

УДК 621.791/621.9

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ WAAM-СИНТЕЗА СПЛАВОВ
С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ УГЛЕРОДА

М. А. НОВИКОВ, В. В. ЧИРКОВ

Научный руководитель А. В. КИРИЧЕК, д-р техн. наук, проф.

Брянский государственный технический университет

Брянск, Россия

В настоящее время интенсивно развивается направление аддитивного производства наукоемких изделий по технологии синтеза деталей из проволоки. Для производства ответственных изделий в машиностроении широко применяют высокоуглеродистые и среднеуглеродистые стали с содержанием углерода от 0,3 %. Они обеспечивают достаточно высокую твердость, баланс прочности и пластичности после термического упрочнения. Данные стали отличаются плохой свариваемостью по причине склонности к хрупкости после воздействия термического цикла сварки, образованию закалочных структур и выгоранию углерода, что способствует высокому порообразованию и является наиболее важным для процесса синтеза. Для обеспечения качественного сварного соединения высокоуглеродистых и среднеуглеродистых сталей используют специальные технологии сварки.

При достаточно большой схожести процессов, происходящих при электродуговой сварке и 3DMP-печати, невозможно ограничиться опытом разработки и исследования сварочных процессов. При сварке решается задача формирования неразъемного соединения контактирующих поверхностей за счет наплавки одного или нескольких слоев, а требуемый уровень механических свойств материала сварного шва, как правило, обеспечивается за счет применения электрода, материал которого имеет более высокий уровень свойств по сравнению с материалом соединяемых заготовок. Процесс аддитивного синтеза всегда многослойный, а материал всего объема синтезируемого изделия однородный и, как правило, имеет высокое содержание углерода, что затрудняет процесс сварки-наплавки.

Синтез сплавов с высоким содержанием углерода является актуальной проблемой, не имеющей на данный момент отработанной технологии. Наиболее часто возникают проблемы при синтезе объемных полнотелых образцов, которые обусловлены высоким порообразованием.

Исследование по выращиванию образцов для испытания их на механические свойства производилось с использованием проволок Нп-30ХГС, СВ-18ХГС. Синтез образцов производился на различных сварочных режимах, подобранных для каждой проволоки индивидуально. Материал подложки для всех сталей – Ст 3. В ходе исследования синтезировались образцы размером (Д × Ш × В) 70 × 50 × 50 и 220 × 50 × 40 мм, которые затем использовались для вырезания образцов и их испытаний на механические свойства. Синтез образцов осуществлялся в четырех направлениях осцилляции сварочной горелки: вдоль

образца, поперек образца, под углом 45° к одной из сторон, а также в вертикальном направлении.

Наличие пор и их размер определялись при помощи ультразвукового дефектоскопа на фазированных решетках УСД-60ФР. В ходе синтеза фиксировалась температура синтезируемого образца при помощи тепловизора Fluke TiX660.

При использовании проволоки Нп-30ХГС были применены среда защитного газа, чистый аргон, наплавка образца в сварочной ванне с дополнительной подачей в нее аргона, непрерывный синтез образца при температуре его поверхности не ниже 600°C . С применением данных мер удалось достичь следующего результата: количество пор на единицу объема составило $0,31 \text{ пор/см}^3$, средний размер пор – от 0,5 до 2 мм. Вертикальный образец, выращенный с поперечной подачей, содержал две поры на весь объем. Данный образец выращивался при средней температуре начала синтеза слоя 750°C и с минимальным временем при межслойном переходе, что позволило избежать образования окалины и окисления на этапе межслойного перехода.

Проволока СВ-18ХГС за счет меньшего содержания углерода позволяет производить синтез без использования сварочной ванны с дополнительной подачей аргона. Синтез производился в смеси защитного газа $\text{Ar} + \text{CO}_2$ (80 %/20 %), среднее значение силы тока – 162 А, напряжение – 20 В. Количество пор на единицу объема составило $0,2 \text{ пор/см}^3$, а средний размер пор – от 0,5 до 1,5 мм. Как и при синтезе образцов из проволоки Нп-30ХГС, вертикальный образец, выращенный с поперечной подачей, имеет наименьшее количество пор – $0,029 \text{ пор/см}^3$, при этом средняя температура начала синтеза слоя составила порядка 650°C .

На качество синтеза существенное влияние оказывает техника сварки. От расстояния, угла наклона и характера движения горелки зависят надежность газовой защиты зоны сварки от воздуха, скорость охлаждения металла, форма шва, условия удаления газовых пузырей и неметаллических включений из сварочной ванны. Процесс синтеза, так же как и процесс ремонтной наплавки в защитном газе, необходимо вести на короткой дуге.

Выполненные исследования показали, что, несмотря на рост сложностей при синтезе образцов из среднеуглеродистых сталей WAAM/3DMP-методом, найденные технические решения позволяют выращивать изделия с низкой пористостью.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках базовой части государственного задания, по проекту № FZWR-2024-0003 (№ 075-00150-24-03) «Разработка технологической стратегии и теоретико-экспериментальное исследование ключевых элементов технологии аддитивного синтеза из металлической проволоки деталей 3DMP-методом и волнового термомодеформационного упрочнения синтезируемых деталей машин».