

# Сочетая преимущества стали и алюминия

## Получения новых сочетаний материалов с помощью дуговой сварки

При любом сравнении стали и алюминия, как конструкционных материалов, необходимо учитывать многочисленные технические и экономические критерии. К ним относятся: масса, прочность, жесткость, предел текучести или обрабатываемость, а также доступность ресурсов, стоимость сырья, производственные затраты и последующие расходы. В частности, в сфере производства легких конструкций предпочтительнее выбирать оптимальную комбинацию обоих материалов: твердую сталь для конструкций с тяжелыми условиями работы, в сочетании с легким алюминием для конструкций, испытывающих меньшие напряжения. До недавнего времени, тем не менее, использование дуговой сварки для таких соединений не представлялось возможным, несмотря на многочисленные технические и экономические достоинства технологии. Компании Fronius удалось решить эту проблему.

Легкие конструкции обеспечивают существенные преимущества при использовании в автомобилестроении, например, при создании эксклюзивных автомобилей, в кровельных конструкциях промышленных предприятий или на ветросиловых установках. В автомобилестроении легкие конструкции играют особенно важную роль. Масса кузова составляет большую часть от общей массы автомобиля (порядка 40%). Если транспортному сектору необходимо сократить выбросы CO<sub>2</sub>, снижение веса и внедрение новых идей - это первое, с чего можно начать. Снижение веса на 100 кг может обеспечить снижение расхода топлива до 0,3 л/100 км, что в свою очередь снизит выбросы CO<sub>2</sub> на 700 г/100 км.

Учитывая необходимость обеспечивать приемлемую массу и ёмкость аккумулятора, масса кузова – критически значимый параметр для электромобилей. Значительное сокращение массы таким образом продолжает оставаться основной целью современного кузовостроения.

Это означает, что технология соединения материалов играет значимую роль в сфере производства легких конструкций, в частности в плане соединения стали и алюминия. Для решения данной задачи компания Fronius заключила партнерство с австрийской сталелитейной компанией Voestalpine. Цель проекта состояла в разработке заготовок из стали и алюминия с высокой способностью к формообразованию, причем заготовки из обоих металлов соединяются с использованием технологии термического соединения.



*Рис. 1: Элементы, изготовленные из гибридных листов из металлов, способны систематически поглощать, например, энергию удара, возникающего в результате аварии.*

## Проблемы и ограничивающие условия

Долгое время считалось, что прочное соединение стали и алюминия невозможно обеспечить при использовании термических средств. Основную трудность представляет различие точек плавления, составляющих 1 500°C и 660°C соответственно, и, в частности, формирование интерметаллических фаз (ИМР). Это происходит из-за ограниченной взаимной растворимости железа и алюминия при комнатной температуре. ИМР образуется в процессе диффузии и, как правило, характеризуется высокой твердостью и чрезвычайно низкой ударной вязкостью. Для примера, твердость сплава Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> по Виккерсу составляет около 1 050 HV, а сплава FeAl<sub>3</sub> около 900 HV. Чем больше тепловложение в шов, тем меньше ИМР – и тем хуже механические и конструкционные свойства шва. Слой ИМР должен быть как можно более тонким, и не должен превышать 10 мкм. Дальнейшие сложности вызваны значительно отличающимися коэффициентами теплового расширения, составляющими около 1,2 мм/100°C для стали и 2,34 мм/100°C для алюминия. Еще одним фактором является изменение электрохимического потенциала, равного ок. 1,22 В при использовании стали/алюминия и ок. 0,9 В при использовании цинка/алюминия.

В свете этих физических факторов, специалисты в сфере металлургии и эксперты по сварке определили следующие необходимые условия для сварки алюминия и стали:

- Используемая технология должна обеспечивать наименьшее возможное тепловложение;
- Поверхность стального листа должна быть оцинкована;
- Величина интерметаллической фазы должна быть минимизирована, а ее свойства должны использоваться по максимуму.

Поиск технологии теплового соединения предопределил использование технологии СМТ (холодный перенос металла). Данная технология дуговой сварки была выбрана во многом благодаря великолепным результатам, демонстрировавшимся на протяжении десяти лет ее использования экспертами по сварке из компании Fronius.



