УДК 621.791
doi: https://doi.org/10.18323/2782-4039-2026-1-75-3

# Волновое деформационное упрочнение в гибридной технологии WAAM: поиск режимов на примере стали 08Г2С

***Киричек Андрей Викторович***[1,3], доктор технических наук, профессор, проректор по перспективному развитию
***Соловьев Дмитрий Львович****[2,4], доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения»
***Яшин Александр Васильевич***[2,5], кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология машиностроения»
***Силантьев Сергей Александрович***[2,6], кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технология машиностроения»
[1]*Брянский государственный технический университет, Брянск (Россия)*
[2]*Владимирский государственный университет, Владимир (Россия)*

***E-mail:** murstin@yandex.ru

[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3823-0501
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4475-319X
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3186-1300
[6]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3524-385X

*Поступила в редакцию 21.01.2026* *Пересмотрена 11.02.2026* *Принята к публикации 05.03.2026*

***Аннотация:*** **Проблема.** Широкое внедрение аддитивных технологий, в частности WAAM-метода, сдерживается недостаточным уровнем механических свойств синтезированных изделий: неоднородностью микроструктуры, пористостью и высокими остаточными напряжениями. Перспективным направлением решения данной проблемы является применение гибридных технологий, сочетающих аддитивное производство с последующей обработкой. **Цель.** Определение рационального диапазона режимов ВДУ при его использовании в гибридной технологии синтеза изделий WAAM-методом, обеспечивающего повышение механических свойств (твердости и ударной вязкости) синтезированного изделия. **Методы.** Образцы из стали 08Г2С, полученные WAAM-методом, подвергали ВДУ на специализированной установке с гидравлическим генератором импульсов. В ходе трехэтапного эксперимента варьировали температуру нагрева образцов (300–700 °С), коэффициент перекрытия пластических отпечатков (0,3–0,7) и периодичность обработки (каждый, каждый третий, каждый пятый и каждый седьмой наплавленный слой). Измеряли твердость по Виккерсу по глубине, степень упрочнения и ударную вязкость KCU. **Результаты.** Установлено, что максимальное упрочнение достигается при температуре 500 °С, коэффициенте перекрытия 0,3–0,6 и обработке каждого третьего наплавленного слоя. Это позволило не только повысить твердость материала на 8–13 % на глубине более 12 мм и увеличить ударную вязкость до 14 %, обеспечив однородность свойств по всему объему изделия, но и повысить производительность гибридного процесса. **Выводы.** Разработанная методика позволяет эффективно управлять механическими свойствами WAAM-изделий за счет определения рациональных параметров волнового деформационного упрочнения. Предложенный подход может быть использован при изготовлении ответственных деталей в машиностроении.

***Ключевые слова:*** волновое деформационное упрочнение; ВДУ; WAAM; направленная энергетическая наплавка; гибридная аддитивная технология; сталь 08Г2С; поверхностная твердость; ударная вязкость

***Благодарности:*** 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 термодеформационного упрочнения синтезируемых деталей машин».

***Для цитирования:*** Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Яшин А.В., Силантьев С.А., Волновое деформационное упрочнение в гибридной технологии WAAM: поиск режимов на примере стали 08Г2С // Frontier Materials & Technologies. 2026. № 1. С. 27–37. DOI: https://doi.org/10.18323/2782-4039-2026-1-75-3.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время аддитивные технологии кардинально изменили подход к производству металлических изделий, открыв новые возможности для разработки и оптимизации конструкций ответственных машиностроительных изделий. Их применение позволяет существенно снизить затраты материалов, сократить сроки производства, повысить общую экономическую эффективность промышленных процессов. WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) – один из достаточно быстро развивающихся способов аддитивного синтеза [1]. WAAM-технология базируется на применении сварочного процесса

**© Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Яшин А.В., Силантьев С.А., 2026**

для послойного производства металлических изделий из проволоки. Фидсток, через который подается проволока, монтируется на исполнительном органе станка, его перемещение в процессе аддитивного синтеза задается системой числового программного управления. Траектория перемещения предполагает наличие информации о трехмерной форме синтезируемого изделия. Проволока расплавляется под действием электрической дуги, расплавленный материал последовательно наносится слоями, создавая трехмерные изделия заданной формы.

Главными преимуществами WAAM-технологии являются высокая скорость печати [2], возможность использования различных металлических сплавов и значительные экономические выгоды по сравнению с традиционными методами производства [3–6]. К тому же, WAAM позволяет существенно повысить коэффициент использования материала, сократить отходы производства.

Широкое применение WAAM-технологий сдерживается недостаточным уровнем и неоднородностью механических свойств, пористостью и крупнозернистой структурой синтезированных изделий [7]. Изделие, полученное дуговой наплавкой, имеет большие остаточные напряжения вследствие повышенных скоростей и избыточного тепловложения, а также низкие механические свойства вследствие пористости и грубых дендритов в микроструктуре синтезированного материала [8].

Гибридные технологии синтеза металлических изделий представляют собой новое направление в области аддитивного производства, которое сочетает в себе преимущества различных процессных методов. Для повышения механических свойств синтезированных металлических материалов все большее распространение получают упрочняющие технологии [9], которые могут применяться как для готового изделия, так и в процессе его послойного изготовления. В настоящее время в составе гибридных технологий аддитивного синтеза достаточно хорошо проявили себя методы деформационного упрочнения, такие как прокатка (накатывание), лазерно-ударное упрочнение, ковка (чеканка).

Межслойное накатывание – разновидность процесса холодной обработки давлением, предполагает приложение нагрузки до 100 кН к ролику, перемещающемуся по поверхности наплавленных слоев, который вызывает пластическую деформацию и стимулирует рекристаллизацию зерна при последующем наплавлении. Так в работе [10] установлено, что межслойное накатывание при WAAM-синтезе сплава Ti-6Al-4V приводит к измельчению зерна и трансформации столбчатой микроструктуры в равноосную, росту прочности, а межслойное накатывание синтезированных методом WAAM стенок из того же сплава с нагрузкой 60 и 90 кН при температуре <100 °C, привела к измельчению зерна на глубине до 3 мм под поверхностью. Кроме того, дополнительное повышение прочности, например, для сплава Al-6.3Cu, может быть получено комбинированием межслойного накатывания синтезируемого металла с последующей термообработкой (T6) [11].

