

# **Сварка железнодорожных вагонов: задачи в области материалов, процессов и автоматизации**

Доктор наук Герхард Пош, Фрониус Интернациональ ГмбХ, г. Вельс, Австрия  
Сергей Л. Бычковский, Генеральный директор ООО «Технологический Центр ТЕНА», г. Москва, Россия  
Вернер Хольцингер, Фрониус Интернациональ ГмбХ, г. Вельс, Австрия

## **1. Резюме**

Изготовление железнодорожных вагонов – хорошо регламентированный и стандартизованный отраслевой сегмент. Несмотря на это, конструкторы и производители железнодорожных вагонов всегда ищут новые методы снижения веса, повышения коррозионной стойкости, высокой эффективности и надёжности.

Альтернативные, инновационные материалы (стали повышенной прочности, алюминий, нержавеющие стали) вместе с новыми сварочными технологиями (TIME, TimeTwin, CMT, CMT Twin, TIG Plasma, LaserHybrid) открывают новые и успешные подходы. Совместно со специализированными идеями автоматизации можно достигать и экономичного производства, хотя свариваемость новых материалов – это более сложный процесс. Автоматизация является самой непростой задачей в сборке железнодорожных вагонов: чем выше доля автоматизированных процессов при производстве, тем сложнее технологические задачи, но тем выше качество и уровень экономической эффективности.

В этой статье рассмотрены ключевые точки актуального уровня развития материалов и описаны новейшие достижения в области развития сварочной технологии. Особое внимание обращается на повышение качества сварных соединений и снижение уровня сварочных деформаций путем доведения тепловложения до минимума. Также обсуждаются некоторые уже реализованные методы сварки железнодорожных вагонов от компании Фрониус.

## **2. Введение**

Основываясь на прогнозе роста мировой численности населения до 8 млрд. к 2025 году, можно назвать «мобильность» одной из ключевых концепций будущего. Развитие мегаполисов, возрастающая персональная мобильность и глобализация экономики станут темами завтрашнего дня, поэтому развитие пассажирского и грузового транспорта, особенно железнодорожного, будет играть главную роль с упором на экономические и экологические аспекты. Кроме того, установится более строгая дифференциация общественного и грузового транспорта, и развитие железнодорожных транспортных систем с повышенной пропускной способностью будет происходить с концентрацией на следующих направлениях:

- Увеличение скорости перемещения (пассажирский транспорт)
- Значительное увеличение нагрузки на ось (грузовой транспорт)
- Сокращение времени в пути (увеличение разгонной и тормозной мощностей)
- Сокращение производственных издержек и стоимости обслуживания
- Энергоэффективность при использовании подвижного состава

Инженерам придется столкнуться со следующими проблемами:

- Возрастающий уровень вибраций (конструкция состава)
- Увеличение динамической нагрузки (состав и железнодорожное полотно)
- Увеличение уровня шума
- Повышенный износ и вероятность повреждения (контакт колесо-рельс)



Современные металлургические предприятия уже разработали высокопрочные и сверхвысокопрочные марки стали с пределом текучести более 1000 МПа и пределом прочности на разрыв до 1400 МПа при достаточно высокой ударной вязкости, что может помочь значительно снизить необходимую толщину стенки конструкций, прочность которых критична (рис. 2). Основное значение придается обеспечению хорошей свариваемости и обрабатываемости различными способами формовки.

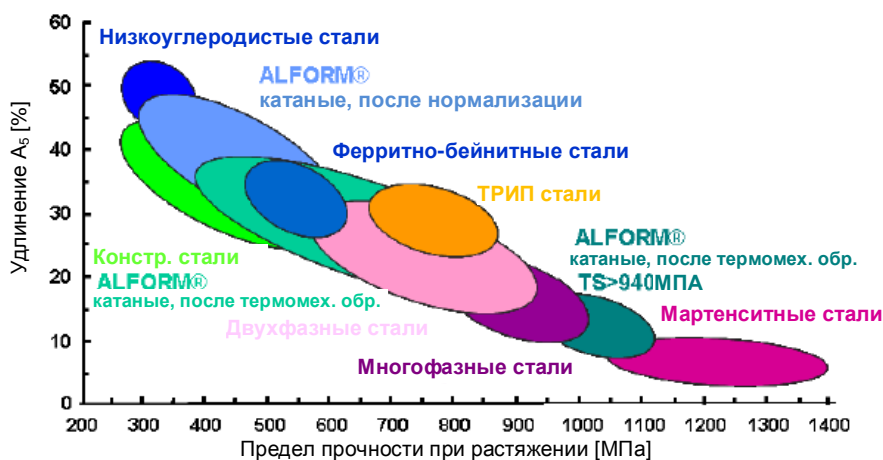


Рис. 2. Разработка различных марок стали с учетом прочностных и пластических свойств [2]

Такие виды стали с успехом применяются для производства кранов и в автомобильной промышленности. Их использование в строительстве железнодорожных вагонов также может иметь свой потенциал, что демонстрирует пилотный проект voestalpine (рис. 3, [3]). Новые материалы позволяют достичь 30-процентного уменьшения веса конструкции по сравнению со стандартной сталью. Иначе говоря, это позволит перевозить дополнительно 3 тонны груза на один грузовой вагон или уменьшить выбросы парниковых газов во время транспортировки на 6%.