*Рис. 2: Прочность паяно-сварного соединения настолько велика, что при проведении испытания на разрыв, разрыв происходит не в районе шва, а в алюминиевой части элемента.*

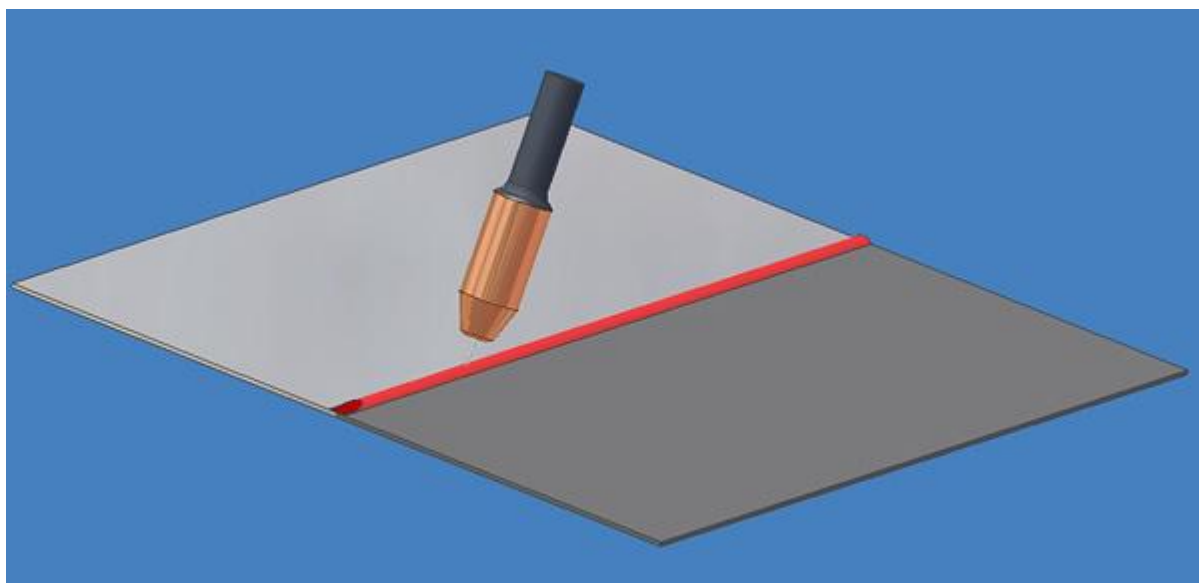
## Пути достижения инновационного соединения

Три основных фактора, обеспечивающих образование бездефектного соединения:

- две заготовки, которые необходимо соединить
- технология соединения
- присадочный металл

Помимо слоя цинка, толщина которого должна быть не менее 10 мкм, еще одним фактором, влияющим на качество и упругость соединения, является подготовка кромок стальных листов. Геометрические характеристики кромки, разработанные компанией «Voestalpine» для листов, подлежащих соединению, запатентованы. Удовлетворительные результаты были достигнуты при использовании стандартных марок особо мягкой стали. Алюминиевые листы изготавливаются из материалов серии AW5xxx или 6xxx. Так же, как и в случае использования традиционной технологии сварки плавящимся электродом в среде защитных газов, поверхность алюминия достаточно просто очистить. Поскольку ИМР между двумя соединенными материалами ведет себя аналогично керамике, она чувствительна к нормальным нагрузкам и менее чувствительна к нагрузкам, направленным по касательной. В процессе проектирования необходимо учитывать эти свойства.

