

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ АДДИТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ: ОБЗОР ЗАРУБЕЖНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТОК

Назаров А.А.

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН
г. Уфа, Россия, E-mail: AANazarov@imsp.ru

Настоящая работа посвящена обзору современного состояния исследований и разработок в зарождающейся области технологии формообразования материалов – ультразвуковой консолидации или ультразвукового аддитивного производства (УЗАП) [1]. В основе УЗАП (рис. 1) лежит процесс ультразвуковой сварки металлов, которая, в свою очередь, основана на использовании энергии ультразвуковых волн для создания осциллирующих перемещений соединяемых поверхностей друг по отношению к другу, приводящих к разрушению окисного слоя на поверхности, образованию контакта металлов и схватыванию поверхностей [2]. Как метод твердофазной сварки, ультразвуковая сварка обладает существенными преимуществами перед методами сварки, основанными на плавлении – менее значительным воздействием на структуру и фазовый состав материала, возможностью сварки металлов, которые плавлением не свариваются, возможностью соединения разнородных материалов и т.д. По сравнению с диффузионной сваркой УЗС не требует вакуума и предварительного очищения соединяемых поверхностей, происходит быстро.

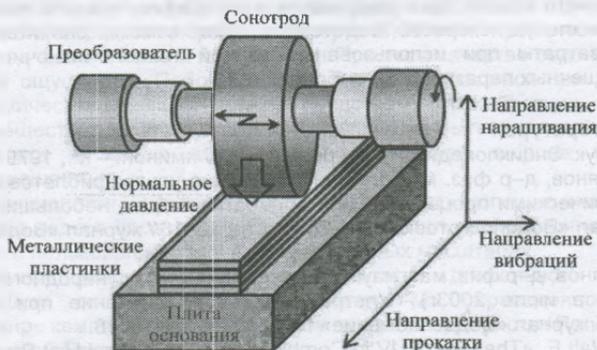


Рисунок 1 – Принцип ультразвукового аддитивного производства

Процесс УЗАП был изобретен Доуном Уайтом в 2000 г. [3]. Для коммерциализации технологии автор основал компанию Solidica, которая выпустила первые машины УЗАП с мощностью ультразвука 1 кВт. В 2011 г. Solidica и некоммерческая организация Edison Welding Institute (EWI) основали совместное предприятие Fabrisonic, которое выпускает машины УЗАП с мощностью ультразвука более 9 кВт (амплитуда вибраций около 50 мкм) и прижимным усилием до 1,5 т. Строго говоря, УЗАП представляет собой аддитивно-субтрактивную технологию, поскольку машина УЗАП периодически осуществляет также беловую механическую обработку путем фрезерования избыточного материала в соответствии с заданной 3D-моделью изделия.

По данным сайта additivemanufacturing.com [http://additivemanufacturing.com/2015/06/05/fabrisonic-patented-solid-state-ultrasonic-additive-manufacturing-welding-technology-to-bond-layers], производительность УЗАП оставляет 250–300 см³/ч, что на порядок превышает производительность порошковых аддитивных технологий. Поэтому его развитие и использование представляет большой интерес.

УЗАП существенно дешевле порошковых аддитивных технологий, позволяет получать изделия более сложной формы по сравнению с литьем, механической обработкой или деформацией. УЗАП может быть использовано для получения

композитов различного типа – слоистых или с включением упрочняющих частиц или волокон для различных конструкционных или функциональных назначений. С его помощью можно внедрять между слоями металла умные материалы, оптические волокна, сенсоры. Можно также сваривать разнородные материалы.

К настоящему времени опубликовано только небольшое количество статей, посвященных УЗАП. Так, наиболее содержательный в плане информации по материаловедению ресурс «scencedirect.com» издательства Elsevier по поиску «ultrasonic additive manufacturing» дает 44 результата за период с 2006 по 2016 гг., только 25 из которых имеет непосредственное отношение к данной теме. Это означает, что интерес к этой научной проблеме только появляется.

Одним из наиболее широко применяемых в УЗАП материалов является алюминий и его сплавы. Исследования на алюминиевом сплаве 3003 показывают, что соединение при УЗАП происходит за счет локализованной пластической деформации шероховатостей поверхностей, рекристаллизации и роста зерен в них [4]. Правильным подбором режимов сварки на этом материале можно получать материал, в котором линейная плотность соединения приближается к 100% [5]. При соединении медных фольг с исходным размером зерен 25 мкм за счет интенсивной деформации поверхностей соединения и повышения температуры также происходит рекристаллизация с образованием зерен размерами 0,3–10 мкм, что, как утверждается, повышает качество сварки [6].