Рис. 3. Грузовой вагон пилотного проекта voestalpine

### 3.1.2 Высоколегированные стали (нержавеющие стали)

Нержавеющие стали имеют более высокую стоимость в сравнении с углеродистой сталью, но, благодаря их высокой коррозионной стойкости, высокой прочности, ударной вязкости, пластичности и огнестойкости, производители могут использовать при производстве пассажирских вагонов более тонкостенные секции и панели при увеличении безопасности пассажиров. Кроме того, можно оставлять детали вагонов неокрашенными или подвергать их поверхность финишной обработке, например, полировке, что позволит дополнительно снизить стоимость и вес вагонов. Расходы на эксплуатацию и техническое обслуживание также находятся на нижней границе расходов, характерных для стандартных стальных конструкций.

Основными критериями выбора материала для грузовых вагонов являются более низкая потребность в техническом обслуживании, увеличение износостойкости и высокая коррозионная стойкость для перевозки химикатов.

В таблице 1 приведены механические свойства наиболее распространенных нержавеющей сталей, используемых в строительстве железнодорожных вагонов. Широко используются нержавеющей ферритные стали с содержанием хрома 12 % (например, X2CrNi12, отечественный аналог 03X14ГНФ-ВИ), которые могут конкурировать с углеродистыми сталями благодаря высокой коррозионной стойкости и значительно более высокой износостойкости. Если основное значение придается коррозионной стойкости, используются аустенитные стали, например, X10CrNi18-8 (12X18H9) и X2CrNiMo17-12-2 (03X17H14M3).

Дуплексные и обеднённые дуплексные нержавеющей стали становятся все более популярными для изготовления легких конструкций благодаря своей высокой прочности и жесткости в сочетании с хорошей коррозионной стойкостью.

**Таблица 1.**  
**Механические свойства высоколегированных сталей, используемых в производстве железнодорожных вагонов**

Обозначение	DIN №	Тип	Re [МПа]	Rm [МПа]	A5 [%]
X2CrNi12	1,4003	ферритная	>280	>450	>18
LDX <sup>®</sup> 2101	1,4162	дуплексная	>450	>650	>30
X2CrNiMoN22-5-3	1,4462	дуплексная	>460	>640	>25
X10CrNi18-8	1,4310	аустенитная	>250	>600	>40
X2CrNi18-7	1,4318	аустенитная	>350	>650	>40
SUS201	1,4372	аустенитная	>350	>750	>45
X2CrNiMo17-12-2	1,4404	аустенитная	>220	>520	>45

Высоколегированные стали, используемые в производстве железнодорожных вагонов, имеют, в целом, хорошую свариваемость. Тем не менее, следует учитывать риск образования трещин при нагревании, эффекты укрупнения зерна, некоторую степень повышения хрупкости и возможное снижение коррозионной стойкости в зоне сварки. Каждый тип высоколегированной стали имеет собственную «металлургию сварки», и его использование следует обсуждать индивидуально перед выполнением сварки, но все данные сплавы требуют процессов сварки с малым вводом тепла и чрезвычайно стабильной дугой, которая особенно важна при сварке тонкой листовой стали.

### 3.2 Алюминий

Алюминий является наиболее часто используемым легким металлом, который имеет плотность, приблизительно равную 1/3 плотности стали, при прочности более 1/2 прочности стали. Кроме того, алюминий имеет достаточно высокую пластичность и коррозионную стойкость. В связи с этим алюминий используется в производстве железнодорожных вагонов для изготовления корпусов уже более пятидесяти лет, при этом наиболее широко используются несколько сплавов:

Серии 5xxx: Al-Mg, неупрочняемые; например, 5005, 5754, 5083

Серии 6xxx: Al-Mg-Si, упрочняемые; например, 6005, 6060, 6061, 6063

Серии 7xxx: Al-Zn, упрочняемые; например, 7075

В то время как неупрочняемые сплавы на основе алюминия, например, 5754/AlMg<sub>3</sub>, используются преимущественно при изготовлении крыши и стен вагонов в связи с их высокой коррозионной стойкостью, упрочняемые сплавы, например, 6060/AlMgSi, используются для изготовления ходовой части и пола. С другой стороны, использование алюминия для изготовления тележек, осей и колёс на настоящий момент не представляется целесообразным.

