

И. А. КОТЛЯРОВА, канд. техн. наук, доц.

К. В. МАКАРЕНКО, д-р техн. наук, доц.

А. В. КИРИЧЕК, д-р техн. наук, проф.

Е. А. ЗЕНЦОВА

Д. А. ИЛЮШКИН, канд. техн. наук, доц.

В. В. ЧИРКОВ

Брянский государственный технический университет (Брянск, Россия)

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ОЦЕНКИ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ ЗАГОТОВОК, СИНТЕЗИРОВАННЫХ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМГЗ ПО WAAM-ТЕХНОЛОГИИ

Аннотация. Изучены особенности распределения пор в объеме синтезированной заготовки из сплава АМГЗ, произведенной по аддитивной WAAM-технологии. Представлены физико-химические основы формирования газовой пористости в процессе синтеза заготовок. Изучение пористости проводили тремя методами: ультразвуковой дефектоскопии, гидростатическим взвешиванием и металлографическим. Полученные результаты показали хорошую адекватность для всех трех методов. Анализ исследований выявил особенности распределения, формы и причин образования пор в заготовках. Даны рекомендации по выбору метода контроля и управлению пористостью.

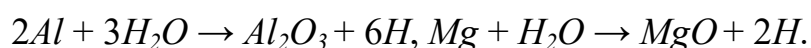
Ключевые слова: пористость, дефектоскопия, синтез, алюминиевые сплавы, аддитивное производство, ультразвуковой контроль, металлография, гидростатическое взвешивание, плотность.

Современные аддитивные технологии позволяют производить изделия из различных металлов и сплавов путем их послойного синтеза, используя разные источники энергии. Одним из наиболее интенсивно развивающихся методов является аргонно-дуговая наплавка (WAAM). Однако синтезируемый материал часто имеет в структуре дефекты, присущие сварочному производству, в частности поры, имеющие различный генезис и морфологию [1,2]. В этой связи одной из важнейших задач на этапе становления и развития технологии аддитивного производства является разработка метода контроля пористости заготовок. Усовершенствование таких методов эффективно в совокупности с разработкой способов устранения выявленных дефектов или методик управления их распределением в объеме для обеспечения требуемых эксплуатационных показателей деталей.

Разные металлы и сплавы на их основе в разной степени склонны к образованию пористости в процессе WAAM-синтеза. К группе наиболее «проблемных» материалов относятся, в частности, алюминиевые сплавы. Синтез бездефектных заготовок с высокой сплошностью материала из алюминиевых сплавов, дополнительно легированных магнием, весьма затруднен спецификой физико-химического взаимодействия компонентов тройной системы «Al-Mg-H». Источником водорода в алюминиево-магниевых сплавах является атмосферная влага, адсорбированная на поверхности

сварочной проволоки. Из-за высокого сродства магния к кислороду, в процессе производства проволоки, на ее поверхности формируется гетерогенная оксидная пленка, состоящая из оксида магния MgO , оксида алюминия Al_2O_3 и шпинели $MgAl_2O_4$. Катионы Mg^{2+} и Al^{3+} , выступающие в качестве кислотных центров Льюиса, активно адсорбируют и координируют диполи молекул воды из воздуха. Донорно-акцепторное взаимодействие обеспечивает быстрый переход физической адсорбции в хемсорбцию с формированием устойчивого полимолекулярного гидратного слоя, состоящего преимущественно из бёмита ($\gamma-AlOOH$) и байерита ($\alpha-Al(OH)_3$).

