



## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТАНДЕМНОЙ GMAW-СВАРКИ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ И СТРУКТУРУ ШВА

*Ханов Атагелди Мурадович,  
менеджер по снабжению и логистике,  
Хозяйственное Общество «Азия Ёллары»,  
г. Ашгабат, Туркменистан*

*E-mail: atageldi@yandex.ru*

**Аннотация.** В статье рассмотрено влияние режимов тандемной GMAW-сварки на производительность процесса и формирование структуры сварного соединения. Проанализированы технологические особенности двухдуговой схемы, нормативная идентификация процесса, параметры управления ведущей и ведомой дугами, а также их влияние на скорость сварки, производительность наплавки и фактическое время горения дуги. Показано, что увеличение суммарной скорости подачи проволоки и оптимизация компоновки дуг обеспечивают кратный рост производительности по сравнению с одноэлектродной GMAW. Рассмотрены механизмы формирования структуры металла шва и зоны термического влияния в зависимости от термического цикла и скорости охлаждения. Установлена зависимость между снижением скорости охлаждения и уменьшением вероятности образования холодных трещин. Сделан вывод о том, что рациональный выбор режимов тандемной GMAW позволяет одновременно повышать производительность и управлять структурным состоянием сварного соединения.

**Ключевые слова:** тандемная GMAW-сварка, MIG/MAG, двухдуговая сварка, производительность сварки, скорость подачи проволоки, термический цикл, зона термического влияния, структура металла шва, скорость охлаждения, трещинообразование.

### **Актуальность исследования**

Актуальность исследования обусловлена тем, что в промышленности сохраняется устойчивый запрос на повышение темпов сварочного производства при одновременном обеспечении стабильного качества соединений. Тандемная GMAW-сварка относится к вариантам дуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах (GMAW), где процесс реализуется с использованием двух электродных проволок и, как следствие, позволяет увеличить производительность за счёт роста скорости наплавки и скорости сварки по сравнению с одно-проволочной GMAW. В технических обзорах и справочных

материалах указывается, что для тандемной GMAW типичны кратные приросты по скорости перемещения и по скорости наплавки, что напрямую влияет на сокращение времени выполнения сварных швов и технологических циклов.

Одновременно повышение производительности в тандемных режимах сопровождается изменением тепловложения и условий формирования сварочной ванны, что отражается на геометрии валика, глубине проплавления, протекании дегазации и, в конечном счёте, на структуре металла шва и зоны термического влияния. В справочных разъяснениях и публикациях подчёркивается, что увеличение скорости сварки может приводить к снижению тепловложения и деформаций, а также обсуждаются эффекты, связанные с пористостью и особенностями вытянутой сварочной ванны. Научные статьи последних лет дополнительно показывают, что параметры ведущей и ведомой дуги (скорость сварки, скорости подачи проволоки и другие режимные настройки) статистически значимо влияют на форму шва и проплавление, а исследования по двойной/твин-проволочной дуговой сварке рассматривают связь параметров процесса с формированием структуры и свойств соединений.

В этой связи исследование влияния режимов тандемной GMAW-сварки на производительность и структуру шва является актуальным как для обоснованного выбора технологических параметров, так и для управления качеством сварных соединений через контроль тепловложения и металлургических последствий процесса.

#### **Цель исследования**

Целью данного исследования является анализ влияния режимов тандемной GMAW-сварки на производительность процесса и формирование структуры сварного соединения, а также обоснование взаимосвязи между параметрами ведущей и ведомой дуг, термическим циклом и структурным состоянием металла шва и зоны термического влияния.

#### **Материалы и методы исследования**

В работе использованы данные нормативных документов (ГОСТ Р ИСО 4063), открытых технических публикаций и экспериментальных исследований, посвящённых двухдуговой сварке сталей. Анализ проводился на основе сопоставления режимных параметров, показателей производительности и характеристик термического цикла. Для оценки структурных последствий использованы опубликованные результаты металлографических и дефектологических исследований, в том числе данные по стали 14ХНЗМДА с анализом наличия трещин в зоне термического влияния при различных скоростях охлаждения.