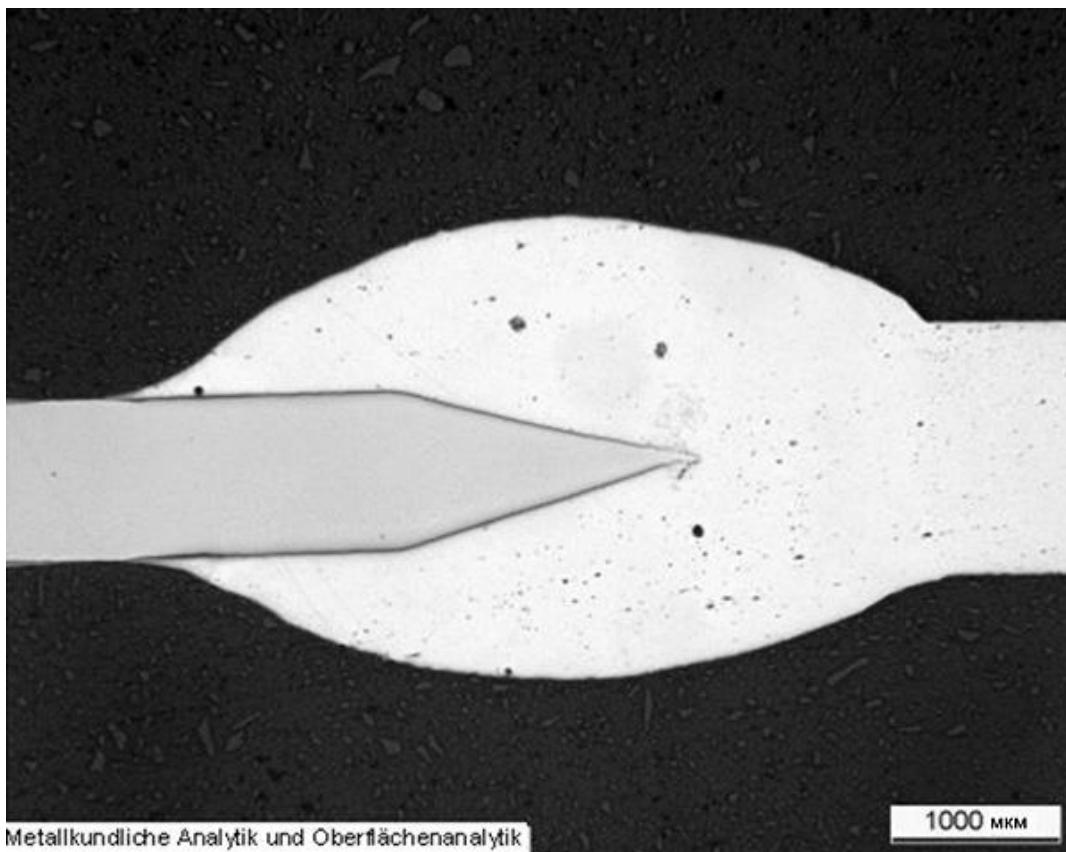
Специальная технология дуговой сварки в среде защитного газа СМТ отвечает важнейшим требованиям к используемой здесь технологии соединения: низкое тепловложение и хорошая управляемость. Эта технология «холодной» сварки защищена несколькими патентами, выданными компании Fronius. При соединении стали и алюминия, присадочный металл и алюминий смачивают лист оцинкованной стали, а присадочный металл сплавляется с алюминием. На стороне стали получается паяный шов, к которому затем приваривается алюминий. Таким образом, для описания получаемого шва используется термин «паяно-сварное соединение». Для гибридных листов также оказалось предпочтительнее использовать сварные системы, которые обеспечивают «синхронную» пайку-сварку листов с использованием технологии СМТ с обеих сторон.