В процессе *WAAM*-синтеза происходит ступенчатая дегидратация гидратного слоя. Выделяющаяся при этом вода термически диссоциирует под воздействием высоких температур дуги (свыше 2500 °C) ($H_2O \leftrightarrow 2H + O$) и вступает в гетерогенную окислительно-восстановительную реакцию (400...700 °C) с расплавленным металлом сварочной ванны (преобладающий механизм):



Образующийся атомарный водород диффундирует в сварочную ванну, формируя с расплавом проволоки гомогенный раствор, охлаждение которого сопровождается уменьшением растворимости водорода – монотонным до температуры ликвидуса и скачкообразным (в 20 раз) в интервале кристаллизации. «Избыточный» атомарный водород, объединяясь в молекулы ($2H \rightarrow H_2$), стремится покинуть расплав. Однако этот процесс осложняется реологическими и стерическими барьерами: двухфазный кристаллизующийся сплав обладает высокой эффективной вязкостью, а формирующийся в процессе затвердевания сварочной ванны дендритный каркас создает пространственные препятствия для перемещения пузырьков водорода к поверхности. Это приводит к фиксации газовой (водородной) пористости в объеме металла. При этом «первичная» пористость под воздействием температурных циклов, обусловленных особенностями реализации *WAAM*-технологии, подвержена изменениям, связанным с термодинамическим стремлением любой системы к уменьшению свободной энергии за счет сокращения межфазной поверхности. Межфазная поверхность «твердый сплав – газовые поры» уменьшается за счет направленной диффузии водорода от мелких пор к крупным по градиентам капиллярного давления и химических потенциалов. Таким образом, формирование и изменение пористой структуры по профилю алюминиевых *WAAM*-заготовок и изделий – закономерный процесс, требующий комплексного подхода ее контроля в процессе синтеза, позволяющего совместить практический аспект (контроль сплошности материала) с изучением теоретических основ распределения пористости и механизмов ее образования в зависимости от параметров *WAAM*-технологии. Цель работы – сравнительный анализ методов контроля пористости в синтезированной по *WAAM*-технологии заготовке на примере алюминиевого сплава *AMz3* Комплексное исследование

пористой структуры проводили тремя методами дефектоскопического анализа: ультразвуковым контролем (УЗК), металлографическим анализом (МК) и методом гидростатического взвешивания (ГВ).

Для исследований *WAAM*-заготовку (300×240×70 мм) синтезировали на установке на базе сварочного полуавтомата *EVOSPAK EVOMIG 500*. Наплавку выполняли на подложку из алюминиевого сплава *Д16Т* размером 370×260×45 мм в защитной среде 100% *Ar* импульсным методом *DAC Pulse* с использованием сварочной проволоки *Св-АМз3*, диаметром 1,2 мм, тип осцилляции при наплавке – ступенька. Основные параметры *WAAM*-технологии: сварочный ток – 105 А, напряжение – 21,7 В, скорость подачи проволоки – 7 м/мин, скорость осцилляции – 1000 мм/мин, амплитуда – 210 мм, шаг осцилляции – 3 мм, высота подъема сопла на первом слое – 9,5 мм, подъем исполнительного органа на слое – 2,5 мм. Для мониторинга температурных полей в процессе синтеза применяли инфракрасную камеру *FLuKe TiX660*.

Комплексный подход к анализу пористости *АМз3-WAAM*-заготовки был реализован в три этапа, как ранее было отмечено, тремя различными методами. На первом этапе сплошность материала оценивали методом ультразвукового контроля (дефектоскоп *УСД-60ФР*, фазированная решетка *5L16-1,0x10-B10*, 16 эл., 5 МГц; призма *SB10-N55S*, 55°), позволяющим выявить зоны концентрации макропор размером более 300 мкм с точной пространственной локализацией: у подложки, в центральном объеме, в приповерхностной зоне, на границах наплавленных слоев (рис. 1, а). При этом количественная оценка пористости (определение объемной доли пор и их распределения по размерам) данным методом затруднена, а идентификация мелких пор с размером менее 100 мкм практически невозможна из-за высокого уровня структурного шума от крупных дендритов сплава *АМз3*. Тем не менее УЗК обеспечивает целенаправленный отбор проб для последующего анализа пористости, исключая случайный характер вырезки образцов и сокращая объем дальнейших исследований.

На втором этапе гидростатическим взвешиванием оценивали интегральную пористость заготовки. Для этого из ее верхней, средней и нижней зон (см. рис. 1, б) вырезали образцы, уделяя особое внимание зонам с повышенной пористостью, предварительно выявленным на предыдущем этапе УЗК.