Сварка алюминия принципиально отличается от сварки стали: низкая температура плавления, высокая активность по отношению к кислороду, высокая температура плавления поверхностного оксидного слоя, высокая теплопроводность и температурное расширение предъявляют к процессу сварки специфические требования. Необходимо предотвращать пористость, несплавления и оксидные включения в сварочной ванне. Следует также проявлять особую внимательность в начале сварки,

чтобы предотвратить значительные потери тепла в связи с высокой теплопроводностью алюминия, в противном случае возникает высокая вероятность несплавления.

Кроме того, следует учитывать теплообразование во время сварки, связанное с высокой теплоемкостью, которое приводит к перегреву материала, и узкий интервал температур кристаллизации в ванне расплавленного металла, что приводит к возникновению пористости. Сварка в инертных газах вольфрамовым электродом на переменном токе (GTAW-AC) представляет собой распространенную технологию сварки алюминия; переменный ток используется для того, чтобы удалить окислы алюминия с высокой температурой плавления с поверхности путем изменения полярности дуги.

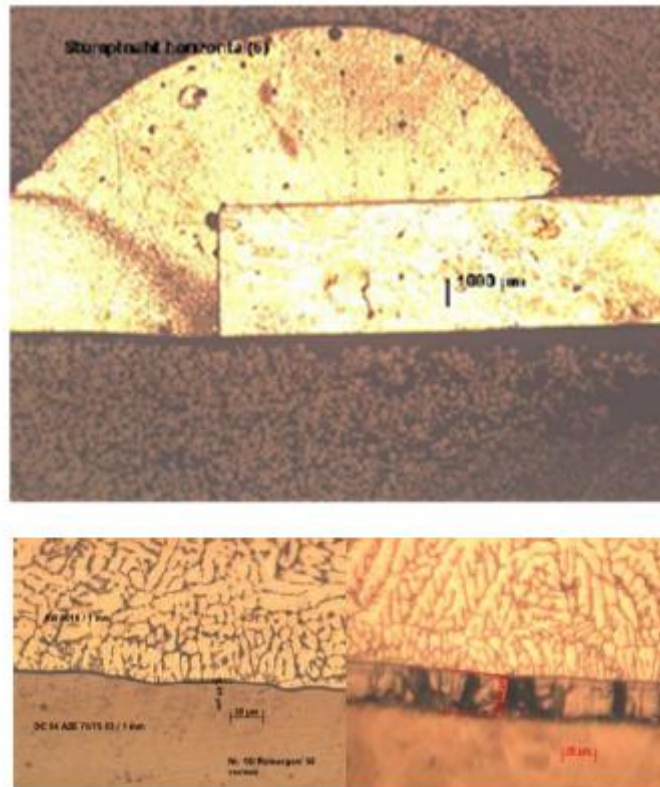
Помимо GTAW, для сварки алюминия также может использоваться технология сварки плавящимся электродом в защитных газах (GMAW). Чтобы не допустить образования во время сварки нежелательных окислов, следует использовать инертный защитный газ. Применение GMAW в инертных газах требует реализации следующих условий: обеспечение чрезвычайно стабильной сварочной дуги при малом вводе тепла, зажигание дуги без брызг, повышенный ток старта, импульсный режим при чрезвычайно стабильной дуге при очень низкой силе тока с короткими импульсами для регулярного отделения капель от электрода и снижение тока на этапе заполнения кратера.

### 3.3 Сочетание материалов: сталь и алюминий

При соединении стали и алюминия учитываются как преимущества материалов, так и недостатки. С конструкционной точки зрения, детали с более высокими требованиями по жесткости, например, тележка и рама, должны изготавливаться из стали, а детали, для которых наибольшую важность имеет малый вес, например, кузов вагона, могут изготавливаться из алюминия. По соображениям жесткости использование высокопрочных сталей в конструкциях вагонов могло бы представлять преимущество, но при этом пришлось бы выполнять сварные соединения стали и алюминия.

С точки зрения металлургии для соединения стали и алюминия невозможно использовать сварку плавлением. Возникновению общей сварочной ванны немедленно приведет к образованию твердых и чрезвычайно хрупких фаз Fe-Al, при этом сварное соединение будет ненадежным. Единственным возможным способом соединения является недопущение плавления, по крайней мере, одного материала во время сварки. На практике это осуществляется с помощью технологии «холодной» сварки: СМТ (холодный перенос металла, [4]) компании Fronius, которая подробно объясняется в главе 4.