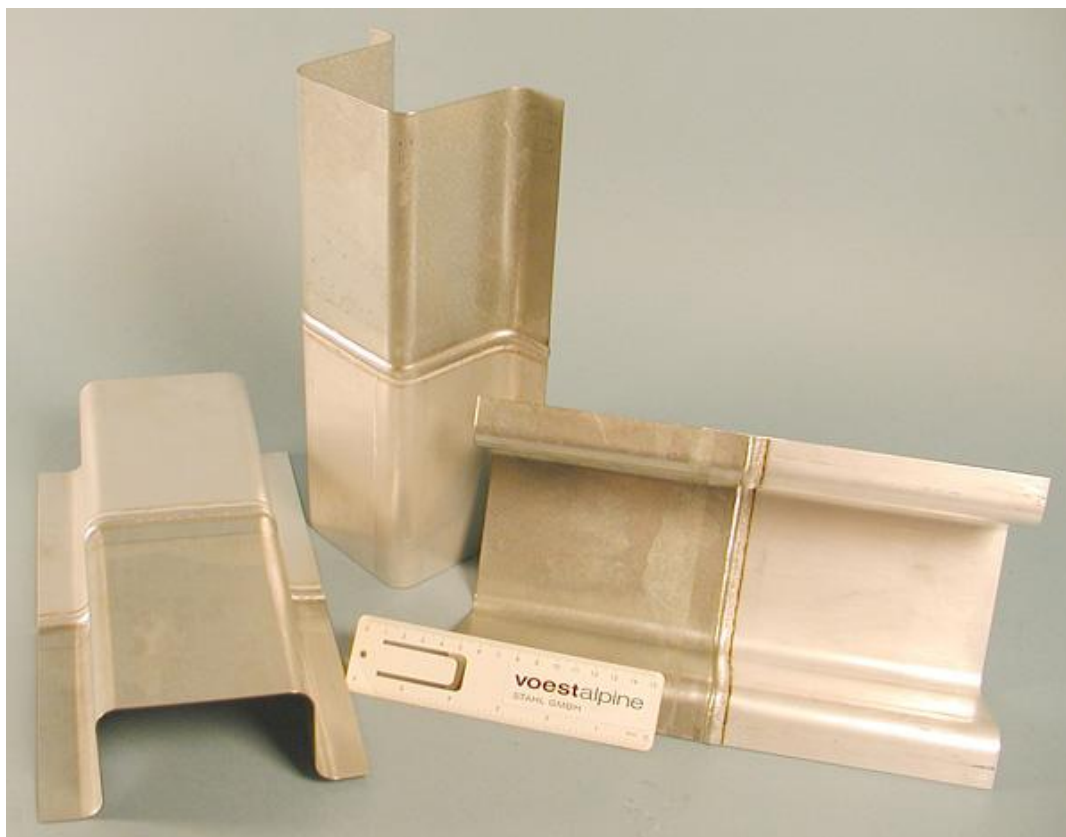
*Рис. 3: Технология пайки-сварки СМТ характеризуется сочетанием сварки на алюминиевой стороне и пайки на стальной стороне.*

Третьим определяющим фактором является присадочный металл. Компания Fronius также является обладателем патента на особый сплав алюминия, используемый в процессе пайки-сварки. Для получения

оптимального шва важно обеспечить правильное позиционирование присадочного металла в процессе пайки-сварки.



*Рис. 4: Учет всех различных воздействующих факторов обеспечивает возможность для создания плотного металлургического соединения листов алюминия (справа) и стали (слева).*



*Рис. 5: Гибридные листы также отвечают практическим требованиям к дальнейшему изменению формы.*

## Практичные и проверенные – гибридные листы из стали и алюминия

Для выяснения и документирования пригодности продукта для фактического применения, как партнеры компании, так и внешние организации провели обширные испытания гибридных листов из стали и алюминия, соединенных методом пайки-сварки.

**Основное исследование:** Отправным пунктом здесь являются материалы AW5182-H111 и DX54D, а также присадочный материал Z200, изготовленный из сплава AlSi3Mn1. Институт исследований металлов им. Макса Планка (MPIE) определил размер зерен в околошовной зоне, а также оптимальный присадочный металл. Размер зерен в зоне плавления алюминиевого образца представлен на Рис. 12. Цвета иллюстрируют гранулометрический состав и рост зерен.

**Предел прочности на разрыв:** Два различных образца имитируют подходящую комбинацию материалов для крыш автомобилей и оконных рам. Ключевым результатом испытания на разрыв стал окончательный разрыв образца в области алюминиевого листа, при этом шов, созданный методом пайки-сварки, не получил никаких повреждений в ходе испытаний. Основные значения указаны в Таблице 1 и на соответствующих фотографиях.

**Коррозионные свойства и испытания в солевой камере:** Коррозионная стойкость незащищенного гибридного листа из стали и алюминия проверялась в солевой камере (SST). Даже после 300 часов пребывания, следов местной коррозии/коррозии под напряжением или межкристаллитной коррозии не было обнаружено. Легкие следы коррозии были заметны лишь на поверхности.