Лазерно-ударное упрочнение – достаточно новый способ поверхностного пластического деформирования, который неплохо зарекомендовал себя в гибридных технологиях синтеза. Например, послойное лазерно-ударное упрочнение выращиваемых изделий из алюминиевого сплава марки 2319 WAAM-методом позволило уменьшить средний размер зерна на 22 % и повысить твердость, однако эффект наблюдался только в поверхностном слое толщиной не более 1 мм, а вызванной пластической деформации оказалось недостаточно для упрочнения всей толщины стенки [12].

Таким образом, методы холодной обработки позволяют снизить остаточные напряжения, улучшить микроструктурную однородность и механические свойства, уменьшить пористость и повысить точность геометрии. Однако увеличение времени обработки, из-за необходимости охлаждения каждого синтезированного слоя, может нивелировать ключевое преимущество WAAM – высокую скорость наплавки. Кроме того, как правило, необходимый эффект достигается на глубине от поверхности 1–3 мм, что не всегда достаточно для получения изотропной структуры по всему объему синтезированного изделия.

Одним из решений проблемы повышения производительности является применение различных стратегий упрочнения, когда производится пластическое деформирование не каждого синтезированного слоя, а через несколько слоев. Для повышения глубины пластической деформации упрочнение может выполняться при различных температурах, как при нормальной температуре окружающей среды, так и при высокой температуре сразу после осаждения расплавленного металла. Как правило, повышение температуры способствует снижению сопротивления пластической деформации и улучшению микроструктуры материала [13].

При послойном упрочнении чеканкой неостывшего синтезированного WAAM-методом сплава АМг5 использовался пневматический молот с энергией ударов 7,1 Дж и частотой 3 200 уд/мин, время деформационного упрочнения составляло 60 с, что позволило увеличить предел прочности на 20 %, предел текучести на 15 %, относительное удлинение на 20 % по сравнению с выращенным аналогичным образом неупрочненным образцом [14]. Однако рекомендации по диапазону температур, которые должны создавать благоприятные условия для пластического деформирования, не приведены.

HF-WAAM – новый способ аддитивного синтеза по технологии WAAM, совмещенного с последующей горячей чеканкой. При испытаниях образцов из нержавеющей стали AISI 316L, обработанных с усилием 17 и 55 Н при температуре около 900 °C, установлено увеличение предела текучести и прочности, а также уменьшение пористости. Небольшие силы деформации облегчают совместимость деформационного упрочнения со стандартным оборудованием, использующимся при WAAM-синтезе, таким как роботы и 3-осевые столы [15]. Однако, несмотря на указанные преимущества, высокие температуры деформации приводят к росту зерна и изменению фазового состава материала в поверхностных слоях, что негативно сказывается на механических свойствах.

Известен способ волнового деформационного упрочнения (ВДУ), при котором на упрочняемую поверхность воздействуют управляемыми ударными импульсами. Форма импульсов, определяющая передаваемую энергию, регулируется геометрическими параметрами элементов ударной системы (боек и волновод). В результате удара бойка по волноводу с инструментом, статически поджатыми к поверхности детали, в результате чего в ударной системе генерируются плоские акустические волны, а в зоне контакта смонтированного на волноводе инструмента

с обрабатываемой поверхностью – импульсы определенной формы. Для каждого упрочняемого материала и условий его упрочнения выбирается форма ударных импульсов, способствующая максимально эффективному использованию энергию ударов для упругопластической деформации обрабатываемого материала, обеспечивая высокий КПД процесса [16]. Соответствие формы импульсов свойствам обрабатываемого материала определяет КПД процесса. Одним из главных преимуществ использования ВДУ в гибридном WAAM, относительно накатывания или чеканки, является возможность получать упрочненный поверхностный слой большой глубины, которая достигает 6–10 мм.

Цель работы – определение рационального диапазона режимов ВДУ при его использовании в гибридной технологии синтеза изделий WAAM-методом, обеспечивающего повышение механических свойств (твердости и ударной вязкости) синтезированного изделия.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Объект исследования

Исследования проводились на низкоуглеродистой легированной стали 08Г2С, которая широко используется для сварных конструкций. Химический состав: C=0,05–0,15 %; Si=0,7–0,1 %; Mn=1,5–2,3 %; Ni≤0,3 %; S≤0,025 %; P≤0,03 %; Cr≤0,3 %; Cu≤0,3 %.

Режимы синтеза образцов: газовая среда (80 % Ar+20 % $CO_2$); сила тока 140–150 А; напряжение 21 В; скорость подачи проволоки 7,2 м/мин; скорость подачи фидстока 1000 мм/мин; подъем фидстока на слое 2 мм; диаметр проволоки 1 мм; марка материала подложки сталь 10ХСНД; размеры подложки 8×120×220 мм.

### Параметры ВДУ

Основными технологическими параметрами ВДУ являются: энергия ударов, статическая сила поджатия инструмента к упрочняемой поверхности, число проходов и коэффициент перекрытия пластических отпечатков, который является интегральной характеристикой процесса ВДУ:

$$K = 1 - \frac{S}{\delta f 60},$$

где $\delta$ – размер отпечатка, мм,
$S$ – скорость подачи заготовки относительно инструмента, мм/мин;
$f$ – частота ударов, Гц.

Если $K$=0, то край одного отпечатка граничит с краем другого; если 0<$K$<1, то отпечатки перекрываются; при $K$=1 происходит многократное вдавливание инструмента в одно и то же место [16].

### Обоснование последовательности этапов

Примененная последовательная трехэтапная схема эксперимента полностью соответствует иерархии физических механизмов, определяющих конечный результат упрочнения. Температура выступает в роли базового параметра, поскольку она задает пластичность материала и его способность к накоплению деформации без разрушения, формируя тем самым технологическое «окно» для всех последующих воздействий. Коэффициент перекрытия, являясь интегральным технологическим параметром, определяет равномерность, степень и глубину упрочнения, однако его влияние напрямую зависит от текущей пластичности материала, следовательно, его рациональные значения могут быть найдены только при уже зафиксированной температуре. Периодичность ВДУ представляет собой управляющий параметр, влияющий на распределение упрочнения по высоте изделия и на общую производительность процесса. Корректное исследование этого фактора возможно лишь при фиксированных значениях температуры и коэффициента перекрытия. Многофакторный эксперимент, смешивающий все уровни варьирования одновременно, мог бы дать статистически значимые, но физически трудно интерпретируемые результаты. Принятый иерархический подход обеспечивает ясное понимание роли каждого параметра в формировании конечных свойств материала и позволяет достичь поставленных целей с минимальными затратами ресурсов и времени.