При использовании «холодного» сварочного процесса плавлению подвергается только алюминий; материал стальной детали остается в твердом состоянии, как при пайке. Тем не менее, для реализации процесса используется, главным образом, оцинкованная сталь, поскольку цинковое покрытие выполняет функцию флюса и обеспечивает образование надежного соединения стали с расплавленным алюминием, как показано на рисунке 4.



**Рис. 4. Соединение стали с алюминием (DC04 AZE – AW 6016), выполненное с помощью технологии СМТ компании Fronius [5]**

#### **4. Задачи в процессах сварки**

Сварка, вне всяких сомнений, является самым важным процессом соединения деталей при производстве железнодорожных вагонов. Другие виды соединения, например, клеевые, клепаные и резьбовые, иногда используются дополнительно, но только для кузова вагона. При сборке вагонов сварка выполняет две основные задачи: соединение тонких и толстых листов. В целом, органы, регулирующие железнодорожные перевозки, не налагают особых ограничений на применяемые процессы соединения деталей и сварки. На рисунке 6 показаны основные сварочные процессы в зависимости от типа основного металла, используемого при изготовлении.

Таблица 2.

Основные сварочные процессы, используемые при сборке железнодорожного вагона

элемент	сталь	нержавеющая сталь	алюминий
<b>Крыша</b>	GMAW (70%) Контактная точечная (20%) Плазма (10%)	GMAW (70%) GTAW (20%) Плазма (10%)	GMAW - MIG (90%) Контактная точечная (10%)
<b>боковая и фронтальная панель</b>	GMAW (70%) Контактная точечная (20%) Плазма (10%)	GMAW (70%) GTAW (20%) Плазма (10%)	GMAW - MIG (90%) Контактная точечная (10%)
<b>рама</b>	GMAW (100%)	GMAW (70%) GTAW (20%) Плазма (10%)	GMAW - MIG (90%) GTAW-AC (10%)
<b>тележка</b>	GMAW (100%)		

При этом сварка новых и улучшенных материалов также требует применения усовершенствованных технологий и процессов сварки. С одной стороны, необходимо снизить ввод тепла сварочного процесса, чтобы уменьшить деформацию и возникновение металлургических эффектов в околошовной зоне. С другой стороны, процесс сварки должен быть надежным, стабильным и воспроизводимым.

Эффективным способом уменьшения ввода тепла является увеличение скорости сварки. Характеристики сварочных процессов с использованием источников тепла высокой энергии показаны на рисунке 5.

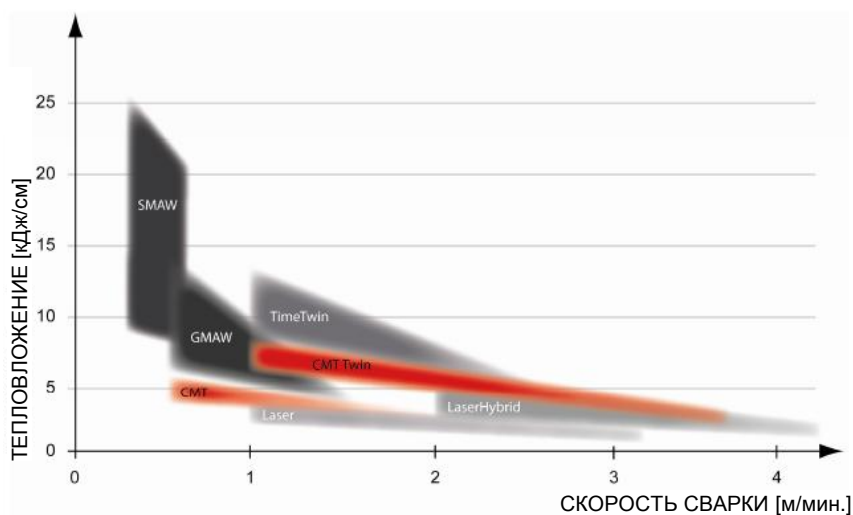


Рис. 5. Тепловложение в металл для различных сварочных процессов в зависимости от достижимой скорости сварки для листов нержавеющей стали в соответствии с [6]

#### 4.1 Сварка вольфрамовым электродом в среде защитного газа

Сварка вольфрамовым электродом в среде инертного газа (GTAW) представляет собой проверенную технологию, которая позволяет удовлетворить самые высокие требования к механическим свойствам и проведению сварки без разбрызгивания. Основной задачей является увеличение эффективности, производительности наплавки и скорости сварки. Этого можно достичь, объединив технологию GTAW и дополнительное использование газа для создания плазмы.

##### 4.1.1 Плазменная дуга

Сварка плазменной дугой представляет собой новую технологию сварки, которая оптимизирует технологию GTAW путем сжатия дуги с помощью дополнительного газа для создания плазмы. Благодаря увеличению температуры дуги увеличивается скорость и глубина провара. Для увеличения

производительности наплавки подача холодной проволоки может быть заменена подачей горячей проволоки (рис. 6).