**Способность к деформации:** Способность листов к деформации играет ключевую роль в кузовостроении. Гибридные листы из стали и алюминия подходят для неоднократной обработки листового металла только в случае, если они могут удовлетворить данным требованиям. О пригодности листов свидетельствует возможность осуществления различных процессов деформации. Соответствующие данные представлены в Таблице 2. Пример «испытания на вытяжку» наглядно демонстрирует, что даже в пограничной зоне при глубокой вытяжке все равно достигаются положительные результаты.

**Испытание на удар:** Когда гибридные листы из материалов изначально проектируются как элементы, обеспечивающие безопасность, они могут систематически поглощать энергию удара. При использовании амортизатора ударной нагрузки из гибридных материалов, поглощение происходит практически полностью в алюминиевой части элемента. Как паяно-сварной шов, так и стальная часть элемента остаются нетронутыми. В противоположность этому, элемент, состоящий только из стали и поглощающий то же количество энергии, получает более серьезные повреждения. Надлежащим образом спроектированные элементы из гибридных материалов отвечают требованиям к поглощению энергии, когда это необходимо, обеспечивая при этом соответствие требованиям к геометрическим характеристикам и безопасным расстояниям. Подробная информация содержится в Таблице 3.



*Рис. 6: «Испытание на вытяжку» ясно демонстрирует, что даже в пограничной зоне рассматриваемая технология обеспечивает хорошие результаты.*



*Рис.7: Паяно-сварной шов остается неповрежденным даже в ходе испытания элемента на удар.*



Рис. 8: Гибридные листы размером 300 × 220 мм, толщиной 1,2 / 1,5 мм подвергаются пайке-сварке на скорости 78 см/мин. перед формовкой по модели паяно-сварных несущих конструкций крыши.

## Заключение

Компании Fronius и «Voestalpine» разработали технологический процесс, предназначенный для серийного производства гибридных листов из алюминия и стали. Длительные испытания доказали их практическую пригодность, а также позволили документально зафиксировать дополнительные конструкционные преимущества и возможности применения в некоторых отдельных случаях.

Таблица 1: Предел прочности на разрыв

Заготовка	Несущая конструкция крыши	Оконная рама
Материал	DX54 + AW6181	DX54 + AW6016
Толщина [мм]	1,2 + 1,5	1,0 + 1,2
Присадочный металл	Z140	Z140
Предел текучести <sup>1)</sup> Rp <sub>0.2</sub> [МПа]	126	132
Предел прочности на разрыв <sup>1)</sup> Rm [МПа]	210	239

<sup>1)</sup> с учетом поперечного сечения алюминия

Таблица 2: Деформируемость

Технологическая заготовка	Сгиб таврового профиля	Испытание на вытяжку
Материал	DX54 + AW 5182	DX54 + AW5182
Толщина [мм]	1,0 +1,5	1,0 +1,5
Радиус [мм]	2x10; 2x11	5
Диаметр пуансона [мм]		90
Присадочный металл	Z255	

Таблица 3: Испытание в имитаторе аварийных ситуаций

Заготовка	Амортизатор удара при аварии
Условия испытаний	6,4 кДж при комнатной температуре
Материал	H340 + AW6181
Толщина [мм]	1,0 + 2,0
Присадочный металл	ZE75/75
Молот, масса [кг]	86
Скорость [км/ч]	44
Начальная высота [мм]	280
Конечная высота [мм]	173
Поглощенная энергия [кДж]	6 523
Сила, макс. [кН]	296