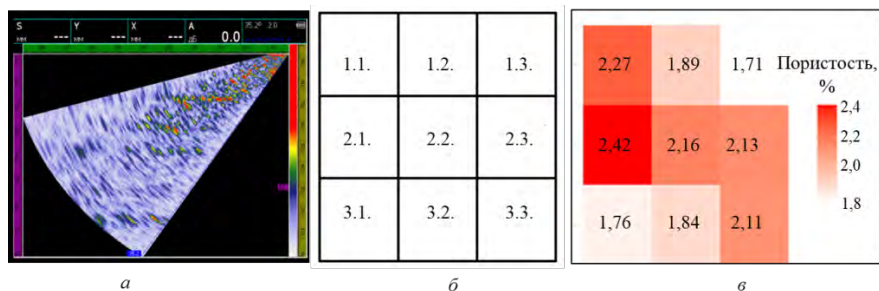


Рис.1. Результаты исследования: S-скан УЗК (а), схема вырезки образцов (б), обобщенные данные пористости (метод ГВ) (в)

Образцы взвешивали на воздухе ($m_{\text{воздух}}$) и в дистиллированной воде ($m_{\text{вода}}$) (аналитические весы *ВЛК-224С-И* с дискретностью 0,0001 г с приспособлением *УОП-301*) и рассчитывали плотность (ρ) и интегральную пористость (ϕ):

$$\rho = \frac{m_{\text{воздух}}}{(m_{\text{воздух}} - m_{\text{вода}})} \rho_{\text{вода}}, \phi = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{эт}}}\right) * 100\%,$$

В качестве беспористого эталона использовали сварочную проволоку *Св-АМгЗп* с $\rho_{\text{эт}} = 2,669 \text{ г/см}^3$, определенной гидростатическим взвешиванием.

Метод позволяет оценить соответствие *ВААМ*-заготовок нормативным требованиям по сплошности материала при заданных параметрах синтеза, а также обосновать целесообразность внедрения гибридных технологии (например, *ВААМ* с волновым деформационным упрочнением) для регенерации сплошности. По результатам *ГВ* (рис. 2, в) средняя пористость составила 2,03%. Распределение пор по высоте заготовки неравномерное: более низкие значения ϕ в нижней и верхней зонах (1,91 и 1,96 %), более высокие – в средней (2,24 %). При получении удовлетворительных данных по интегральной пористости проведение металлографического анализа не обязательно. Однако в тех случаях, когда значения ϕ превышают допустимые пределы (как в данном эксперименте), он становится необходимым для установления причин возникновения пор, их преобладающего размера и пространственной топологии.

Металлографический анализ пористости выполняли на образцах после гидростатического взвешивания. Их запрессовывали в смолу и приготавливали шлифы по стандартным методикам. Пористость исследовали в десяти полях зрения при увеличении $\times 50$ на микроскопе *Leica DM IRM* с использованием специального программного обеспечения для идентификации пор *SIAMS 900*.

Результаты анализа показывают, что в структуре синтезированного сплава численно преобладают микропоры до 100 мкм (99% от общего количества), из которых на долю фракции 0...25 мкм приходится 92...95 %. Интересно отметить, что во всех зонах заготовки прослеживается четкая закономерность: с увеличением размера микропор их количество снижается, причем наиболее резко – при переходе от фракции 0...25 мкм к фракции 25...50 мкм (~в 20 раз). Микропоры диапазона 75...100 мкм носят единичный характер: обнаружено 7 микропор – в верхней, 14 – в средней, 4 – в нижней зонах *АМг-3* заготовки (рис.2)

Анализ генезиса выявил газовое и микроусадочное происхождение микропор. Газовые микропоры преобладают и распределены хаотически; немногочисленные скопления носят локальный характер (рис. 3 а, б). Микроусадочные поры встречаются значительно реже, они локализованы в нижней зоне заготовки в виде линейных скоплений (рис. 3, в). Мезопоры (100...500 мкм) и макропоры (более 500 мкм) – одиночные, исключительно газового происхождения. Их количество выше в средней зоне, что коррелирует

с результатами ГВ. Макропоры в нижней зоне отсутствуют, в средней и верхней зонах обнаружены в равных количествах (рис. 4а).

