью аддитивных технологий, является специфическая микроструктура.

Ультразвуковая обработка (УЗО), заключающаяся в интенсивной пластической деформации поверхности металлов и сплавов ударником, колеблющимся с ультразвуковой частотой, является эффективным методом повышения прочности, износостойкости и усталостной долговечности аустенитных и мартенситных сталей, сплавов на основе меди, алюминия, титана и других материалов, применяемых в машиностроении, в том числе титанового сплава Ti-6Al-4V. Указанное повышение эксплуатационных характеристик конструкционных материалов связано, прежде всего, с nano структурированием их поверхностных слоев и развития в них сжимающих напряжений. Однако остается неизвестной каким образом УЗО будет приводить к изменению микроструктуры и соответственно механических характеристик 3D-напечатанных металлов и сплавов. Целью настоящей работы является исследование влияние ультразвуковой обработки на микроструктуру и фазовый состав 3D-напечатанных образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V, а также закономерности их изменения в процессе последующего одноосного растяжения.

На примере исследования образцов из титанового сплава было показано, что упрочнение поверхностного слоя 3D-напечатанных образцов Ti-6Al-4V в процессе УЗО связано как с его интенсивной пластической деформацией, которая подтверждается формированием ярко выраженной текстуры, о чем свидетельствует соотношение пиков α -Ti (002) ($2\theta =$

38.547°) и (101) ($2\theta = 40.420^\circ$), так и образованием фазы диоксида титана. Диоксид титана находится в двух модификациях, рутил- с тетрагональной решеткой и брукит с орторомбической решеткой. Детальные исследования, проведенные методом ПЭМ, наглядно продемонстрировали существенное измельчение фаз α -Ti и β -Ti, а также образование наноразмерных оксидов титана TiO₂ внутри зерен α -Ti в результате УЗО обработки 3D-напечатанных образцов Ti-6Al-4V. Исследована эволюция микроструктуры и фазового состава 3D-напечатанных образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V, подвергнутого ультразвуковой обработке, в процессе его одноосного растяжения. Методом РСА показано, что с самого начала нагружения (1.85%) в образцах обработанных УЗО имеют место фазовые превращения, о чем свидетельствует уширение основания пиков и раздвоение максимумов пиков α -Ti (002) ($2\theta = 38.547^\circ$) и (101) ($2\theta = 40.420^\circ$). С увеличением степени деформации основания этих пиков продолжает уширяться [2].

Качество сформированного по технологии 3D принтирования изделия, во многом определяется размерами зернистой структуры металла. Один из эффективных способов управления структурой применения технологий ультразвуковой обработки. В процессе кристаллизации в настоящее время ведутся активные исследования внедрение данной технологии в сферу аддитивного производства.

Одна из гипотез, объясняющих измельчение зеренной структуры металла при воздействии ультразвуковой волны - ультразвуковая кавитация [3]. Под действием растягивающих давлений жидкость разрывается и образуется парогазовый пузырек. При наступлении сужающего давления кавитационный пузырек сжимается и схлопывается. При схлопывании локально возрастают давление и температура, и, если схлопывание произошло вблизи кристаллизующегося металла, зерно разбивается на более мелкое.

Существует два режима схлопывания - резонансный и безрезонансный. Для первого случая существует частота УЗ, при которой давление, оказываемое ультразвуком, существенно меньше, чем в случае, где резонанса нет. В зависимости от состава пузырька, процесс, проходящий над ним, различен, следовательно, показатель политропы в различных ситуациях разнится. Возникает вопрос о влиянии показателя политропы на такие пороговые характеристики, как акустическое давление и частота ультразвука, необходимых для схлопывания кавитационных пузырьков [4].

Проводились расчеты для пузырьков, радиусы которых равны 10^{-5} мм, 10^{-6} м и 10^{-7} м. Было установлено, что при росте показателя политропы увеличиваются и пороговые характеристики акустического давления и частоты УЗ, необходимого для схлопывания кавитационных пузырьков. Похожие результаты получены и для пузырьков с радиусами 10^{-5} м и 10^{-7} м. Пороговые значения ультразвука, необходимые для активации кавитации (для пузырьков, радиус которых 10^{-6} мм): частота УЗ

$\approx 3.8 \cdot 10^6$ Гц, акустическое давление $\approx 1.1 \cdot 10^6$ Па.

При изменении показателя политропы, связанного прежде всего с химическим составом пузырька, значения пороговых характеристик УЗ увеличиваются примерно в два раза. Отсюда можно сделать вывод: при подаче УЗ в процессе печати необходимо учитывать теплофизический фактор в виде показателя политропы.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. У. Уильямс, Ф. Мартина, А. С. Эддисон, Дж. Динг, Г. Пардал и П. Колегроув. Аддитивное производство проволоки и дуги. // Технология материаловедения, Том 32, номер 7. 2016. С. 641-647.

2. Дж. К. Уотсон, К. М. Тамингер, Р. А. Харли, Д. Д. Петерсен. Разработка прототипа низковольтной электронно-лучевой системы изготовления произвольной формы. // Материалы 13-го симпозиума SFF. 2002. Р. 458-465.

3. Иванов И. А. и др. Влияние лазерно-индуцированной ультразвуковой обработки на структуру материала при лазерной обработке поверхности для селективного лазерного плавления. // Научные доклады. - 2021. Т.11. -№1. - С.23501.

4. Тодаро К. Дж. и др. Контроль структуры зерен при 3D-печати металла с помощью ультразвука высокой интенсивности // связь с природой. 2020. – Т. 11. – №. 1. – С. 1-9.