

# CMT Advanced

## Введение

Для выполнения надежного соединения деталей на промышленных производствах, особенно деталей из тонколистовых материалов, требуются сварочные технологии с максимальной стабильностью процессов и регулируемым уменьшенным тепловложением. Однако, новые производства требуют высокой производительности наплавки и точной наплавки с применением проволоочного электрода. Нет ничего удивительного в том, что требование по минимальному количеству брызг сейчас сменилось требованием по практически полному отсутствию брызг. Дуговая сварка сейчас отвечает данным требованиям в невиданных ранее пределах даже в маломощных системах.

Новый подход, в рамках которого функции переключения полярности сварочного тока и направления перемещения проволоки будут встроены в систему управления технологическим процессом, теперь обеспечивает пользователю большую степень свободы и позволяет полностью соблюдать указанные требования.

## CMT Advanced – новая прогрессивная технология

Выпустив на рынок инновационную технологию CMT Advanced для сварки тонких и сверхтонких стальных листов, компания Fronius International расширила свой спектр предлагаемых технологий. Впервые стало возможным передать функции переключения полярности сварочного тока и направления перемещения проволоки системе управления технологическим процессом. С этой целью источник электропитания оборудуется инвертером, осуществляющим переключение полярности.

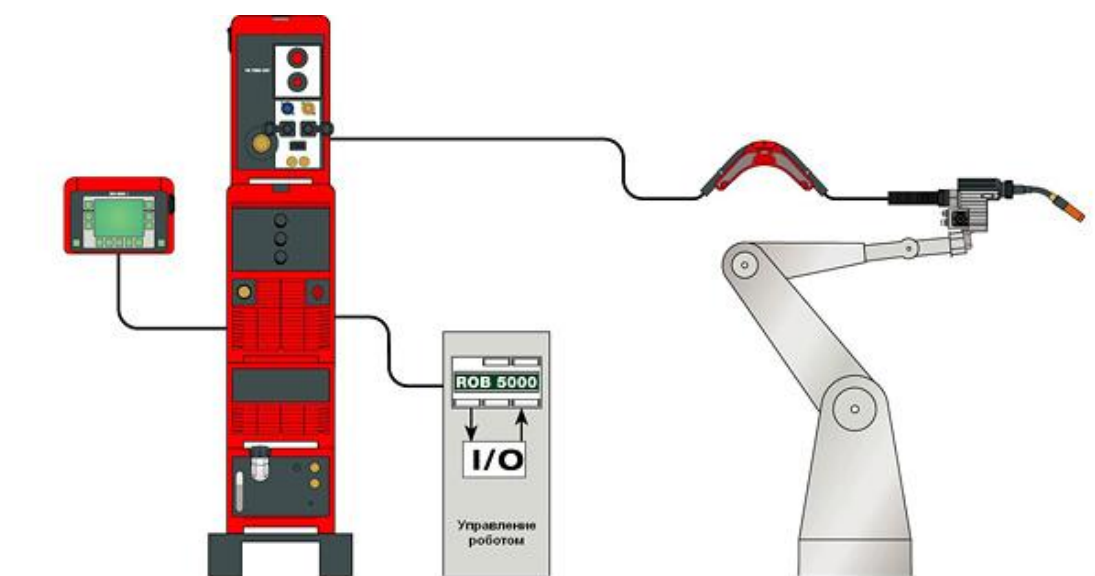


Рисунок 1: Общая компоновка системы для применения технологии CMT Advanced.

