

Кочуров Семён Максимович

*магистр, Южно-Уральский государственный университет (национальный
исследовательский университет), г. Челябинск,*

**ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ПОДАЧИ ПРОВОЛОКИ И СКОРОСТИ
НАПЛАВКИ НА ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ,
МИКРОСТРУКТУРУ И МИКРОТВЁРДОСТЬ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ
09Г2С, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОДУГОВОГО
ВЫРАЩИВАНИЯ (WAAM)**

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментального исследования влияния скорости подачи проволоки ($V_{пп}$) и скорости наплавки (V_n) на геометрические характеристики, микроструктуру и микротвёрдость образцов из низколегированной стали 09Г2С, полученных методом электродугового выращивания плавящимся электродом (Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM). Эксперимент выполнен на роботизированном комплексе FANUC ARC Mate 120iC с источником питания KEMPPI KempArc Pulse 450. Установлены количественные зависимости геометрических параметров наплавленных валиков от режимов наплавки. Проведён металлографический анализ и измерение микротвёрдости по трём зонам. Показано, что увеличение скорости наплавки приводит к измельчению столбчатых кристаллов и повышению микротвёрдости до 397 HV, что в 2,2 раза выше литого состояния. Определены оптимальные режимы, обеспечивающие наилучшее сочетание производительности и качества. Результаты могут быть использованы при разработке технологических процессов WAAM для деталей из стали 09Г2С.

Ключевые слова: электродуговое выращивание, WAAM, сталь 09Г2С, скорость подачи проволоки, скорость наплавки, микроструктура, микротвёрдость, аддитивные технологии.

Abstract. This paper presents the results of an experimental study of the influence of wire feed speed (V_{feed}) and deposition speed (V_n) on the geometric characteristics, microstructure, and microhardness of 09G2S low-alloy steel

specimens produced by wire arc additive manufacturing (WAAM). The experiment was performed on a FANUC ARC Mate 120iC robotic system with a KEMPPI KempArc Pulse 450 power source. Quantitative relationships between the geometric parameters of deposited beads and deposition conditions were established. Metallographic analysis and microhardness measurements were performed in three zones. It was shown that increasing the deposition speed results in refinement of columnar crystals and an increase in microhardness to 397 HV, which is 2.2 times higher than the as-cast state. Optimal conditions were determined that provide the best combination of productivity and quality. The results can be used in the development of WAAM processes for 09G2S steel parts.

Keywords: electric arc deposition, WAAM, 09G2S steel, wire feed speed, deposition speed, microstructure, microhardness, additive manufacturing.

ВВЕДЕНИЕ

Аддитивные технологии стремительно внедряются в современное машиностроение, предлагая альтернативу традиционным методам литья и механической обработки. Среди них особое место занимает электродуговое выращивание плавящимся электродом (WAAM) – процесс направленного подвода энергии и материала, при котором металлическая проволока расплавляется электрической дугой и послойно осаждается на подложку. WAAM обеспечивает высокую скорость осаждения (до 2–4 кг/ч), низкую стоимость оборудования и практически 100% использование материала, что делает его привлекательным для производства крупногабаритных деталей малых и средних серий [1–4].

Однако технология WAAM сталкивается с рядом ограничений: анизотропия механических свойств, остаточные сварочные напряжения, высокая шероховатость поверхности и нестабильность геометрии при многослойной наплавке [5]. Для низколегированной стали 09Г2С, широко применяемой в строительных и транспортных конструкциях, отсутствуют систематические данные о влиянии режимов наплавки на качество изделий. Настоящая работа посвящена исследованию влияния двух ключевых

параметров – скорости подачи проволоки ($V_{пп}$) и скорости наплавки (V_n) – на геометрические характеристики, микроструктуру и микротвёрдость образцов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалы. Для наплавки использовалась сварочная проволока Св-09Г2С диаметром 1,2 мм химического состава (мас.%): $C \leq 0,12$; $Mn 1,3-1,7$; $Si 0,5-0,8$; $P \leq 0,035$; $S \leq 0,030$; Fe – остальное. Защитный газ – аргон (расход 10 л/мин).