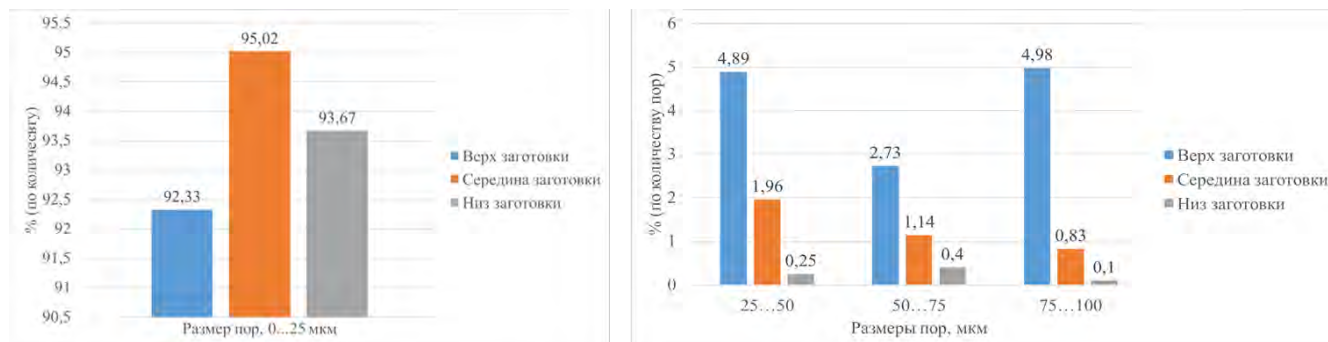
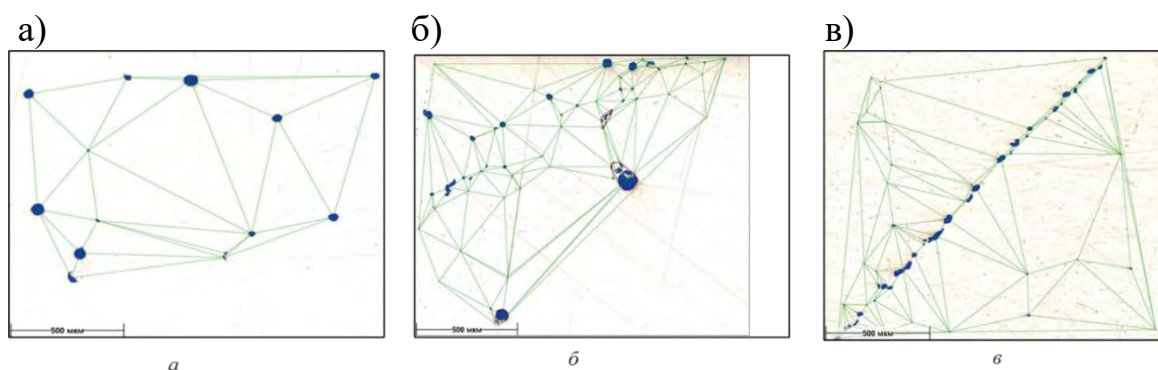


Рис. 2. Распределение микропор по размерам и зонам *WAAM*-заготовки



а – газовые микропоры, распределенные хаотично; б – локальные скопления газовых микропор, в – усадочные микропоры