При образовании композитных материалов, состоящих из чередующихся слоев титана и алюминия или их сплавов использование УЗАП позволяет избежать образования хрупкого интерметаллидного слоя TiAl. Сочетание УЗАП и последующей термической обработки при умеренно высоких температурах позволяет получать прочное соединение [7]. Сваривая чередующиеся слои двух или более металлов, можно получать материалы, которые будут иметь заранее рассчитанное поведение под нагрузкой для конструкционных применений [8]. В работе [9] путем внедрения в алюминиевую матрицу волокон сплава с эффектом памяти формы NiTi получен композит с пониженным коэффициентом термического расширения и сделан вывод о том, что с помощью этого подхода можно создавать легкие материалы с желаемым коэффициентом термического расширения. Путем внедрения оптических волокон, предварительно покрытых защитным металлическим слоем, в матрицу из алюминиевого сплава 3003 в работе [10] продемонстрирована возможность получения прочных и полностью функциональных оптоволоконных структур.

Следует отметить, что публикации в этой области принадлежат исключительно ученым из дальнего зарубежья. Российский индекс научного цитирования (РИНЦ, elibrary.ru) не дает ни одной публикации на поиск «ультразвук и аддитивная технология», а на поиск «ультразвуковая сварка» дает около 350 ссылок, подавляющее большинство которых относится к сварке полимеров. Уточнение поиска с добавлением ключевого слова «структура» показывает полное отсутствие структурных исследований сварных соединений в русскоязычной литературе.

Таким образом, налицо зарождающийся интерес к УЗАП и к связанным с этой технологией исследованиям по УЗС в ведущих зарубежных странах, что объясняется всплеском интереса к аддитивным технологиям в целом [11]. При этом имеет место полное отсутствие исследований в нашей стране по этой тематике. Поэтому, по мнению автора, начало фундаментальных исследований процессов УЗС металлов, микроструктуры и механических свойств соединений абсолютно необходимо.

Проведение систематических исследований процесса ультразвуковой сварки для применения в УЗАП планируется в рамках поддержанного РФН проекта «Исследование процессов ультразвуковой обработки и сварки ультрамелкозернистых металлов и сплавов для повышения механических характеристик материалов и использования в аддитивных технологиях».

Работа поддержана грантом Российского научного фонда № 16–19–10126.

Список литературы:

1. Friel R.J. Power ultrasonics for additive manufacturing and consolidation of materials // In: Power ultrasonic. Applications of high-intensity ultrasound. Eds. Gallego-Juáres J.A., Graff K.F. Elsevier. – 2015. – P. 313–336.
2. Matheny M.P., Graff K.F. Ultrasonic welding of metals // In: Power ultrasonic. Applications of high-intensity ultrasound. Eds. Gallego-Juáres J.A., Graff K.F. Elsevier. – 2015. – P. 259–293.
3. White D. Ultrasonic object consolidation. US patent No 6519500, 23 March, 2000.
4. Dehoff R.R., Babu S.S. Characterization of interfacial microstructures in 3003 aluminum alloy blocks fabricated by ultrasonic additive manufacturing // *Acta Mater.* – 2010. – V. 58. – P. 4305–4315.
5. Janaki Ram G.D., Yang Y., Stucker B.E. Effect of process parameters on bond formation during ultrasonic consolidation of aluminum alloy 3003 // *J. Manuf. Systems.* – 2006. – V. 25. – P. 221–238.
6. Sriraman M.R., Babu S.S., Short M. Bonding characteristics during very high power ultrasonic additive manufacturing of copper // *Scripta Mater.* – 2010. – V. 62. – P. 560–563
7. Obielodan J., Stucker B.E., Martinez E., Martinez J.L., Hernandez D.H., Ramirez D.A., Murr L.E. Optimization of the shear strengths of ultrasonically consolidated Ti/Al 3003 dual-material structures // *J. Mater. Process. Technol.* – 2011. – V. 211. – P. 988–995.
8. Obielodan J., Stucker B.E. A fabrication methodology for dual-material engineering structures using ultrasonic additive manufacturing *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* – 2014. – V. 70. – P. 277–284.
9. Chen X., Hahr A., Dapino M.J., Anderson P.M. Deformation mechanisms in NiTi–Al composites fabricated by ultrasonic additive manufacturing // *Shap. Mem. Superelasticity.* – 2015. – V. 1. – P. 294–309.
10. Monaghan T. Capel A.J., Christie S.D., Harris R.A., Friel R.J. Solid-state additive manufacturing for metallized optical fiber integration // *Composites. A.* 2015. V. 76. P. 181–193.
11. Новые производственные технологии: публичный аналитический доклад. – М.: Издательский дом «Дело» РАНХиГС. – 2015. – 272 с.