#### **Результаты исследования**

Тандемная GMAW-сварка (tandem MIG/MAG) рассматривается как разновидность дуговой сварки плавящейся электродной проволокой в защитных газах, в которой формирование единой сварочной ванны обеспечивается двумя электродными проволоками, подаваемыми в одну зону сварки. В нормативной и технической терминологии процессы дуговой сварки, пайки и резки идентифицируются условными номерами по ГОСТ Р ИСО 4063; важный для

тандемной технологии момент заключается в том, что при использовании более одного электрода в обозначении процесса указывается дополнительная цифра (1, 2 и т. д.), то есть сам стандарт допускает фиксацию «двухэлектродности» как признака процесса.

Для понимания технологической сущности процесса дуговой сварки плавящимся электродом в среде защитного газа целесообразно рассмотреть состав оборудования и схему формирования сварочной ванны (рисунок 1).

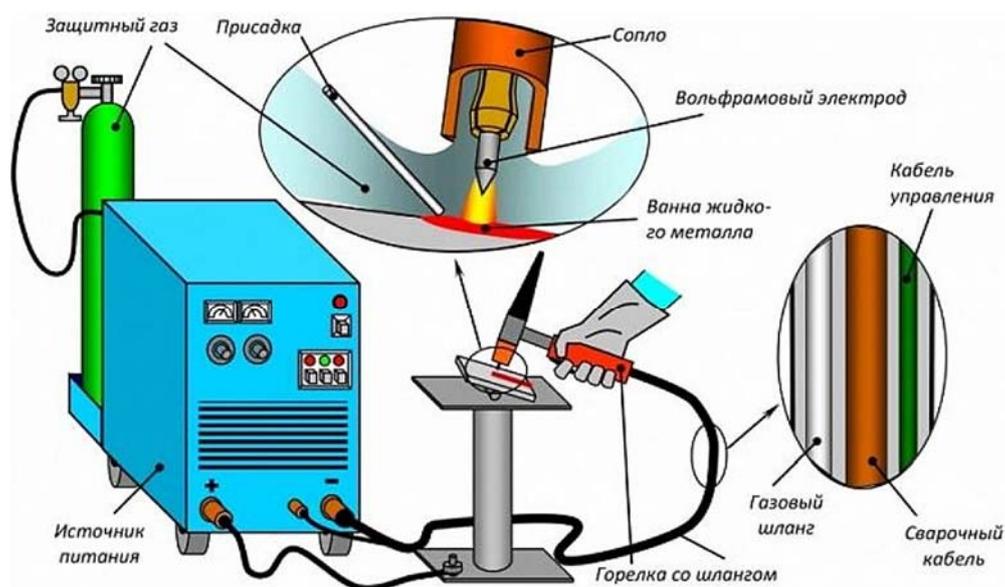


Рис. 1 Схема оборудования и принципа выполнения дуговой сварки плавящимся электродом в среде защитного газа (GMAW) [1]

В практическом описании тандемной MIG/MAG-сварки, распространённом в российском профессиональном сегменте оборудования, подчёркивается принципиальная компоновка: две независимые сварочные цепи (как минимум два механизма подачи проволоки и два источника питания), сходящиеся в одной специализированной сварочной головке. Это отличает «Tandem» от близких по названию решений типа «двухпроволочной сварки от одного источника», где обе проволоки питаются от одного источника и имеют одинаковый электрический потенциал. Именно независимость регулирования параметров по каждой проволоке задаёт теоретическую базу для отдельного управления ведущей и ведомой дугой: можно целенаправленно сочетать режимы переноса металла, тепловложение и устойчивость процесса, добиваясь требуемой геометрии валика и проплавления при высокой скорости.

С позиции теории процесса ключевым является согласование электрических и кинематических параметров обеих дуг. Для MIG/MAG в целом установлено, что управление характеристиками дуги и переносом электродного металла достигается программированием силы тока, напряжения и скорости подачи проволоки; в научной литературе это рассматривается как основа

современных импульсных и программно-управляемых вариантов MIG/MAG-сварки. Для тандемной схемы этот подход принципиально расширяется: параметры задаются не «в среднем по процессу», а отдельно для каждой дуги, что позволяет выстраивать «функциональное разделение» дуг (например, ведущая дуга – формирование проплавления и устойчивого фронта ванны, ведомая – наплавка и формирование валика) при сохранении одной общей ванны [3, с. 4].