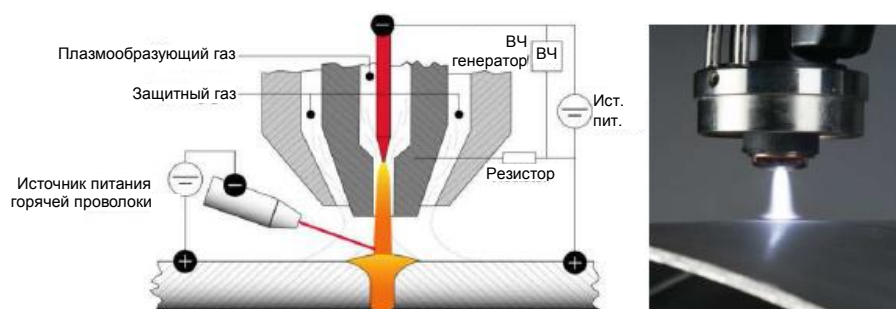


Рис. 6. Принцип сварки плазменной дугой

Сварка плазменной дугой разделяется на микроплазменную, сварку «мягкой» плазмой в среднем диапазоне токов и сварку проникающей плазмой. Последняя позволяет соединять сталь и другие металлы при толщине листа приблизительно до 10 мм при скорости сварки до 0,5 м/мин.

#### 4.2 Сварка плавящимся электродом в среде инертного газа

Основными задачами при использовании технологии GMAW являются: уменьшение ввода тепла при оптимизации дуги и времени горения дуги с увеличением скорости сварки, но в обоих случаях необходимо гарантировать стабильность процесса и минимизацию разбрызгивания металла. По этой причине в различных технологиях сварки используются различные комбинации напряжения и силы тока (рис. 7). Общеизвестно, что ввод тепла зависит от сварочного тока, напряжения дуги и скорости сварки. Увеличение напряжения дуги или сварочного тока приводит к увеличению ввода тепла, а увеличение скорости сварки приводит к уменьшению ввода тепла. В любом случае необходимо обеспечить достаточную глубину проплавления, хороший внешний вид шва и малое количество брызг.

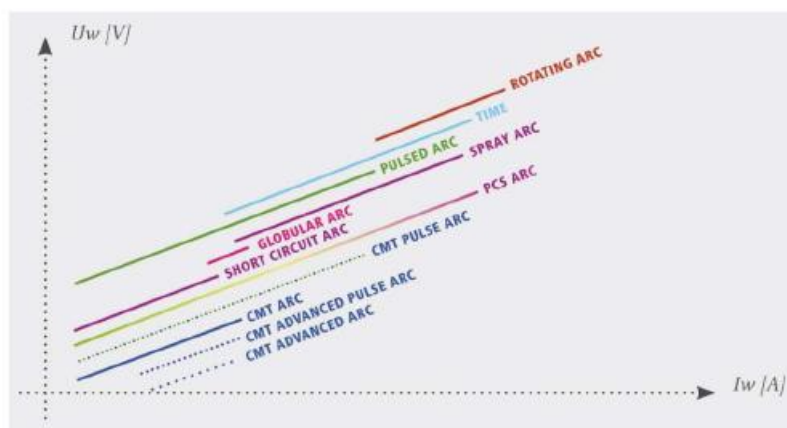


Рис. 7. Сравнение технологий дуговой сварки по напряжению дуги и сварочному току [7]

В связи с тем фактом, что максимальная скорость сварки ограничена, особо интересны технологии, которые позволяют проводить сварку при низком уровне напряжения и силы тока, чтобы максимально уменьшить ввод тепла.

##### 4.2.1 CMT (холодный перенос металла)

Процесс CMT представляет собой вариант технологии GMAW при минимальном вводе тепла. Данный процесс был разработан компанией Fronius в начале XXI столетия и первоначально предназначался для сварки стали и алюминия. Однако в настоящее время процесс становится промышленным стандартом для тонколистовой сварки благодаря зажиганию дуги без брызг, точному регулированию длины дуги, сварке при почти полном отсутствии брызг, очень высокой стабильности горения дуги и



чрезвычайно высоких показателей стабильности процесса при использовании в качестве защитного газа чистого  $\text{CO}_2$ . Указанные эффекты достигаются в результате механического возвратно-поступательного перемещения проволочного электрода с высокой частотой в течение всего процесса сварки с целью обеспечения управляемого переноса капель посредством применения быстродействующего инверторного источника тока с полностью цифровым управлением. На рисунке 10 проиллюстрирован принцип работы процесса CMT.