### План эксперимента

Цель первого этапа – установление температуры образцов, соответствующей наибольшему упрочнению материала после ВДУ.

При выполнении этапа синтезированные образцы нагревались до температур 300, 400, 500, 600 и 700 °С и обрабатывали ВДУ.

Образцы синтезировали с одинаковыми режимами.

ВДУ осуществлялось на специально разработанной установке с гидравлическим генератором импульсов. Режимы упрочнения выбирались исходя из используемых ранее для упрочнения образцов и заготовок, полученных прокатом: энергия ударов 150 Дж; частота ударов 9 Гц; инструмент – цилиндрический ролик диаметром 10 мм, длиной 40 мм. Коэффициент перекрытия отпечатков, равный 0,3, выбран исходя из обеспечения достаточной равномерности упрочнения и высокой производительность процесса (рис. 1).

Эффективность нагрева оценивалась измерением твердости образцов.

Цель второго этапа – установление коэффициента перекрытия, соответствующего наибольшему упрочнению материала после ВДУ.

При выполнении этапа синтезированные образцы подвергались ВДУ с различными коэффициентами перекрытия пластических отпечатков: 0,3; 0,45; 0,6 и 0,7.

Образцы нагревались до температуры, определенной на первом этапе, обеспечивающей максимальное упрочнение материала.

Эффективность каждого коэффициента перекрытия оценивалась измерением твердости образцов.

Цель третьего этапа – установление периодичности ВДУ, соответствующей наибольшему упрочнению материала. На третьем этапе проводилось исследование твердости и ударной вязкости образцов, синтезированных по гибридной аддитивно-упрочняющей технологии WAAM+ВДУ.

При выполнении этапа ВДУ осуществлялось с периодичностью 1, 3, 5, 7 слоев. Образцы синтезировались с режимами, аналогичными применяемым на первом и втором этапах. Количество слоев и высота образцов выбиралась в зависимости от периодичности ВДУ (таблица 1). Температура нагрева образцов перед ВДУ

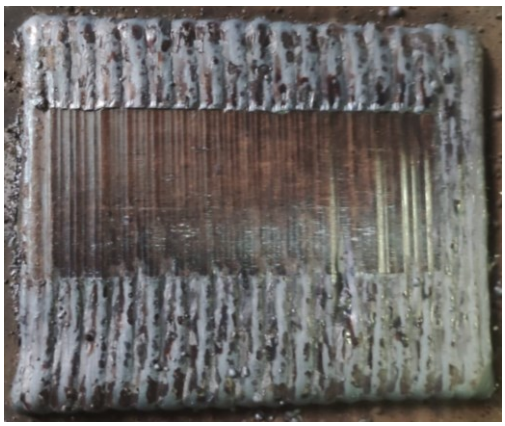

***Рис. 1.*** *Синтезированный образец после ВДУ при 700 °С*
***Fig. 1.*** *Synthesized sample after WDH at 700 °C*

***Таблица 1.*** *Количество слоев и высота образцов в зависимости от периодичности ВДУ*
***Table 1.*** *Number of layers and sample height depending on the WDH application frequency*

| Режимы синтеза образца | Периодичность ВДУ | Количество слоев | Высота образца, мм | Отступ от поверхности при измерении твердости по глубине, мм |
|---|---|---|---|---|
| Образец без ВДУ | – | 7 | 14,0 | 2,00 |
| ВДУ каждого наплавленного слоя | 1 | 7 | 14,0 | 2,00 |
| ВДУ каждого третьего наплавленного слоя | 3 | 9 | 17,5 | 3,75 |
| ВДУ каждого пятого наплавленного слоя | 5 | 10 | 19,0 | 4,50 |
| ВДУ каждого седьмого наплавленного слоя | 7 | 14 | 27,0 | 8,50 |

и коэффициент перекрытия отпечатков выбирались на основании данных, полученных на первом и втором этапах, исходя из условия максимального упрочнения.

На третьем этапе из синтезированных образцов вырезали образцы для испытаний на ударную вязкость и измеряли твердость. Величина отступа при измерении твердости указана в таблице 2.

### Методы измерений

Твердость измерялась по Виккерсу, модель твердомера KB30, нагрузка 1 кг. Измерение твердости осуществлялось в продольном и поперечном направлении подачи при ВДУ (не менее 3-х дорожек по глубине поверхностного слоя с шагом 0,3 мм), схема измерения представлена на рис. 2.

Ударная вязкость исследовалась на маятниковом копре модели ХР-05. Количество образцов на режим не менее трех. Образцы вырезались для исследований на ударный изгиб 10×10×55 мм из середины (по высоте) синтезированного образца, что позволяло оценивать свойства слоев изделия, подвергавшихся многократным циклам нагрева-охлаждения и неоднократному воздействию ударных волн. При этом нивелировалось влияние слоев, прилегающих к подложке и явно имеющих измененный химический состав вследствие перемешивания с материалом подложки, а также влияние интенсивно упрочненного верхнего слоя, не отпущенного под воздействием высокой температуры от наплавки следующего слоя (рис. 3).