Оборудование. Наплавка выполнялась на роботизированном комплексе FANUC ARC Mate 120iC с источником питания KEMPPI KempArc Pulse 450. Металлографические исследования проведены на инвертированном микроскопе Axiovert 200MAT. Микротвёрдость измеряли на микротвердомере при нагрузке 300 г. На рисунках 1,2,3,4 представлено используемое оборудование.



Рисунок 1 – FANUC ARC Mate 120iC



Рисунок 2 – KEMPPI KempArc Pulse 450



Рисунок 3 – Микроскоп Axiovert 200MAT



Рисунок 4 – Микротвердомер

План эксперимента заключался в наплавке 8 образцов (4 слоя, время межслойного охлаждения 4 с) при фиксированном напряжении $U=18$ В и варьировании $V_{пп}=3$ и 4 м/мин, $V_{н}=450,500,550,600$ мм/мин (табл. 1).

Таблица 1 – План эксперимента

№ образца	$V_{пп}$, м/мин	$V_{н}$, мм/мин	U, В	Расход газа, л/мин	Слои	Время охлаждения, с
1	3	450	18	10	4	4
2	3	500	18	10	4	4
3	3	550	18	10	4	4
4	3	600	18	10	4	4
5	4	450	18	10	4	4
6	4	500	18	10	4	4
7	4	550	18	10	4	4
8	4	600	18	10	4	4

Методика. Шлифы изготавливали по методике: шлифовка до зернистости 5000, полировка алмазной пастой, травление в 4% растворе азотной кислоты в этаноле. Геометрические параметры (высоту h , ширину b , площадь S , коэффициент формы $k=b/h$) определяли по фотографиям поперечных сечений с использованием профессионального программного обеспечения. Микротвёрдость измеряли в трёх зонах: у подложки (зона 1), в средней части (зона 2), в верхнем слое (зона 3).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Геометрические характеристики

На рисунке 5 представлены поперечные сечения выращенных образцов. Все образцы имеют выпуклую форму без непроваров и подрезов. Результаты измерений сведены в табл. 2.