В являющихся ныне стандартными системах СМТ (сварка с холодным переносом металла), основные узлы оборудования обмениваются информацией о реверсивной подаче проволоки по высокоскоростной шине данных. Это обеспечивает возможность выполнения сварочных циклов с частотой до 100 Гц. Благодаря методике переключения полярности становятся возможными два новых и, можно сказать, революционных варианта технологии СМТ - СМТ Advanced и СМТ Advanced Pulse. В фазе процесса с положительной полярностью на электроде (фаза EP) осуществляется тепловложение в основной материал (независимо от варианта процесса). Кроме того, в данной фазе дуга очищает поверхность заготовки. Силы отрыва капли поддерживают, например, отрыв капли в фазе импульсной дуги (рисунок 6). В фазе с отрицательной полярностью на электроде (фаза EN) (рисунки 3 и 7) производительность наплавки регулируется в зависимости от тепловложения. На данном этапе тепловложение гораздо ниже, чем в фазе EP, однако, производительность наплавки такая же. По причине меньшей плотности линии переноса, силы отрыва капли в фазе EN влияния не имеют. Вследствие этого капля, образующаяся на конце электрода, имеет существенно больший размер. Подробное описание двух вариантов процесса представлено ниже.

## Дуговая сварка СМТ Advanced

Количество чередующихся циклов с положительной и отрицательной полярностью электрода может быть задано пользователем произвольно. На рисунке 2 показана последовательность с двумя положительными и двумя отрицательными циклами СМТ. Положительные фазы влияют, главным образом, на глубину проплавления и степень очистки. Отрицательные фазы значительно увеличивают производительность наплавки при неизменном уровне тепловложения. Таким образом, отрицательный проволочный электрод требует значительно меньшего сварочного тока и напряжения для наплавки аналогичного количества металла. Переключение полярности между двумя фазами процесса осуществляется при включении короткого замыкания. Дуга в этот момент отсутствует, поскольку присадочный металл контактирует со сварочной ванной. Поэтому в момент переключения полярности гарантируется очень высокая стабильность процесса.

Благодаря технологии СМТ Advanced впервые удалось добиться повышенной производительности наплавки при постоянно низком тепловложении и/или постоянной производительности наплавки при пониженном по сравнению с обычной технологией СМТ тепловложении. В результате могут быть заварены даже большие зазоры между деталями из тонкого и ультратонкого листового металла. Регулирование тепловложения, обеспечиваемое за счет переключений цикла, в значительной степени оптимизирует контроль за сварочной ванной. Поскольку в обеих фазах процесса перенос металла осуществляется при коротком замыкании, то необходимые ранее для переключения фазы инициализации (рисунок 3) больше не нужны.

В начале фазы EN-СМТ зажигание дуги происходит при коротком замыкании электрода с отрицательной полярностью. При постоянной длине дуги мощность замыкания на дополнительной проволоке гораздо выше мощности в последующей фазе EP-СМТ (рисунок 4). Размер капли незадолго до начала короткого замыкания четко отражает влияние полярности на производительность наплавки (рисунок 5). В отрицательной фазе процесса размер капли и, соответственно, производительность наплавки, значительно увеличиваются. Для достижения

аналогичного размера капли на электроде с положительной полярностью потребуются значительно более высокий сварочный ток. При амплитуде тока, соответствующей амплитуде тока в отрицательной фазе, пинч - эффект электрода с положительной полярностью намного выше. Поэтому силы отрыва капли стимулируют отделение капли, препятствуя дальнейшему нарастанию производительности наплавки.

Количество циклов СМТ с электродами отрицательной полярности может быть задано пользователем таким образом, чтобы добиться нужной производительности наплавки в соответствии с производственными условиями. После завершения заданного количества циклов полярность сварочного тока инвертируется (при циклическом коротком замыкании), что и является основным нововведением. Для традиционных технологий АС-МIG (сварка плавящимся электродом в среде защитных газов с переменным сварочным током) характерна высокая нестабильность при переключении фаз. Технология СМТ Advanced полностью устраняет данную проблему, поскольку переключение полярности выполняется в течение определенной фазы короткого замыкания. После изменения полярности система управления СМТ отводит проволочный электрод из сварочной ванны и включает дугу с положительной полярностью. В фазе EP-СМТ точка контакта дуги на конце проволоки имеет малые размеры, т.е. дуга проникает в заготовку с повышенной интенсивностью. Кроме того, тепловложение в основной материал существенно выше, чем в фазе EN-СМТ. После достижения заданной длины дуги устройство подачи проволоки возобновляет подачу в направлении сварочной ванны. После завершения заданного пользователем количества циклов с положительной полярностью полярность снова переключается в процессе короткого замыкания.