Немаловажную роль в теоретическом описании занимает узел горелки/головки и геометрия подвода проволок. В специализированных тандемных головках конструктивно предусматривается регулирование высоты и угла установки контактных трубок (для поддержания постоянной дистанции до изделия), смена газовых сопел под рабочие углы, а также развитое водяное охлаждение вплоть до газового сопла – это связано с работой на повышенных токах и тепловой нагрузкой оборудования. В описаниях конкретных комплексов для тандемной MIG/MAG-сварки приводятся ориентиры по токам источников питания (например, упоминаются варианты с тиристорным источником порядка 635 А и инверторным порядка 450 А) и указывается применимость к углеродистым, коррозионно-стойким сталям и алюминию.

В таблице 1 приведен пример структурирования таких обозначений в виде справочной таблицы.

Таблица 1

Обозначение процессов дуговой сварки плавящимся электродом (MIG/MAG)

Процесс (по ГОСТ Р ИСО 4063)	Краткое наименование в практике	Среда защитного газа	Пример указания числа электродов в обозначении
131	MIG (плавящаяся проволока)	Инертный газ	В стандарте приведён пример: «... двумя сплошными проволоками ... обозначается ... 131-2»
135	MAG (плавящаяся сплошная проволока)	Активный газ/смесь	Число электродов указывается дополнительной цифрой (1, 2 и т. д.)
136/138	MAG (порошковая проволока)	Активный газ/смесь	Аналогично: возможность отражать двухэлектродное исполнение через доп. цифру

Источник: [2].

Газовая защита в теоретической модели тандемной GMAW-сварки рассматривается как обязательное условие стабильности дуг и металлургической чистоты сварочной ванны, а практический параметр, который напрямую включается в режим, – расход газа. В открытых методических материалах по MIG-сварке приводится типовой рекомендуемый диапазон расхода защитного газа 10-15 л/мин (с оговоркой зависимости от условий сварки). Этот диапазон важен для тандемной схемы ещё и потому, что общая ванна и увеличенная зона

расплава требуют устойчивого «газового колпака» при возросшем тепловыделении.

Производительность тандемной GMAW-сварки в технологическом анализе корректно рассматривать не только как «скорость сварки», но как совокупный результат режима переноса электродного металла (через суммарную скорость подачи двух проволок и соответствующие токи/напряжения), доли времени реального горения дуги в смене и доли вспомогательных операций. Расчёты производительности обычно опираются на показатели скорости сварки (см/мин или м/мин), производительности наплавки (кг/ч) и фактического «arc-time» (времени горения дуги) в структуре рабочего времени. В открытых материалах по организации сварочного производства приводится ориентир, что при ручной MIG/MAG доля времени непосредственного горения дуги составляет порядка 40-45% рабочего времени (около 3-3,5 часа в смену), тогда как применение механизации перемещения горелки позволяет увеличить время сварки до 5-6 часов в смену за счёт снижения потерь времени на перемещения и стабилизации траектории. Это важно для тандемной GMAW, потому что даже при одинаковой «паспортной» скорости режима итоговая выработка по метрам шва и по килограммам наплавленного металла определяется тем, насколько процесс непрерывен и стабилен.

На рисунке 2 представлен пример механизации сварки двумя горелками (как фактор повышения фактической производительности через рост времени горения дуги).