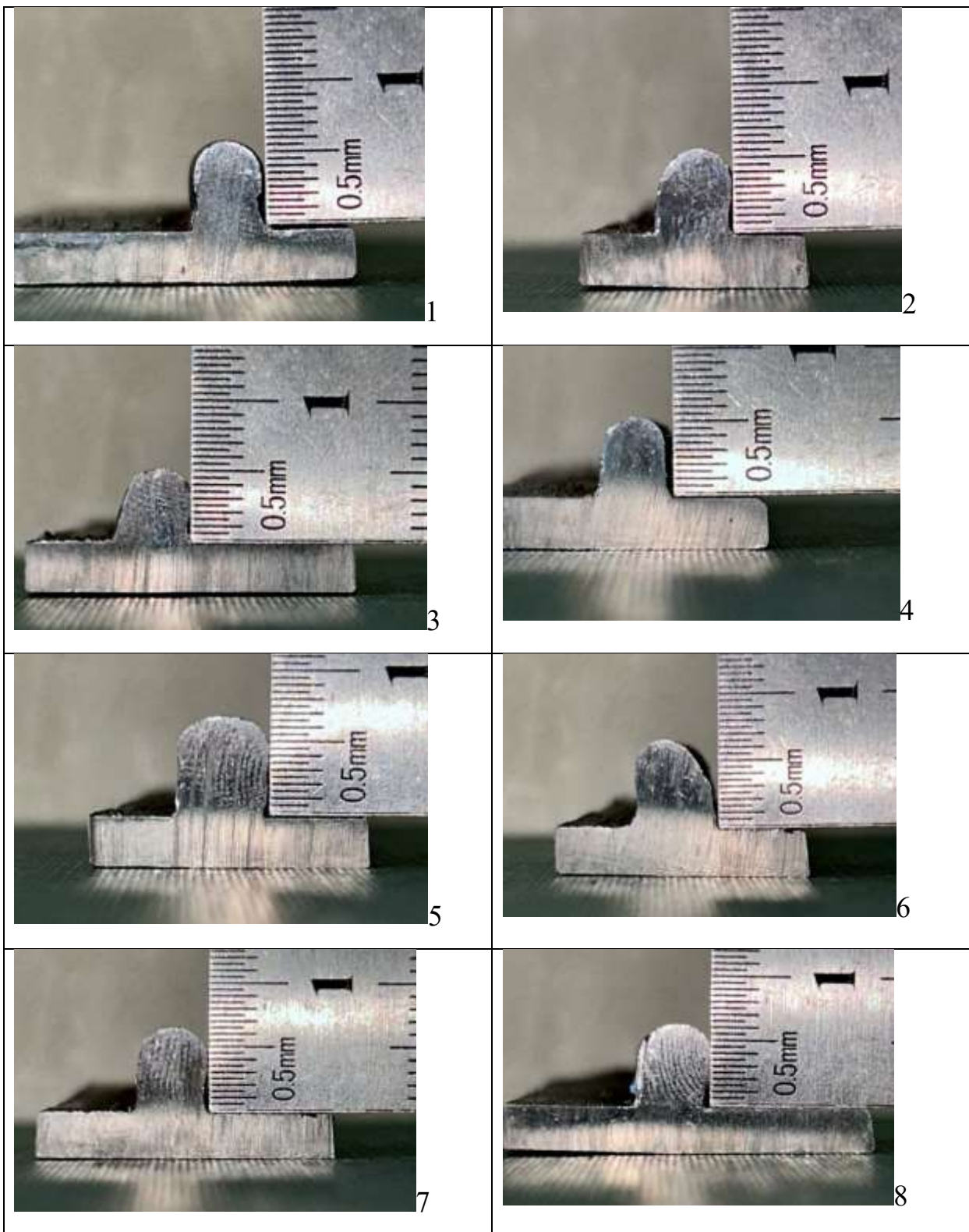


Рисунок 5 – Поперечных сечений выращенных образцов

Таблица 2 – Геометрические характеристики образцов

№ образца	$V_{пп}$, м/мин	$V_{н}$, мм/мин	h , мм	b , мм	S , мм ²	$k=b/h$
1	3	450	5,75	8,2	34,0	1,43
2	3	500	5,50	7,9	31,5	1,44
3	3	550	5,00	7,6	27,8	1,52
4	3	600	5,25	7,4	28,5	1,41
5	4	450	6,75	9,5	46,8	1,41
6	4	500	6,50	9,2	43,5	1,42
7	4	550	6,50	8,9	42,1	1,37
8	4	600	6,25	8,6	39,3	1,38

Анализ зависимостей:

Влияние $V_{н}$ (при фиксированной $V_{пп}$): с ростом скорости наплавки уменьшаются высота, ширина и площадь валика. Для $V_{пп} = 3$ м/мин площадь снижается на 17% (с 34,0 до 28,5 мм²), для $V_{пп} = 4$ м/мин – на 16% (с 46,8 до 39,3 мм²). Это объясняется сокращением времени осаждения единицы длины шва при неизменном расходе присадочного материала.