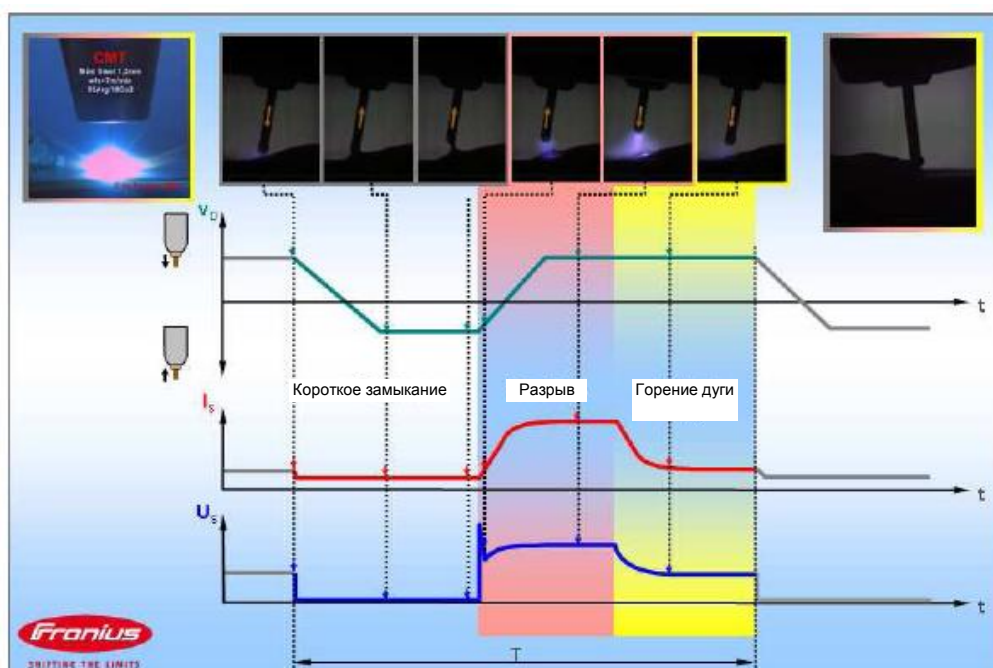


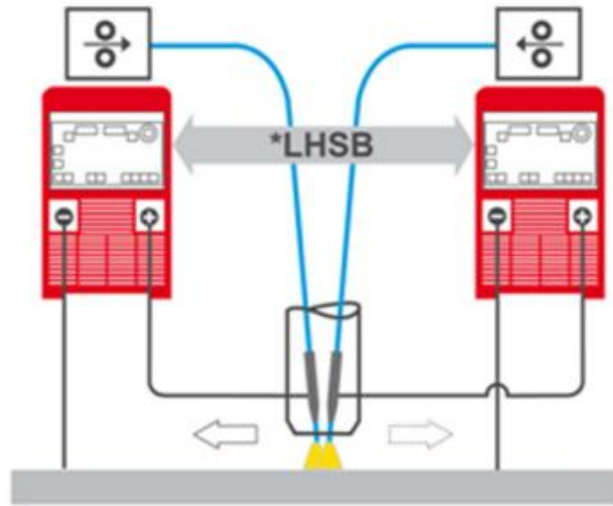
Рис. 8. Принцип работы процесса CMT (холодный перенос металла) компании Fronius

Благодаря широкому спектру возможностей данного процесса становится, одной из которых является чередование циклов CMT с импульсными циклами и даже изменение полярности, формируются различные варианты процесса CMT: CMT Pulse, CMT Advanced, CMT Advanced Pulse, как показано на рисунке 9.

#### 4.2.2 Сварка двойной проволокой (Dual-/Twin-Wire)

Второй сложной задачей при использовании технологии GMAW является увеличение эффективности за счет использования проволочных электродов с независимой подачей проволоки при источнике питания высокой мощности. Концепция сварки двойной проволокой является проверенной и широко используется. Она позволяет достичь производительности наплавки до 20 кг/ч и скорости сварки до 2 м/мин.

Концепция «dual wire» предусматривает использование одного источника питания для обоих электродов, а концепция «twin wire» (Time Twin) предусматривает использование отдельного источника для каждого электрода (рис. 11). Необходимая мощность обеспечивается параллельным подключением источников питания. Техническая задача заключается в том, чтобы обеспечить высокоскоростной обмен данными между источниками питания, чего можно достичь с помощью высокоскоростной локальной шины (LHSB). Преимущество заключается в том, что каждый электрод может реализовывать свой процесс сварки. В отличие от технологии «dual wire», также можно использовать сочетание режима дуговой сварки со струйным переносом металла (первая проволока) и импульсного режима (вторая проволока).