Рис. 3. Топология микропористости

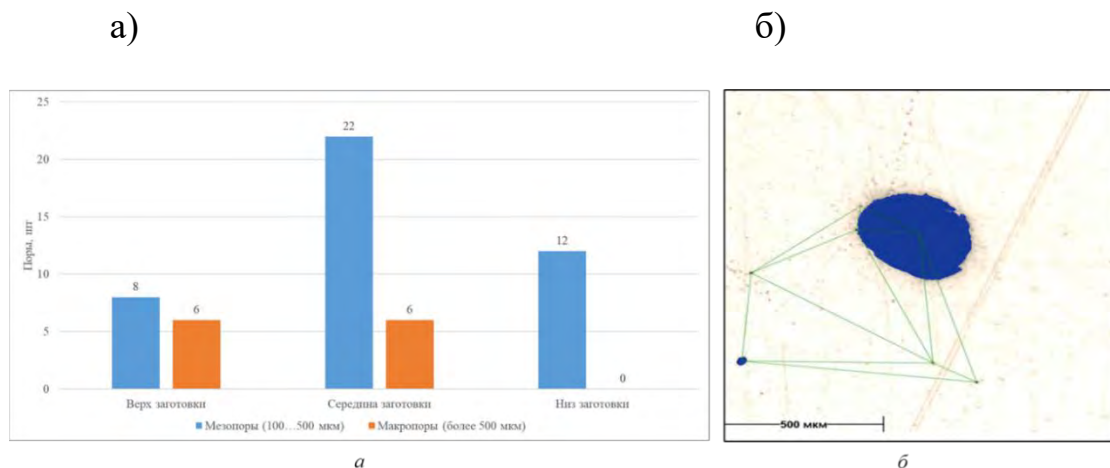


Рис. 4. Количество мезо- и макропор в синтезированной заготовке (а) и одиночная газовая мезопора (б)

Выявлено изменение газовой пористости по высоте заготовки. Микропористость (0...100 мкм) стабильна во всех зонах. Мезопористость распределена неравномерно; она преобладает в средней зоне, что объясняется слиянием микропор при повторных термических циклах *WAAM*-синтеза (в нижней и верхней зонах процесс лимитирован интенсивным теплоотводом в подложку и конвективным охлаждением). Это подтверждается характером

распределения мезопор внутри диапазона 100...500 мкм: их основное количество находится в интервале до 200 мкм, мезопоры крупнее 350 мкм отсутствуют. Таким образом, микро- и мезопористость представляют собой «классическую» газовую пористость, вызванную диссоциацией влаги на поверхности сварочной проволоки. Макропоры (более 500 мкм) формируются по иному механизму: их образование в средней и верхней зонах связано с нестабильностью *WAAM*-процесса при удалении от подложки (осцилляция дуги, сбой подачи защитного газа). Следовательно, пористость обусловлена совместным действием физико-химических и технологических факторов; их одновременная коррекция (подготовка поверхности проволоки, оптимизация режимов наплавки, применение гибридных технологий) позволит минимизировать микро- и мезопоры, полностью устранить макропоры и повысить сплошность материала.

Таким образом, для *WAAM*-заготовок (особенно из алюминиевых сплавов) необходим комплексный анализ пористости, позволяющий оценить распределение пор по объему (УЗК), проверить соответствие сплошности нормативным требованиям (ГВ), установить причины возникновения пор (МК) для обоснованной коррекции параметров *WAAM*-синтеза или внедрения гибридных технологий с целью получения материала с заданной пористостью.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, работа «Проведение фундаментальных научных исследований» в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки РФ 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».

Список литературы

1. Орлов, В. К. Порообразование в алюминиевых сплавах при выращивании методом *WAAM* / В. К. Орлов // Мавлютовские чтения : Материалы XVII Всероссийской молодёжной научной конференции. В 9-ти томах, Уфа, 21–23 ноября 2023 года. Том 2. – Уфа: Уфимский университет науки и технологий, 2024. – С. 175-179.

2. Генезис, морфология и особенности распределения пор в стали, синтезированной по технологии *WAAM* / К.В. Макаренко, А.В. Киричек, И.А. Котлярова, Д.А. Илюшкин, Е.А. Зенцова // Технология металлов. – 2026. - № 8. – С. 39 – 46. – DOI: 10.31044/1684-2499-2026-0-8-39-46.

Контакты:

ikotlyarova@lis.ru (Котлярова Ирина Александровна);
makkon@yandex.ru (Макаренко Константин Васильевич);
avk@tu-bryansk.ru (Киричек Андрей Викторович);
kopilka.32@mail.ru (Зенцова Екатерина Александровна);
shirke@mail.ru (Илюшкин Дмитрий Алексеевич);
vadimc75@gmail.com (Чирков Вадим Владимирович).