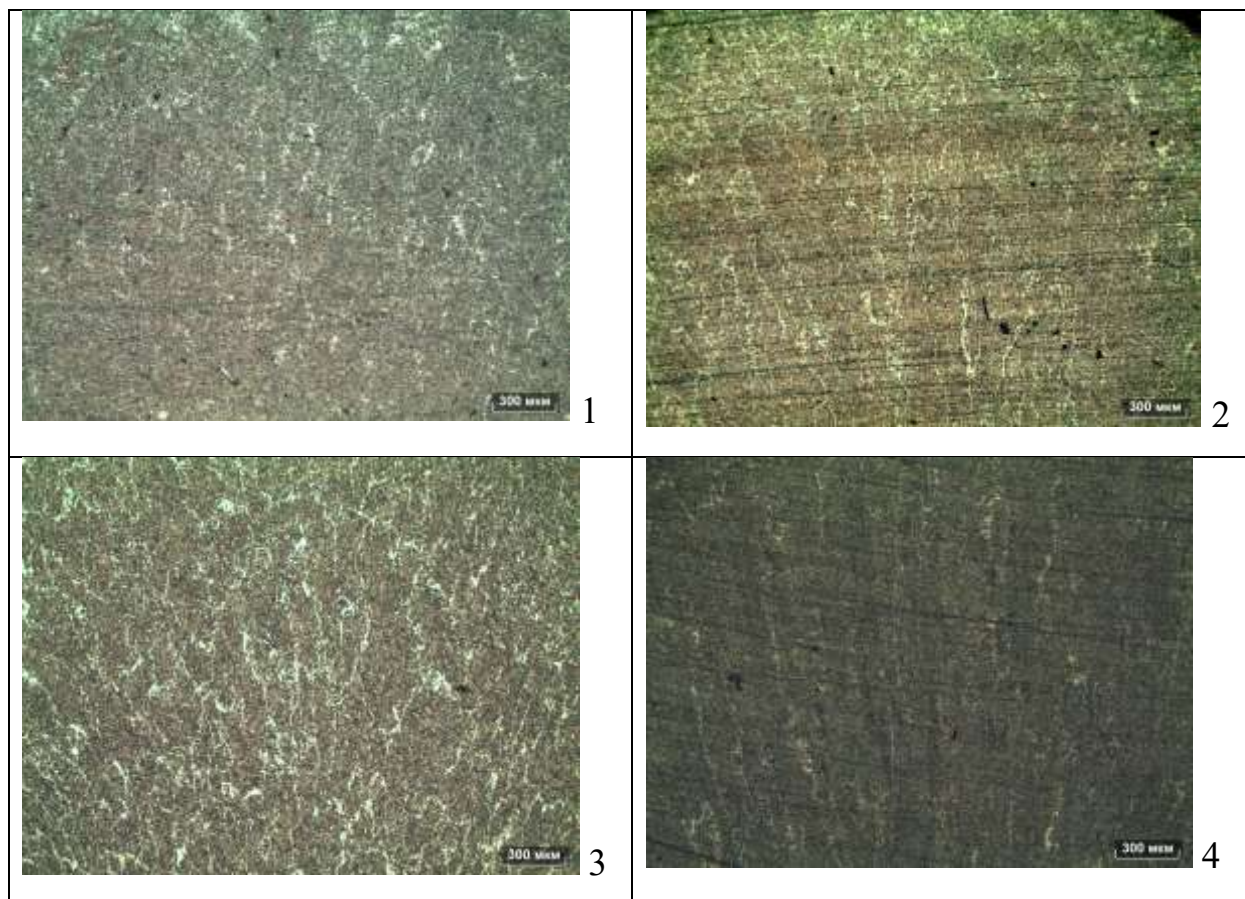
Влияние $V_{пп}$ (при одинаковой $V_{н}$): увеличение скорости подачи проволоки с 3 до 4 м/мин повышает площадь наплавки в среднем на 31%, высоту – на 17%, ширину – на 16%. Это связано с возросшим объёмом расплавленного металла, поступающего в сварочную ванну в единицу времени.

Коэффициент формы k : значения варьируются в пределах 1,37–1,52. При $V_{пп} = 4$ м/мин валики получаются более высокими и узкими (k меньше), что важно учитывать при проектировании стратегии заполнения.

Микроструктура

На всех образцах продемонстрированных на рисунке 5 наблюдается характерное для WAAM послойное строение. В верхнем слое (слой 4) формируются столбчатые кристаллы длиной до 0,5 мм, ориентированные перпендикулярно подложке. Нижележащие слои (1–3) имеют более однородную равноосную структуру из-за многократного термического воздействия при наплавке последующих слоёв. Различная травимость слоёв свидетельствует о микроликвации легирующих элементов (Mn, Si).

На рисунке 6 представлены микроструктуры верхнего слоя всех образцов. Сравнительный анализ показывает:



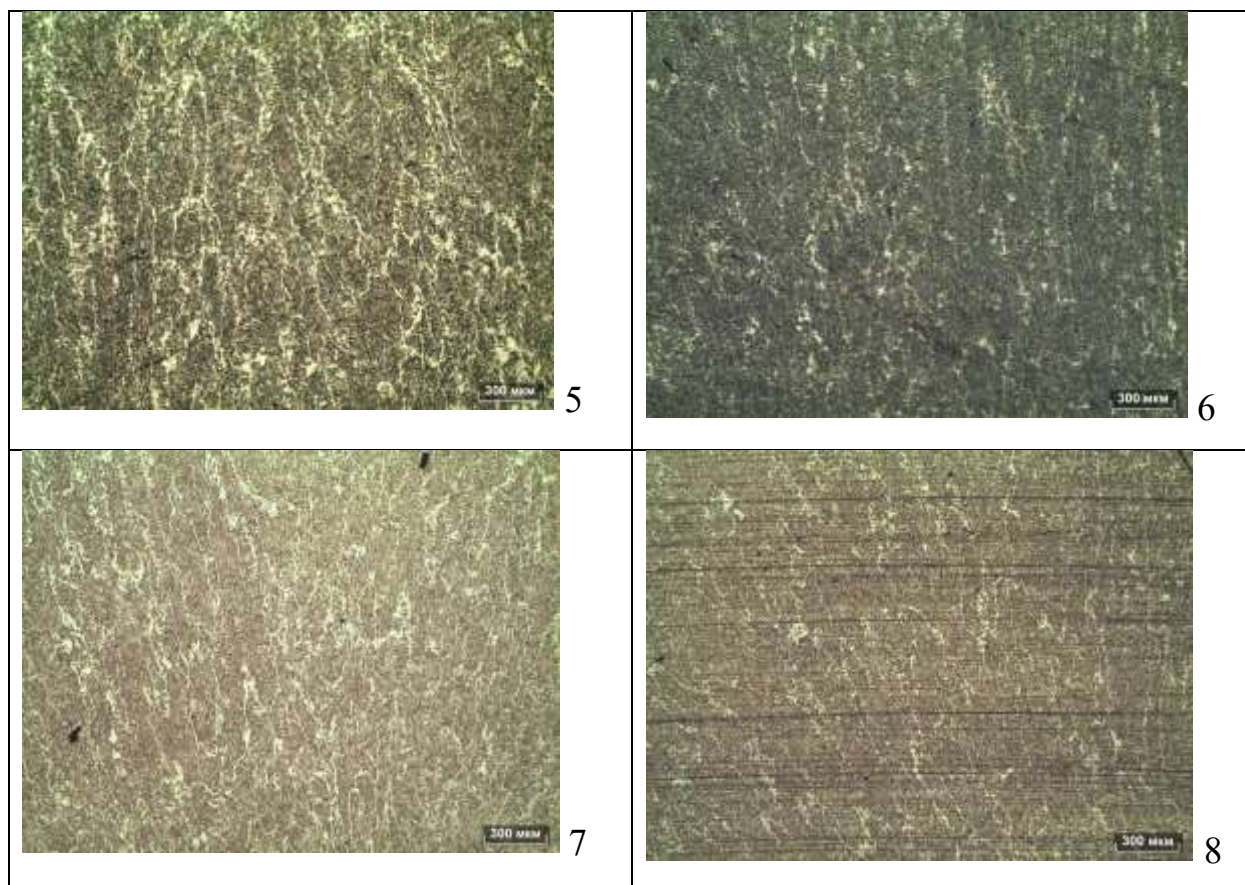


Рисунок 6 – Структура 4-го слоя исследуемых образцов

Образец №5 ($V_{пп} = 4$, $V_H = 450$) – грубая видманштеттова структура феррита по границам столбчатых кристаллов, крупные ферритные выделения. Такая структура недопустима, так как снижает ударную вязкость и трещиностойкость.

Образцы №4 ($V_{пп} = 3$, $V_H = 600$) и №7 ($V_{пп} = 4$, $V_H = 550$) – наилучшие: мелкие столбчатые кристаллы (150–300 мкм), минимальное количество феррита, отсутствие видманштеттовой структуры и пор.

Промежуточные образцы (№1–3, 6, 8) занимают среднее положение по размеру зерна и доле ферритных выделений.

Установлено, что повышение скорости наплавки (уменьшение погонной энергии) способствует измельчению структуры и снижению доли феррита за счёт ускоренного охлаждения.

Микротвёрдость

Результаты измерений микротвёрдости приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Микротвёрдость образцов (HV)

№ образца	Hv1 (подложка)	Hv2 (середина)	Hv3 (верх)	Hvср
1	378	225	353	319
2	355	350	377	361
3	301	342	395	346
4	404	373	415	397
5	339	258	360	319
6	365	327	255	316
7	428	296	379	368
8	376	366	301	348

Основные закономерности:

Все образцы имеют микротвёрдость 316–397 HV, что в 2,2–2,6 раза превышает уровень литой стали 09Г2С (150–180 HV). Это обусловлено быстрым охлаждением и формированием дисперсных структур.