Результаты применения ВДУ оценивались через степень упрочнения:

$$\Delta HV = \frac{HV - HV_0}{HV_0},$$

где $HV$ – твердость после применения ВДУ, кгс/мм$^2$;
$HV_0$ – твердость без упрочнения, кгс/мм$^2$.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ зависимостей, представленных на рис. 4, выявил четкое влияние температуры нагрева образца перед волновым деформационным упрочнением на получаемую

***Таблица 2.*** *Характеристики синтезированного материала в зависимости от периодичности ВДУ*
***Table 2.*** *Characteristics of the synthesized material depending on the frequency of the WDH*

| Режимы синтеза образца | Глубина от поверхности образца, мм | Степень упрочнения, % | Ударная вязкость, KCU (Дж/см$^2$) |
|---|---|---|---|
| Образец без ВДУ | 2,00–5,00 | – | 224 |
| ВДУ каждого наплавленного слоя | 2,00–5,00 | 8–11 | 256 |
| ВДУ каждого третьего наплавленного слоя | 3,75–6,75 | 10–13 | 234 |
| ВДУ каждого пятого наплавленного слоя | 4,50–7,50 | 8–11 | 238 |
| ВДУ каждого седьмого наплавленного слоя | 8,50–11,50 | 8–12 | 233 |

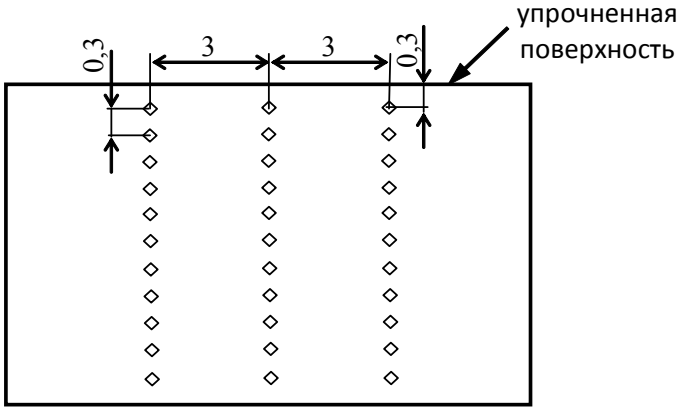


***Рис. 2.*** *Схема измерения твердости*
***Fig. 2.*** *Hardness measurement scheme*

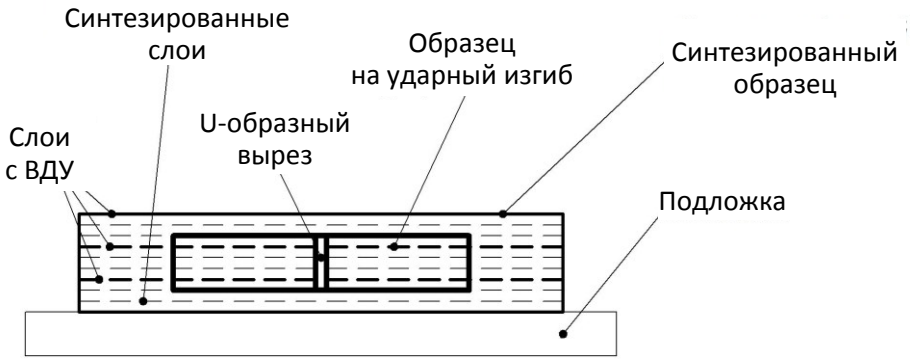


***Рис. 3.*** *Схема вырезки образца ВДУ после каждых трех наплавленных слоев*
***Fig. 3.*** *Cutting scheme for the WDH after every three deposited layers sample*

твердость. Наибольшая степень упрочнения достигается при температуре 500 °С: на глубине до 0,3 мм значение ΔHV составляет около 34 % (твердость синтезированного образца без ВДУ составила 163 HV), что значительно превышает степень упрочнения на той же глубине при 300 °С (≈22 %). При 400 °С наблюдается также достаточно высокое упрочнение на поверхности (≈30 %), однако уже на глубине 1 мм ΔHV снижается до 14 %, тогда как при 500 °С на той же глубине составляет 25 %. При температурах 600 и 700 °С степень упрочнения на глубине до 0,3 мм составляет 22 и 27 % соответственно, но эффективная глубина упрочнения (ΔHV>20 %) ограничена 1 мм, что связано с разупрочнением материала вследствие перегрева. При всех температурах образцов

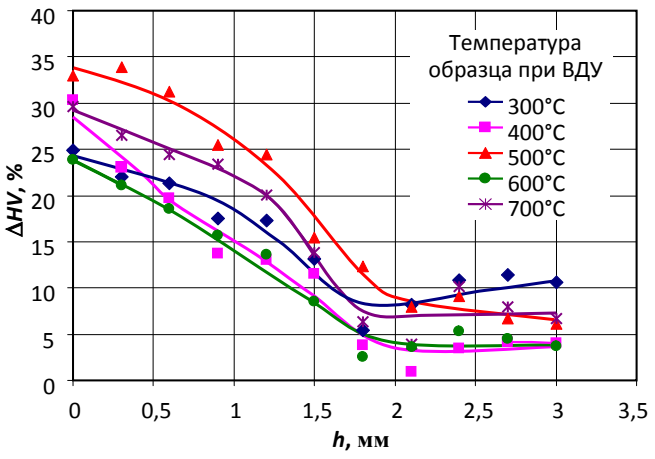


***Рис. 4.*** *Изменение степени упрочнения по глубине поверхностного слоя после ВДУ при различной температуре синтезированного образца. Каждая точка на графиках соответствует среднему арифметическому значению, полученному не менее чем по трем измерениям твердости в идентичных условиях*

***Fig. 4.*** *Change in the degree of hardening across the depth of the surface layer after WDH at different temperatures of the synthesized sample. Each point on the graphs corresponds to the arithmetic mean of at least three hardness measurements taken under identical conditions*

наблюдался характерный градиент изменения твердости по упрочненному поверхностному слою до глубины 2 мм. Таким образом, температура 500 °C обеспечивает наибольшую степень упрочнения и ее распределение по глубине, что послужило основанием для выбора этого значения на последующих этапах.

Анализ кривых на рис. 5 показывает, что при коэффициентах перекрытия *K*=0,3, 0,45 и 0,6 характер изменения степени упрочнения по глубине практически идентичен: на глубине до 0,3 мм ΔHV составляет 60–65 %, к глубине 1 мм снижается до 40–45 %, а к 2 мм – до 30–35 %. При *K*=0,7 упрочнение до глубины 0,3 мм также высокое (≈55%), однако спад по глубине происходит значительно быстрее и на глубине 2 мм составляет 25 %. Это свидетельствует о формировании перенаклепанного слоя. Таким образом, рекомендуемый диапазон коэффициента перекрытия при ВДУ синтезируемого сплава *K*=0,3–0,6. Следующий этап исследований проводился при *K*=0,45, поскольку он гарантированно находится внутри диапазона 0,3–0,6, вдали от его границ, где возможны нестабильные результаты.