**Рис. 9. Технология сварки двойной проволокой TimeTwin компании Fronius**

Посредством соединения двух источников питания СМТ и специальной сдвоенной горелки с помощью шины LHSB возможна реализация высокопроизводительной тандемной технологии СМТ Twin с производительностью наплавки до 20 кг/ч и скоростью сварки до 2 м/мин. (рис. 10). Процесс позволяет обеспечить значительно более низкую тепловую нагрузку в сравнении со стандартной технологией Time Twin.



**Рис. 10. СМТ Twin**

Ведущий электрод в этом случае может работать в режиме СМТ, импульсном режиме или режиме сварки со струйным переносом металла, а ведомый – в режиме СМТ. Преимуществом является относительно спокойная поверхность сварочной ванны, что позволяет использовать более короткую дугу и, как следствие, обеспечить более высокую скорость сварки. Кроме того, обеспечивается более ровная форма валика по сравнению со стандартными процессами сварки двойной проволокой. Управление процессом упрощается, что позволяет сократить время настройки оборудования.

### 4.3 Laser Hybrid

Процесс Laser Hybrid, вероятно, является наиболее сложным сварочным процессом (рис. 11). Идея его создания заключалась в том, чтобы преодолеть ограничения процесса GMAW (скорость и глубина проплавления) и процесса лазерной сварки (перекрытие зазора, необходимость подгонки кромок). Тем временем данный процесс приобретает все большую популярность на рынке.

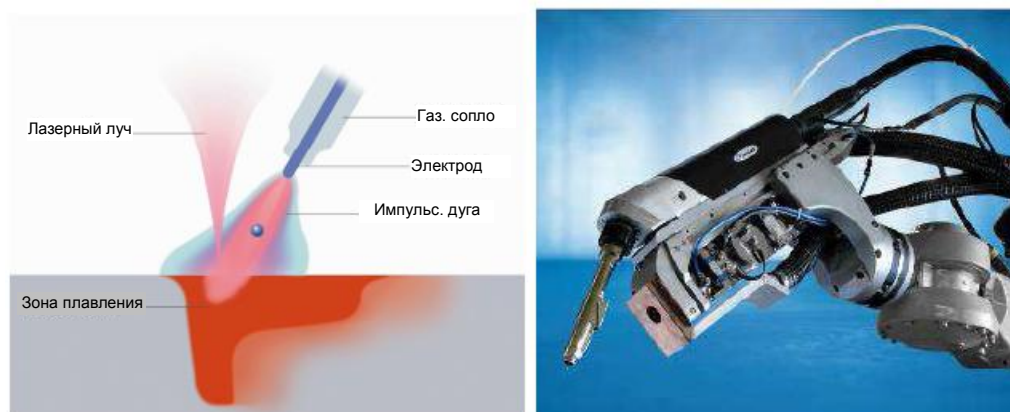
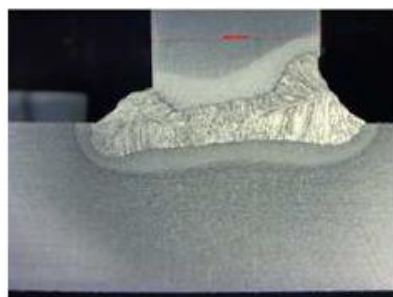


Рис. 11. Сварка LaserHybrid [8]

Улучшенная сварочная головка позволяет получать сплошные тавровые сварные швы с полным проплавлением при соединении листов металла толщиной до 10 мм с одной стороны за один импульс при скорости сварки до 2 м/мин. (рис. 12) [9].



Толщина листа	10 мм
Скорость сварки	0,7 м/мин.
Скорость подачи проволоки	7,0 м/мин.
Ток GMAW	205 А
Напряжение GMAW	20,5 В
Мощность лазера	10 кВт
Защитный газ	96%Ar, 4%O <sub>2</sub>
Основной металл	ASTM A136
Присадочный металл	G3 Si1
Температура подогрева	-

Рис. 12. Тавровый сварной шов, толщина листа металла 10 мм; сварка LaserHybrid [9] с одной стороны

### 4.4 Точечная сварка

Точечная сварка представляет собой широко распространенный процесс сварки тонких листов металла, в особенности неокрашенного кузова. Задача заключается в том, чтобы увеличить стабильность процесса, гарантировать постоянное качество сварочных точек и увеличить срок службы электродов. Этого можно достичь с помощью использования специальной стальной контактной ленты, находящейся между электродом и деталью (рис. 13). Помимо значительного увеличения срока службы электрода, точечную сварку стали и алюминия можно выполнять без переконфигурирования оборудования.



**Рис. 13. Сварочная система DeltaSpot**

## **5. Задачи автоматизации процесса сварки**

Высокие скорости сварки, производительность наплавки и длинные сварочные швы можно получить только при использовании автоматизированных сварочных систем. Кроме того, такие новые сложные процессы сварки, как Dual-/Twin Wire и LaserHybrid, необходимо применять на автоматизированных системах, чтобы полностью использовать все преимущества данных технологий.