Для $V_{пп} = 3$ м/мин (образцы 1–4) наблюдается рост средней твёрдости с увеличением V_n : $319 \rightarrow 361 \rightarrow 346 \rightarrow 397$ HV. Максимум (397 HV) достигнут у образца №4, что коррелирует с его мелкозернистой структурой.

Для $V_{пп} = 4$ м/мин (образцы 5–8) твёрдость изменяется немонотонно: $319 \rightarrow 316 \rightarrow 368 \rightarrow 348$ HV. Пик (368 HV) у образца №7. Снижение твёрдости при $V_n = 600$ мм/мин (образец №8) связано с появлением единичных пор.

Анизотропия по высоте: максимальная твёрдость – у подложки (зона 1, до 428 HV), минимальная – в средней части (зона 2, до 225 HV) из-за отпуска при нанесении последующих слоёв. Зона 3 занимает промежуточное положение.

Корреляция с микроструктурой: образцы с мелкозернистой структурой (№4, №7) имеют наибольшую твёрдость. Образец №5 с видманштеттовым ферритом – низкую твёрдость и высокую неоднородность.

ОПТИМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ

На основе комплекса данных (геометрия, структура, твёрдость) рекомендован режим характерный для образца №4: $V_{пп} = 3$ м/мин, $V_n = 600$ мм/мин. Характеристики: $h = 5,25$, $S = 28,5$ мм², $H_{ср} = 397$ HV.

ВЫВОДЫ

Увеличение скорости наплавки при фиксированной скорости подачи проволоки приводит к уменьшению высоты, ширины и площади поперечного сечения валика. Снижение площади может достигать 21%. Увеличение скорости подачи проволоки с 3 до 4 м/мин при неизменной скорости наплавки увеличивает площадь наплавки в среднем на 31%, что позволяет повысить производительность процесса.

Микроструктура всех образцов имеет послойное строение: крупные столбчатые кристаллы в верхнем слое и равноосные – в нижележащих. Наилучшая структура достигнута при $V_n = 600$ мм/мин ($V_{пп} = 3$) и $V_n = 550$ мм/мин ($V_{пп} = 4$). Видманштеттова структура, наблюдаемая у образца №5 ($V_{пп} = 4$, $V_n = 450$), является браковочным признаком – такие режимы следует исключить.

Микротвёрдость образцов значительно превышает уровень литой стали 09Г2С. Максимальная твёрдость (397 HV) получена при $V_{пп} = 3$ м/мин, $V_n = 600$ мм/мин. Выявлена анизотропия твёрдости по высоте: максимальна у подложки, минимальна в средней части.

Предложен режим, позволяющий обеспечить максимальную производительность процесса и высокие механические характеристики выращенных изделий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р 57558-2025. Аддитивные технологии. Базовые принципы. Термины и определения.

2. Yu R., Li W., Wu M. et al. Advanced visual sensing and control in CMT-based WAAM processes // *Frontiers in Materials*. 2025. Vol. 12. Art. 1499635.

3. Свиридов А.В., Фомичева О.В., Голев Е.В. и др. Аддитивное производство методом электродуговой наплавки проволоки // *Труды ВИАМ*. 2025. №6 (148).

4. Pattanayak S., Sahoo S.K. Gas metal arc welding based additive manufacturing – a review // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2021. Vol. 33. P. 398–442.

5. Ли Ш., Линь Ч., Киричек А.В. и др. Влияние технологических факторов на процессы формирования параметров качества изделий, изготавливаемых WAAM-методом // *Научно-технические технологии в машиностроении*. 2025. №5. С. 3–14.

6. Карлина Ю., Конюхов В., Опарина Т. Оценка качества и механических свойств получаемых слоев металла из низкоуглеродистой стали методом WAAM // *Обработка металлов*. 2024. №4.

7. Панченко О.В., Курушкин Д.В., Попович А.А. Электродуговое выращивание: технические и экономические преимущества // *Технический оппонент*. 2020. №1 (6).