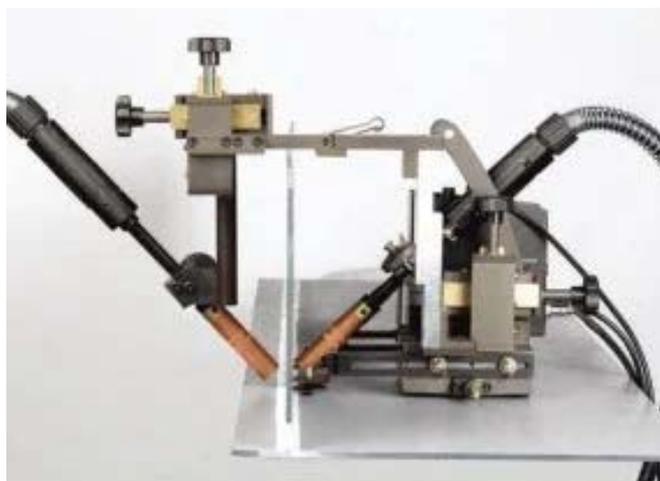


Рис. 2 Пример механизации сварки двумя горелками

В части именно режимов тандемной GMAW ключевым источником прироста производительности выступает рост металловложения: две дуги работают в общей зоне формирования ванны, а суммарная подача проволоки (ведущей и ведомой) обеспечивает более высокую скорость наплавки. В открытых публикациях, посвящённых внедрению тандем-процесса, прямо

приводятся сравнительные примеры «одна проволока / тандем» с указанием скорости подачи проволоки, скорости сварки и производительности (таблица 2).

Таблица 2

Примеры влияния тандемного режима на скорость сварки и производительность

Применение (материал, толщина)	Режим	Скорость подачи проволоки, м/мин	Скорость сварки, см/мин	Производительность, кг/ч
Балки (сталь, 20 мм)	Одна проволока	13	30	7,29
Балки (сталь, 20 мм)	Тандем	19,1 (вед.) + 9 (ведом.)	80	15,17
Катализаторы (CrNi4370, 1 мм)	Одна проволока	11	120	5,28
Катализаторы (CrNi4370, 1 мм)	Тандем	19,1 (вед.) + 14 (ведом.)	290	11,88
Топливные баки (Al, 2 мм)	Одна проволока	4,6	55	0,84
Топливные баки (Al, 2 мм)	Тандем	8,2 (вед.) + 6,1 (ведом.)	130	1,82

Источник: [4].

С инженерной точки зрения влияние режимов тандемной GMAW на производительность раскрывается через управляемые параметры: скорости подачи каждой проволоки (определяющие суммарное металловложение), скорость сварки, а также диапазоны, в которых процесс остаётся технологически устойчивым для заданной толщины и положения шва (таблица 3).

Таблица 3

Пример типовых диапазонов скорости подачи проволоки и скорости сварки для одно- и двухпроволочного процесса (выдержка по стали)

Тип соединения / положение	Толщина, мм	Скорость подачи проволоки, м/мин (одна / две проволоки)	Скорость сварки, см/мин
Нахлесточное соединение с отбортовкой (РА)	2	14-16 / 12-14	250-300
Нахлесточное соединение (РВ)	3	9-12 / 7-10	150-250
Стыковой шов (РА)	3	9-12 / 7-10	150-200
Тавровое соединение (РВ)	10	12-14 / 11-13	100-120
Тавровое соединение (РА)	10-20	15-18 / 14-17	60-160

Источник: [6].

Структура сварного соединения при дуговой сварке плавящимся электродом в защитном газе формируется под воздействием термического цикла, который определяется режимами сварки и условиями теплоотвода. Решающее значение имеет скорость охлаждения в интервале 600-500 °С – зоне наименьшей устойчивости аустенита. При замедленном охлаждении формируются ферритно-перлитные структуры, при более высоких скоростях возрастает доля бейнита и мартенсита, что сопровождается ростом внутренних напряжений и повышенной склонностью к холодным трещинам.

Зона термического влияния (ЗТВ) подразделяется на участки по максимальным температурам нагрева (перегрева, нормализации, неполной перекристаллизации и отпускных изменений), что отражает различную степень аустенитизации и крупности зерна. Изменение погонной энергии и режима нагрева влияет на ширину ЗТВ и характер структурных превращений в околошовной зоне.

В двухдуговой (тандемной) схеме вторая дуга воздействует на металл, который уже начал охлаждаться после действия первой дуги, тем самым изменяя форму термического цикла. Отмечается, что такое воздействие замедляет охлаждение металла ЗТВ и снижает склонность к образованию холодных трещин; выраженность эффекта зависит от расстояния между дугами.