Если рассмотреть сварные швы, выполненные с применением технологий СМТ [1] и СМТ Advanced в аналогичных условиях, нетрудно заметить, что производительность наплавки в случае применения технологии СМТ Advanced значительно выше (рисунок 6). В обоих случаях сварке подвергались листы AlMg3 толщиной 1 мм при одинаковой глубине проплавления и скорости сварки. Однако, средняя скорость подачи проволоки была увеличена с примерно 3 до 5 м/мин.

## Технология СМТ Pulsed Advanced

Традиционные технологии сварки переменным током безусловно являются технологиями импульсной сварки, в которых регулирование производительности наплавки и тепловложения зависит от величины отрицательной части фазы замыкания на землю. Изменение полярности осуществляется в процессе горения дуги. Для поддержания столба ионизированной дуги при переходе сварочного тока через ноль необходимо вспомогательное напряжение. В момент повторного зажигания могут возникать прерывания дуги, ведущие к нестабильности процесса.

По сравнению с традиционными технологиями, основанными на применении переменного тока, технология СМТ Advanced Pulse предусматривает четкое отделение фазы импульсной дуги от фазы тока отрицательной полярности. Данная технология включает в себя отрицательную фазу EN-СМТ с реверсивным перемещением проволоки и фазу импульсной дуги с постоянной подачей проволоки (рисунок 4). Фаза изменяющегося отрицательного тока замыкания на землю более не оказывает влияния на отделение капли в фазе импульсной дуги (при положительной полярности электрода), поскольку капли металла формируются в фазе EN-

СМТ и полностью переносятся при последующем коротком замыкании. Тем не менее, в фазе импульсной дуги перенос металла происходит без короткого замыкания. Это означает, что для обеспечения перехода между двумя фазами процесса (рисунок 6) необходимы фазы инициализации. После переноса материала на конце проволоки остается относительно малое количество расплавленного металла. Фаза инициализации 1 определяет момент перехода между фазой импульсной дуги и фазой EN-CMT. Фаза инициализации 2 обеспечивает переход между фазой EN-CMT и фазой импульсной дуги (рисунок 7).

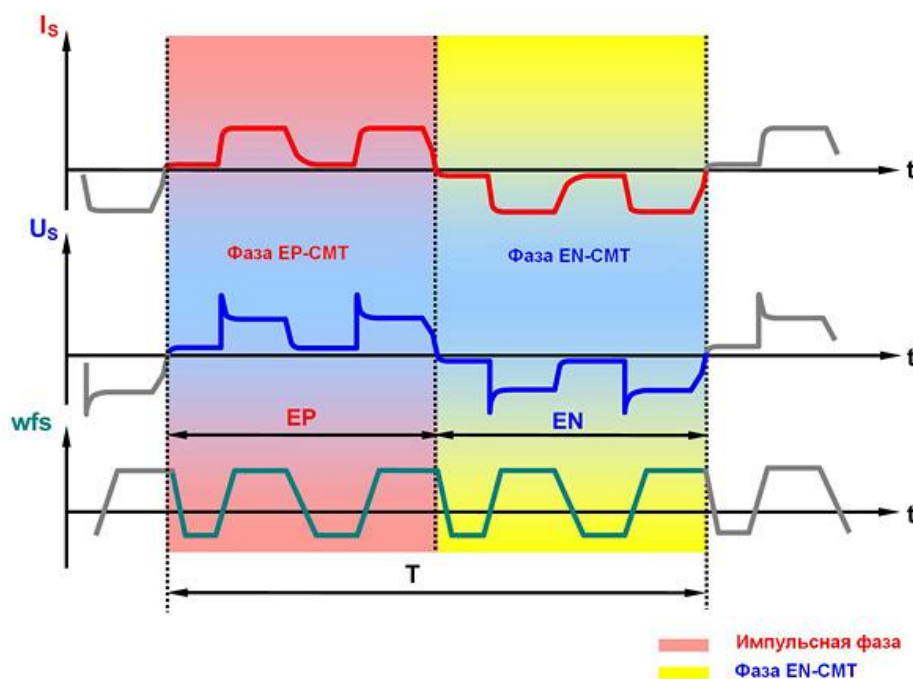


Рисунок 2: Кривая сварочного тока ( $I_s$ ), кривая сварочного напряжения ( $U_s$ ) и скорость подачи проволоки ( $vD$ ) для дуговой сварки EN-EP-CMT.