На рис. 6 представлены зависимости изменения степени упрочнения по высоте синтезированного образца для различных режимов периодичности ВДУ. Данные таблицы 2 позволяют количественно оценить влияние периодичности ВДУ на механические свойства. Установлено, что при обработке каждого наплавленного слоя достигнуты степень упрочнения 8–11 % и максимальная ударная вязкость (256 Дж/см², что на 14 % выше, чем у необработанного образца – 224 Дж/см²). При обработке каждого

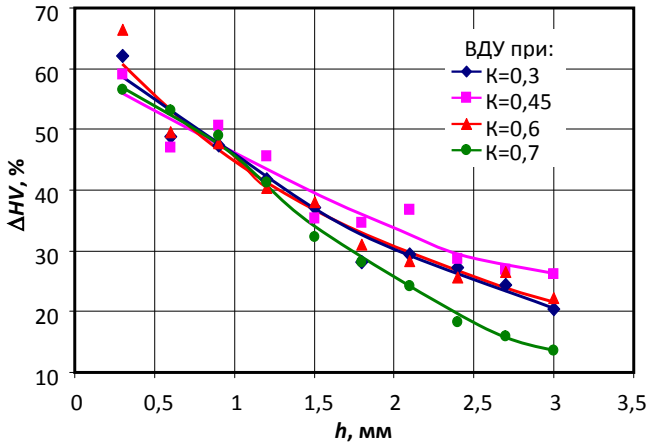


***Рис. 5.*** *Изменение степени упрочнения по глубине поверхностного слоя после ВДУ с разным коэффициентом перекрытия пластических отпечатков*

***Fig. 5.*** *Change in the degree of hardening across the depth of the surface layer after WDH with different overlap coefficients of plastic imprints*

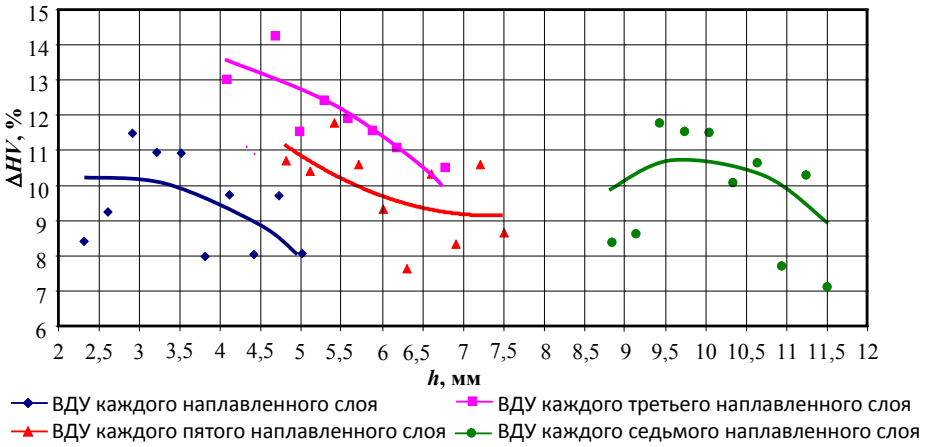


***Рис. 6.*** *Изменение степени упрочнения по высоте синтезированного образца с разной периодичностью ВДУ синтезированных слоев. Соединительные линии построены методом полиномиальной интерполяции второй степени по средним значениям измерений, что позволяет наглядно отразить общую тенденцию изменения твердости по глубине*
***Fig. 6.*** *Change in the degree of hardening along the height of the synthesized sample with different application frequency of WDH of the synthesized layers. The connecting lines are constructed using second-degree polynomial interpolation based on the average measurement values, which allows for a clear representation of the overall trend of hardness variation with depth*

третьего слоя степень упрочнения повышается до 10–13 %, а ударная вязкость составляет 234 Дж/см² (на 4,5 % выше исходной), что при существенно меньшей трудоемкости делает этот режим предпочтительным. При периодичности ВДУ «каждый пятый» и «каждый седьмой» слой степень упрочнения несколько снижается (8–12 %), а ударная вязкость остается на уровне 233–238 Дж/см². Важно отметить, что глубина зоны измерений при этих режимах смещена в область 4,5–11,5 мм, что подтверждает проникновение упрочнения вглубь материала. Таким образом, с точки зрения баланса между достигаемыми свойствами и производительностью процесса предпочтительным является ВДУ каждого третьего слоя.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Разброс значений измеренной твердости (среднеквадратичное отклонение) не превышал 5–7 %, что свидетельствует о достаточной воспроизводимости результатов.

Установленное рациональное значение температуры 500 °C (рис. 4) хорошо согласуется с известными закономерностями термомеханической обработки низкоуглеродистых сталей. При температурах 300–400 °C пластичность материала недостаточна для развития деформации большой глубины, а при 600-700 °C преобладают процессы разупрочнения (возврат и полигонизация). Выявленный максимум степени упрочнения при 500 °C соответствует области, где активно протекает пластическая деформация, но еще не начинается рекристаллизация, что обеспечивает наилучшие условия для деформационного упрочнения и сохранение наклепа при последующем охлаждении. Аналогичные температурные зависимости получены при горячей чеканке (HF-WAAM) аустенитной стали AISI 316L, где обработка при 900 °C приводила к росту зерна в поверхностных слоях [15], что подтверждает необходимость выбора температуры ниже порога интенсивной рекристаллизации.

Диапазон рациональных значений K=0,3–0,6, определенный на втором этапе исследований, соответствует условиям формирования равномерного наклепанного слоя без зон пропуска (при K<0,3) и без перенаклепа (при K>0,7). Выбор среднего значения K=0,45 для третьего этапа был продиктован стремлением к технологической стабильности. Полученные результаты согласуются с данными по результатам исследований ВДУ металлических материалов, полученных традиционными способами, где наилучшие результаты были получены при коэффициенте перекрытия в диапазоне 0,4–0,6 [16].