Экспериментальные данные по стали 14ХНЗМДА подтверждают эту зависимость: при уменьшении скорости охлаждения в ЗТВ с 5,5 до 1,0-0,8 °С/с трещины не наблюдались, тогда как при более высоких скоростях охлаждения фиксировалось их образование (таблица 4).

Таблица 4

Влияние схемы сварки и расстояния между дугами на скорость охлаждения и образование трещин в зоне термического влияния

Условия сварки	Расстояние между дугами, мм	Скорость охлаждения, °С/с	Трещины в ЗТВ
Однодуговая	–	5,5	Есть
Двухдуговая	250	1,0	Нет
Двухдуговая	200	0,8	Нет

Источник: [5].

С технологической точки зрения приведённые значения позволяют корректно сформулировать механизм влияния режимов тандемной GMAW на структуру: по мере уменьшения скорости охлаждения в околошовной зоне снижается вероятность формирования полностью закалочных структур и уменьшается риск холодных трещин; при этом в тандемной схеме «смягчение» термического цикла достигается не только предварительным подогревом, но и подбором расстояния между дугами и распределением тепловложения между ведущей и ведомой дугой. Это объясняет, почему одинаковая суммарная погонная энергия может давать различный структурный результат при разной

компоновке дуг: важна не только величина тепловложения, но и временная форма термического цикла в конкретной точке ЗТВ.

Формирование структуры металла шва в тандемной GMAW также чувствительно к режимам, поскольку кристаллизация расплава и последующие превращения протекают при иных условиях теплоотвода и напряжённого состояния. В период кристаллизации металл шва уязвим к дефектам горячего растрескивания, а наличие концентраторов напряжений (например, непровара в корне) и неблагоприятные условия ведения процесса повышают вероятность горячих трещин. В литературе подчёркивается связь таких дефектов с термическими воздействиями и условиями кристаллизации металла шва.

### **Выводы**

Таким образом, тандемная GMAW-сварка обеспечивает существенный рост производительности за счёт увеличения суммарного металловложения и скорости сварки при сохранении устойчивости процесса. Одновременно режимы тандемной сварки оказывают прямое влияние на термический цикл и скорость охлаждения в зоне термического влияния, что определяет структурное состояние металла и склонность к образованию холодных трещин. Снижение скорости охлаждения в интервале фазовых превращений приводит к уменьшению вероятности формирования закалочных структур и дефектов. Рациональный подбор параметров ведущей и ведомой дуг, а также расстояния между ними позволяет управлять структурой сварного соединения при одновременном повышении производительности процесса.

### **Литература:**

1. Аргонодуговая сварка TIG: ГОСТ, видео, технология и оборудование [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://molibden-wolfram.ru/argonodugovaa-svarka-tig-gost-video-tehnologia-i-oborudovanie-2/>.
2. ГОСТ Р ИСО 4063-2010. Сварка. Термины и определения дуговой сварки, пайки и резки (ISO 4063:2005, IDT). – М.: Стандартинформ. – 2010. – 48 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://meganorm.ru/Data/508/50814.pdf>.
3. Крампит А.Г., Зернин Е.А., Крампит М.А. Современные способы импульсно-дуговой MIG/MAG сварки // Технологии и материалы. – 2015. – № 1. – С. 4-11.
4. Практические основы MIG-сварки // СварМашина [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://svarma.ru/data/files/16488162296246ca11a1f5c.pdf>.
5. Новиков К.Ю. Влияние схем двухдуговой сварки на процесс образования структуры сварного соединения: дис. ... канд. техн. наук / Новиков К.Ю. – Тольятти, 2018. – 160 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://dspace.tltsu.ru/bitstream/123456789/8021/1/Новиков%20К.Ю.\\_МТМм-1602a.pdf](https://dspace.tltsu.ru/bitstream/123456789/8021/1/Новиков%20К.Ю._МТМм-1602a.pdf).
6. Технология тандем сварки. Надёжность применения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dvt-spb.ru/article/tehnologiya-tandem-svarki-nadezhnost-primeneniya>.