Задача заключается в том, чтобы обеспечить высокую гибкость автоматизированных систем, для охвата различных конструкций железнодорожных вагонов, гарантировать соблюдение технологических допусков и точно спозиционировать дугу. В сочетании с современными источниками питания данные технологии позволяют получать качественные швы без дефектов. В зависимости от сварной конструкции используются роботизированные (рис. 14), мобильные (рис. 15) или стационарные системы (рис. 16).



**Рис. 14. Сварка тележки на роботизированной системе TimeTwin**



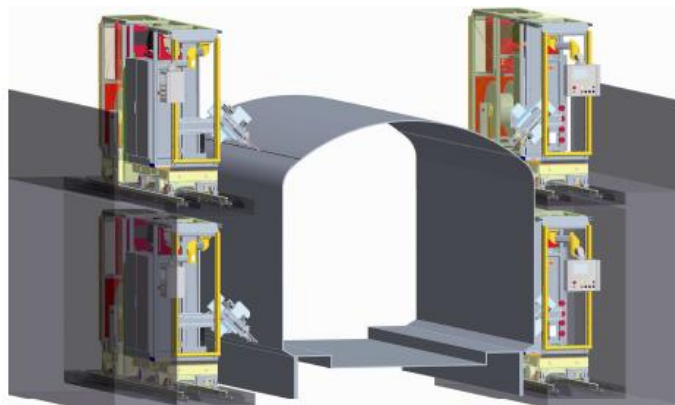
**Рис. 15. Мобильная система с тележкой**

Более важными задачами в сфере автоматизации сварочных процессов являются поиск и отслеживание сварных швов. Чем выше точность работы систем, поиска и отслеживания сварных швов, тем выше может быть степень автоматизации. На практике используются механические системы с датчиками нагрузки (рис. 16), система распознавания прикосновений или системы с лазерным наведением.



**Рис. 16. Система рельсового перемещения сварочной установки**

В идеале, задачей автоматизации сварочных процессов является организация линий сборки вагонов (рис. 17). Помимо сварочных работ на линии также осуществляется обработка листового металла и балок. Чтобы гарантировать непрерывную работу сборочной линии, допуски по размерам для подвергнутых черновой обработке листов и деталей должны быть минимальными, т.к. современные системы отслеживания швов предусматривают лишь определенное отклонение от среднего значения. Любые меры по уменьшению допусков значительно увеличивают стабильность работы сборочной линии.



**Рис. 17. Концепция линии по сборке вагонов**

## **6. Заключение**

Отрасль строительства железнодорожных вагонов сталкивается с требованиями по модернизации производства. На данном этапе проектирование и выбор материалов основаны на чрезвычайно традиционных концепциях, и для того, чтобы осуществить необходимую модернизацию, следует учесть новые подходы к использованию материалов и новые технологии сварки. Тщательные исследования показали, что эти новые концепции в сочетании с увеличением объема автоматизации позволят значительно улучшить такие параметры, как вес конструкции, обеспечение качества и безопасности вагонов.

## 7. Библиография

- [1] “Materials Selection in Mechanical Design”, M. F. Ashby; Pergamon Press, 1990
- [2] “High strength low alloy steel weldments with accommodated qualities to the base metal”; R. Rauch, S. Kapl, G. Posch, K. Radlmayr; BHM (2012) Vol. 157(3)
- [3] “alform ® strip processing”; voestalpine AG, Austria; [www.voestalpine.com/stahl](http://www.voestalpine.com/stahl)
- [4] “Schweißpraxis aktuell: CMT-Technologie”; Fronius Int. GmbH, ISBN 978-3-8111-6879-4
- [5] „Cold Metal Transfer – Ein neuer Prozess in der Fügetechnik“; J. Bruckner, K. Himmelbauer; DVS-Berichte Band 237; 2005
- [6] „Neue Fügetechniken mit höherer Prozesssicherheit“; C. Sommitsch, G. Posch, T. Weinberger, G. Figner; BHM (2010) Vol. 155(5)
- [7] „Pulsgesteuerter Sprühlichtbogen“; G. Trommer; Der Praktiker 9/2009
- [8] Laser-Hybrid Welding drives VW Improvements“; T. Graf, H. Staufer; Welding Journal 01/2003
- [9] „Entwicklung und Anwendung des diodengepumpten Festkörperlaser-MSG Hybridschweißens zum Fügen von Wulstprofilen bei einseitigem Kehlnaht-Vollanschluss“; S. Egerland; H. Staufer; C. Kammerhuber; Schweiss- & Prüftechnik 05/2012