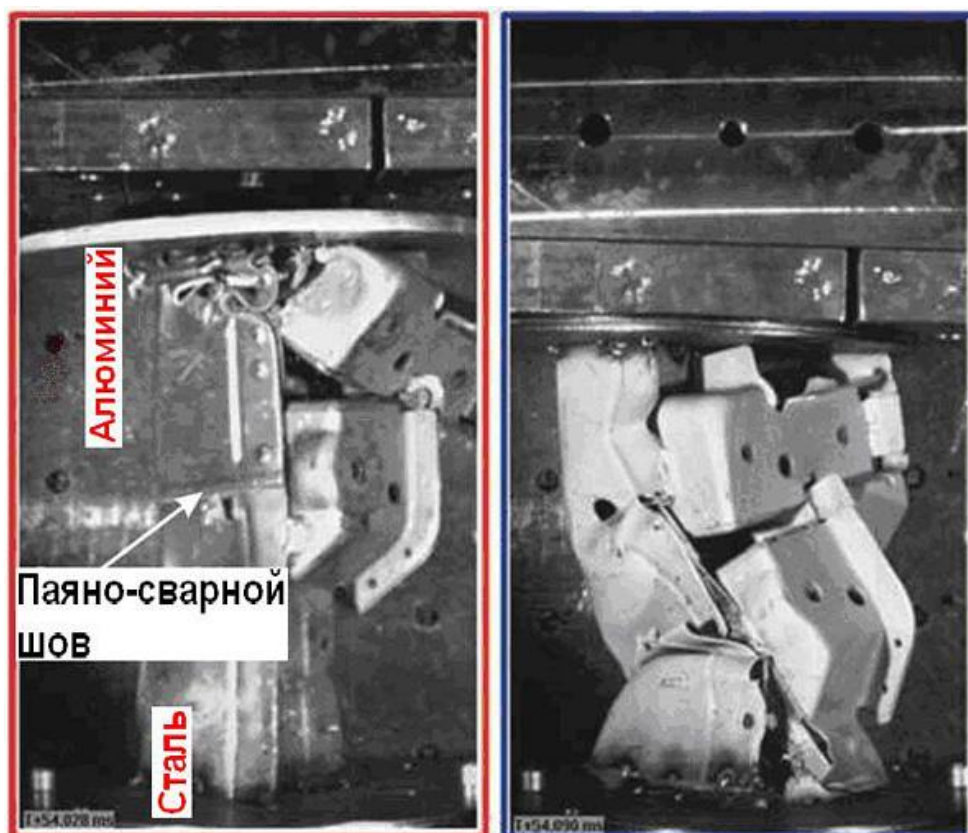
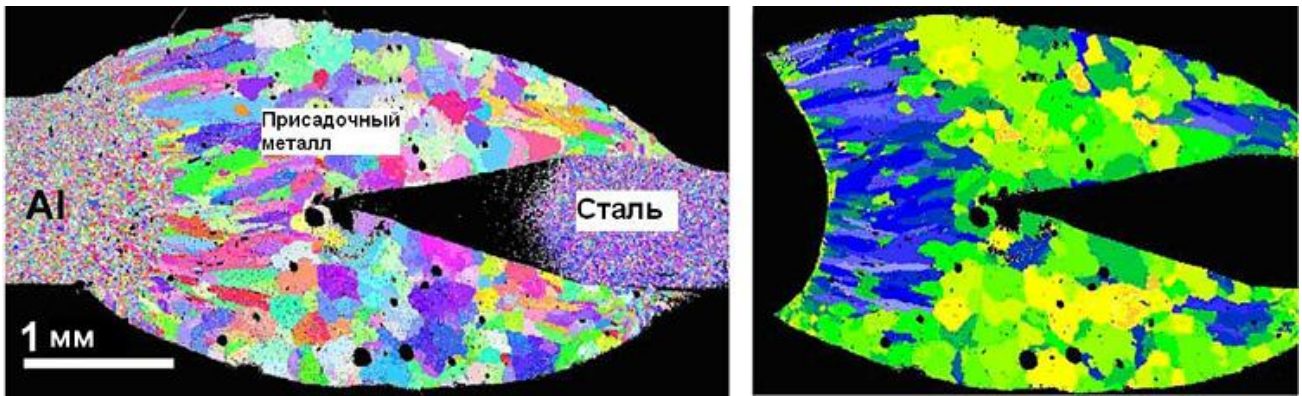


Рис. 9: Сравнение поведения при ударе амортизаторов продольных ударов показывает, что стальная часть гибридного элемента (слева) сохраняет форму и необходимое безопасное расстояние, в то время как элемент, состоящий только из стали (справа) деформируется по всей длине.





*Рис. 10: Основные исследования, проведенные Институтом исследований металлов им. Макса Планка (MPIE), расположенном в Дюссельдорфе, указывают на образование гранул в зоне соединения в соответствии с типом материала и размером частиц.*