Проведенные исследования показывают, что интеграция ВДУ в процесс WAAM-синтеза стали 08Г2С позволяет существенно повысить механические свойства материала и управлять их распределением по объему изделия. В отличие от существующих гибридных подходов к WAAM, где деформационное упрочнение (межслойное накатывание, ударная чеканка, ультразвуковая обработка) используется при синтезе, но ограничивается поверхностным слоем в 2–3 мм [10; 11; 14; 15; 17], в данной работе предложено ВДУ, которое также интегрировано непосредственно в процесс послойной наплавки, но базируется на генерации плоских акустических волн. Благодаря этому волновая энергия проникает на глубину до 10–12 мм, что кардинально расширяет зону упрочнения. Полученные экспериментальные данные подтверждают, что гибридная технология ВДУ+WAAM обеспечивает упрочнение более 8 % на глубине 12 мм, что недостижимо для традиционных методов поверхностной пластической деформации, применяемых в гибридных технологиях.

Совокупность полученных данных позволяет сформулировать инженерные рекомендации для внедрения гибридной технологии WAAM+ВДУ в производство: обработку следует выполнять при температуре 500 °C

с коэффициентом перекрытия 0,3–0,6 с периодичностью «каждый третий слой». Это обеспечивает повышение твердости на 10–13 % на глубине более 12 мм, а также рост ударной вязкости до 14 % при сохранении высокой производительности процесса. Полученные результаты подтверждают потенциал волнового деформационного упрочнения как эффективного инструмента управления качеством WAAM-изделий.

При интерпретации результатов следует учитывать ряд допущений и ограничений. Исследование выполнено на одном материале, поэтому экстраполяция выводов на другие сплавы (нержавеющие стали, алюминиевые, титановые) требует дополнительной экспериментальной проверки. Оценка производительности процесса дана качественно, без прямых хронометражных измерений. Полученные выводы справедливы для конкретных режимов синтеза (ток 140–150 А, напряжение 21 В, скорость подачи 7,2 м/мин) и могут потребовать корректировки при изменении параметров наплавки.

Представляются целесообразными следующие направления развития работы. Исследование эффективности ВДУ для других конструкционных сталей, алюминиевых и титановых сплавов позволит определить границы применимости разработанной методики. Разработка конечно-элементной модели процесса ВДУ, аналогичной моделям для прогнозирования короблений при WAAM, даст возможность оптимизировать параметры обработки без проведения трудоемких экспериментов. Поскольку одной из основных задач деформационного упрочнения является повышение сопротивления усталости, необходимы испытания на циклическую долговечность образцов, полученных по предлагаемой гибридной технологии.

Полученные результаты могут быть рекомендованы для авиационной и аэрокосмической промышленности для деталей, работающих в условиях динамических нагрузок (корпусные детали, шпангоуты и фитинги). Повышение ударной вязкости (до 14 %) важно для деталей шасси и креплений, воспринимающих динамические нагрузки при взлете и посадке. Могут применяться в атомной энергетике, где требования к надежности максимальны, а возможность упрочнения материалов изделий ВДУ позволяет рассматривать WAAM как альтернативу ковке и литью для некоторых категорий деталей (например, корпуса запорной арматуры, патрубки и переходники, элементы корпусов насосов, детали паропроводов и др.). В тяжелом и транспортном машиностроении предлагаемая технология позволяет не только изготавливать новые детали (зубья ковшей, траверсы, кронштейны и др.), но и восстанавливать изношенные поверхности с упрочнением, что подтверждается мировым опытом применения гибридных WAAM-методов для ремонта [18; 19].

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Разработана методика определения режимов ВДУ синтезированных WAAM-методом металлических материалов, которая включает в себя выбор температуры синтезируемого материала перед ВДУ, коэффициента перекрытия пластических отпечатков и периодичности выполнения ВДУ, что позволяет добиваться максимальной степени упрочнения.

Установлены рациональные параметры волнового деформационного упрочнения для WAAM-синтезированной стали 08Г2С:

– температура обработки 500 °С;

– коэффициент перекрытия пластических отпечатков 0,3–0,6;

– последовательность обработки ВДУ – после каждых трех наплавленных слоев.

Применение ВДУ позволяет управлять твердостью синтезированных образцов на глубине более чем 12 мм. ВДУ позволяет повысить твердость синтезированного материала не менее, чем на 8–13 % по сравнению с неупрочненными образцами при сохранении однородности свойств по глубине. При этом ударная вязкость повышается до 14 %.

Предложенный подход обеспечивает повышение производительности гибридного процесса WAAM-ВДУ за счет сокращения количества переходов наплавки и упрочнения отдельных слоев синтезируемого изделия.

Результаты исследования могут быть использованы для разработки технологических процессов изготовления ответственных машиностроительных деталей, к которым предъявляются повышенные требования к качеству поверхностного слоя, твердости и прочности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tomar B., Shiva S., Nath T. A review on wire arc additive manufacturing: Processing parameters, defects, quality improvement and recent advances // Materials Today Communications. 2022. Vol. 31. Article number 103739. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2022.103739.
2. Cunningham C.R., Flynn J.M., Shokrani A., Dhokia V., Newman S.T. Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing // Additive Manufacturing. 2018. Vol. 22. P. 672–686. DOI: 10.1016/j.addma.2018.06.020.
3. Donghong Ding, Zengxi Pan, Cuiuri D., Huijun Li. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2015. Vol. 81. P. 465–481. DOI: 10.1007/s00170-015-7077-3.
4. Yan Li, Chen Su, Jianjun Zhu. Comprehensive review of wire arc additive manufacturing: Hardware system, physical process, monitoring, property characterization, application and future prospects // Results in Engineering. 2022. Vol. 13. Article number 100330. DOI: 10.1016/j.rineng.2021.100330.
5. 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. DOI: 10.1016/j.cirpj.2021.04.010.
6. Kokare S., Oliveira J.P., Santos T.G., Godina R. Environmental and economic assessment of a steel wall fabricated by wire-based directed energy deposition // Additive Manufacturing. 2023. Vol. 61. Article number 103316. DOI: 10.1016/j.addma.2022.103316.
7. Jafari D., Vaneker T.H.J., Gibson I. Wire and arc additive manufacturing: Opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts // Materials & Design. 2021. Vol. 202. Article number 109471. DOI: 10.1016/j.matdes.2021.109471.

8. Jiamin Sun, Jonas H., Markus K., Klaus D. Residual stress in wire and arc additively manufactured aluminum components // Journal of Manufacturing Processes. 2021. Vol. 65. P. 97–111. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.02.021.
9. Rodrigues T.A., Duarte V., Miranda R.M., Santos T.G., Oliveira J.P. Current Status and Perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) // Materials. 2019. Vol. 12. № 7. Article number 1121. DOI: 10.3390/ma12071121.
10. McAndrew A.R., Rosales M.A., Colegrove P.A., Hönnige J.R., Ho A., Fayolle R., Eyitayo K., Stan I., Sukrongpang P., Crochemore A., Pinter Z. Interpass rolling of Ti-6Al-4V wire + arc additively manufactured features for microstructural refinement // Additive Manufacturing. 2018. Vol. 21. P. 340–349. DOI: 10.1016/j.addma.2018.03.006.
11. Jianglong Gu, Jialuo Ding, Williams S.W., Huimin Gu, Jing Bai, Yuchun Zhai, Peihua Ma. The strengthening effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on the additively manufactured Al–6.3Cu alloy // Materials Science and Engineering: A. 2016. Vol. 651. P. 18–26. DOI: 10.1016/j.msea.2015.10.101.
12. Rujian Sun, Liuhe Li, Ying Zhu, Wei Guo, Peng Peng, Baoqiang Cong, Jianfei Sun, Zhigang Che, Bo Li, Chao Guo, Lei Liu. Microstructure, residual stress and tensile properties control of wire-arc additive manufactured 2319 aluminum alloy with laser shock peening // Journal of Alloys and Compounds. 2018. Vol. 747. P. 255–265. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.02.353.
13. Colegrove P.A., Jack Donoghue, Martina F., Jianglong Gu, Prangnell P., Jan Hönnige. Application of bulk deformation methods for microstructural and material property improvement and residual stress and distortion control in additively manufactured components // Scripta Materialia. 2017. Vol. 135. P. 111–118. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2016.10.031.
14. Карташев М.Ф., Пермяков Г.Л., Трушников Д.Н., Миндибаев М.Р. Исследование влияния деформационного упрочнения на механические свойства образцов из сплава АМг5, полученных способом многослойной наплавки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2019. Т. 17. № 3. С. 38–45. DOI: 10.18503/1995-2732-2019-17-3-38-45.
15. Duarte V.R., Rodrigues T.A., Schell N., Miranda R.M., Oliveira J.P., Santos T.G. Hot forging wire and arc additive manufacturing (HF-WAAM) // Additive Manufacturing. 2020. Vol. 35. Article number 101193. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101193.
16. Kirichek A.V., Barinov S.V. Relationship Between Processing Parameters Product Dimensions and Wave Strain Hardening // Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2022. Vol. 144. Article number 034501. DOI: 10.1115/1.4052008.
17. Sahu V.K., Biswal R., Davis A.E., Chen X., Williams S.W., Prangnell P.B. β-Grain refinement in WAAM Ti-6Al-4V processed with inter-pass ultrasonic impact peening // Materialia. 2024. Vol. 38. Article number 102236. DOI: 10.1016/j.mtla.2024.102236.
18. Shenheng Hu, Keyi Wang, Xia Li, Wenbo Du, Minghui Liu, Jinming Qi. Development and experimental validation of a hybrid wire arc additive manufacturing and milling repair platform // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2025. Vol. 26. № 8. P. 2073–2092. DOI: 10.1007/s12541-025-01242-5.
19. Tzimanis K., Koutsokeras M.S., Bourlesas N., Porevopoulos N., Pastras G., Stavropoulos P. Digital transformation of wire DED-LB: enabling industrial scalability through monitoring and control systems // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2025. Vol. 140. P. 6609–6642. DOI: 10.1007/s00170-025-16654-w.

## REFERENCES

1. Tomar B., Shiva S., Nath T. A review on wire arc additive manufacturing: Processing parameters, defects, quality improvement and recent advances. *Materials Today Communications*, 2022, vol. 31, article number 103739. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2022.103739.
2. Cunningham C.R., Flynn J.M., Shokrani A., Dhokia V., Newman S.T. Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 2018, vol. 22, pp. 672–686. DOI: 10.1016/j.addma.2018.06.020.
3. Donghong Ding, Zengxi Pan, Cuiuri D., Huijun Li. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, vol. 81, pp. 465–481. DOI: 10.1007/s00170-015-7077-3.
4. Yan Li, Chen Su, Jianjun Zhu. Comprehensive review of wire arc additive manufacturing: Hardware system, physical process, monitoring, property characterization, application and future prospects. *Results in Engineering*, 2022, vol. 13, article number 100330. DOI: 10.1016/j.rineng.2021.100330.
5. Pattanayak S., Sahoo S.K. Gas metal arc welding based additive manufacturing – a review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2021, vol. 33, pp. 398–442. DOI: 10.1016/j.cirpj.2021.04.010.
6. Kokare S., Oliveira J.P., Santos T.G., Godina R. Environmental and economic assessment of a steel wall fabricated by wire-based directed energy deposition. *Additive Manufacturing*, 2023, vol. 61, article number 103316. DOI: 10.1016/j.addma.2022.103316.
7. Jafari D., Vaneker T.H.J., Gibson I. Wire and arc additive manufacturing: Opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts. *Materials & Design*, 2021, vol. 202, article number 109471. DOI: 10.1016/j.matdes.2021.109471.
8. Jiamin Sun, Jonas H., Markus K., Klaus D. Residual stress in wire and arc additively manufactured aluminum components. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, vol. 65, pp. 97–111. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.02.021.
9. Rodrigues T.A., Duarte V., Miranda R.M., Santos T.G., Oliveira J.P. Current Status and Perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). *Materials*, 2019, vol. 12, no. 7, article number 1121. DOI: 10.3390/ma12071121.
10. McAndrew A.R., Rosales M.A., Colegrove P.A., Hönnige J.R., Ho A., Fayolle R., Eyitayo K., Stan I., Sukrongpang P., Crochemore A., Pinter Z. Interpass rolling of Ti-6Al-4V wire + arc additively manufactured features for microstructural refinement. *Addi-*

*tive Manufacturing*, 2018, vol. 21, pp. 340–349. DOI: 10.1016/j.addma.2018.03.006.
11. Jianglong Gu, Jialuo Ding, Williams S.W., Huimin Gu, Jing Bai, Yuchun Zhai, Peihua Ma. The strengthening effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on the additively manufactured Al–6.3Cu alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, vol. 651, pp. 18–26. DOI: 10.1016/j.msea.2015.10.101.
12. Rujian Sun, Liuhe Li, Ying Zhu, Wei Guo, Peng Peng, Baoqiang Cong, Jianfei Sun, Zhigang Che, Bo Li, Chao Guo, Lei Liu. Microstructure, residual stress and tensile properties control of wire-arc additive manufactured 2319 aluminum alloy with laser shock peening. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, vol. 747, pp. 255–265. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.02.353.
13. Colegrove P.A., Jack Donoghue, Martina F., Jianglong Gu, Prangnell P., Jan Hönnige. Application of bulk deformation methods for microstructural and material property improvement and residual stress and distortion control in additively manufactured components. *Scripta Materialia*, 2017, vol. 135, pp. 111–118. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2016.10.031.
14. Kartashev M.F., Permyakov G.L., Trushnikov D.N., Mindibaev M.R. Understanding the effect of work hardening on the mechanical properties of aluminum alloy 5056 specimens produced by multilayer surfacing. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2019, vol. 17, no. 3, pp. 38–45. DOI: 10.18503/1995-2732-2019-17-3-38-45.
15. Duarte V.R., Rodrigues T.A., Schell N., Miranda R.M., Oliveira J.P., Santos T.G. Hot forging wire and arc additive manufacturing (HF-WAAM). *Additive Manufacturing*, 2020, vol. 35, article number 101193. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101193.
16. Kirichek A.V., Barinov S.V. Relationship Between Processing Parameters Product Dimensions and Wave Strain Hardening. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2022, vol. 144, article number 034501. DOI: 10.1115/1.4052008.
17. Sahu V.K., Biswal R., Davis A.E., Chen X., Williams S.W., Prangnell P.B. β-Grain refinement in WAAM Ti-6Al-4V processed with inter-pass ultrasonic impact peening. *Materialia*, 2024, vol. 38, article number 102236. DOI: 10.1016/j.mtla.2024.102236.
18. Shenheng Hu, Keyi Wang, Xia Li, Wenbo Du, Minghui Liu, Jinming Qi. Development and experimental validation of a hybrid wire arc additive manufacturing and milling repair platform. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2025, vol. 26, no. 8, pp. 2073–2092. DOI: 10.1007/s12541-025-01242-5.
19. Tzimanis K., Koutsokeras M.S., Bourlesas N., Porevopoulos N., Pastras G., Stavropoulos P. Digital transformation of wire DED-LB: enabling industrial scalability through monitoring and control systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2025, vol. 140, pp. 6609–6642. DOI: 10.1007/s00170-025-16654-w.

UDC 621.791
doi: https://doi.org/10.18323/2782-4039-2026-1-75-3

# Wave deformation hardening in hybrid WAAM technology: finding optimal modes using 08G2S steel as an example

***Andrey V. Kirichek***[1,3], Doctor of Sciences (Engineering), Professor,
Vice-Rector for Strategic Development
***Dmitry L. Solovyev****[2,4], Doctor of Sciences (Engineering), Professor,
professor of Chair of Mechanical Engineering Technology
***Aleksandr V. Yashin***[2,5], PhD (Engineering), Associate Professor,
Head of Chair of Mechanical Engineering Technology
***Sergey A. Silantyev***[2,6], PhD (Engineering), Associate Professor,
assistant professor of Chair of Mechanical Engineering Technology
[1]*Bryansk State Technical University, Bryansk (Russia)*
[2]*Vladimir State University, Vladimir (Russia)*

***E-mail:** murstin@yandex.ru

[3]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3823-0501
[4]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4475-319X
[5]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3186-1300
[6]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3524-385X

*Received 21.01.2026* *Revised 11.02.2026* *Accepted 05.03.2026*

***Abstract:*** **Problem.** The widespread adoption of additive manufacturing technologies, particularly the WAAM method, is hindered by the insufficient level of mechanical properties of synthesized products: microstructural heterogeneity, porosity, and high residual stresses. A promising direction for solving this problem is the application of hybrid technologies combining additive manufacturing with subsequent processing. **Aim.** To determine the rational range of wave deformation hardening (WDH) modes when used in hybrid technology for synthesizing products by the WAAM method, ensuring an increase in the mechanical properties (hardness and impact toughness) of the synthesized product. **Methods.** Samples of 08G2S steel produced by the WAAM method were subjected to WDH using a specialized setup with a hydraulic pulse generator. In a three-stage experiment, the sample heating temperature (300–700 °C), the overlap coefficient of plastic

imprints (0.3–0.7), and the processing frequency (every layer, every third, every fifth, and every seventh deposited layer) were varied. Vickers hardness through the depth, the degree of hardening, and KCU impact toughness were measured. **Results.** It was established that maximum hardening is achieved at a temperature of 500 °C, an overlap coefficient of 0.3–0.6, and processing of every third deposited layer. This made it possible not only to increase the material hardness by 8–13 % at a depth of more than 12 mm and increase impact toughness by up to 14 %, ensuring uniformity of properties throughout the product volume, but also to improve the productivity of the hybrid process. **Conclusions.** The developed methodology makes it possible to control effectively the mechanical properties of WAAM products by determining rational parameters of wave deformation hardening. The proposed approach can be used in the manufacture of critical components in mechanical engineering.

***Keywords:*** wave deformation hardening; WAAM; wire arc additive manufacturing; hybrid additive manufacturing; 08G2S steel; surface hardness; impact toughness

***Acknowledgements:*** The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, the work “Conducting Fundamental Scientific Research” within the framework of the basic part of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under project No. FZWR-2024-0003 (No. 075-00150-24-03) “Development of a technological strategy and theoretical-experimental study of key elements of the technology for additive synthesis of metal wire parts by the 3DMP method and deformation thermal strain hardening of synthesized machine parts”.

***For citation:*** Kirichek A.V., Solovyev D.L., Yashin A.V., Silantyev S.A. Wave deformation hardening in hybrid WAAM technology: finding optimal modes using 08G2S steel as an example. *Frontier Materials & Technologies*, 2026, no. 1, pp. 27–37. DOI: https://doi.org/10.18323/2782-4039-2026-1-75-3.