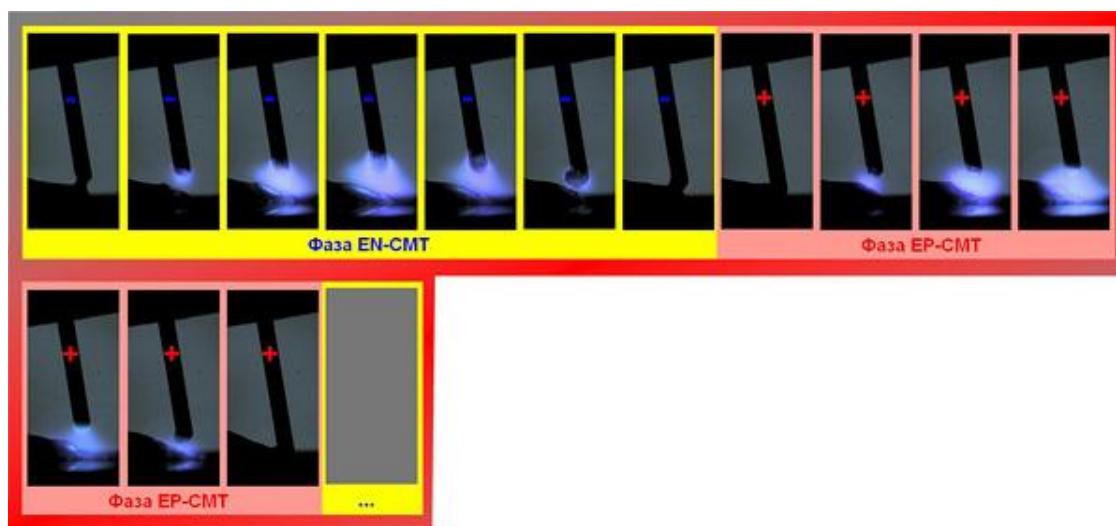


Рисунок 3: Процесс сварки по технологии CMT Advanced, снятый высокоскоростной камерой.

В традиционных технологиях, использующих переменный ток, длина дуги регулируется исключительно по напряжению дуги. Любые слои оксидной пленки и/или загрязнения на

свариваемых кромках отрицательно влияют на измеряемые параметры и в значительной степени – на регулирование по напряжению. Эти отрицательные факторы полностью устраняются применением технологии CMT Advanced Pulse. Впервые при промышленном применении момент короткого замыкания стал наиболее подходящим моментом для переключения полярности. По причине отсутствия дуги в момент короткого замыкания указанные негативные явления не проявляются. Более того, измерения и управление длиной дуги осуществляются «механически», т.е. независимо от напряжения дуги. После короткого замыкания проволока отводится на заданный период и с заданной скоростью. Таким образом, устанавливается зазор, определяющий длину дуги. Соответственно, внешние факторы больше не оказывают отрицательного влияния на режим управления.

Сравнительные изображения швов, полученных с использованием традиционной технологии CMT Pulse и новой CMT Advanced Pulse, показаны на рисунке 8. Данные швы выполнены с присадочным материалом AlSi5 при сварке заготовок из материала AlMg3 толщиной 1,5 мм при постоянной скорости сварки и одинаковой глубине проплавления. Для оценки влияния полярности на производительность наплавки были исследованы следы плавления. В новой технологии средняя скорость подачи проволоки может быть увеличена в 1,6 раз. Пользователь получит преимущество значительно более высокой точности управления сварочной ванной. Кроме того, обеспечивается расширенное и более точное регулирование производительности наплавки и глубины проплавления.

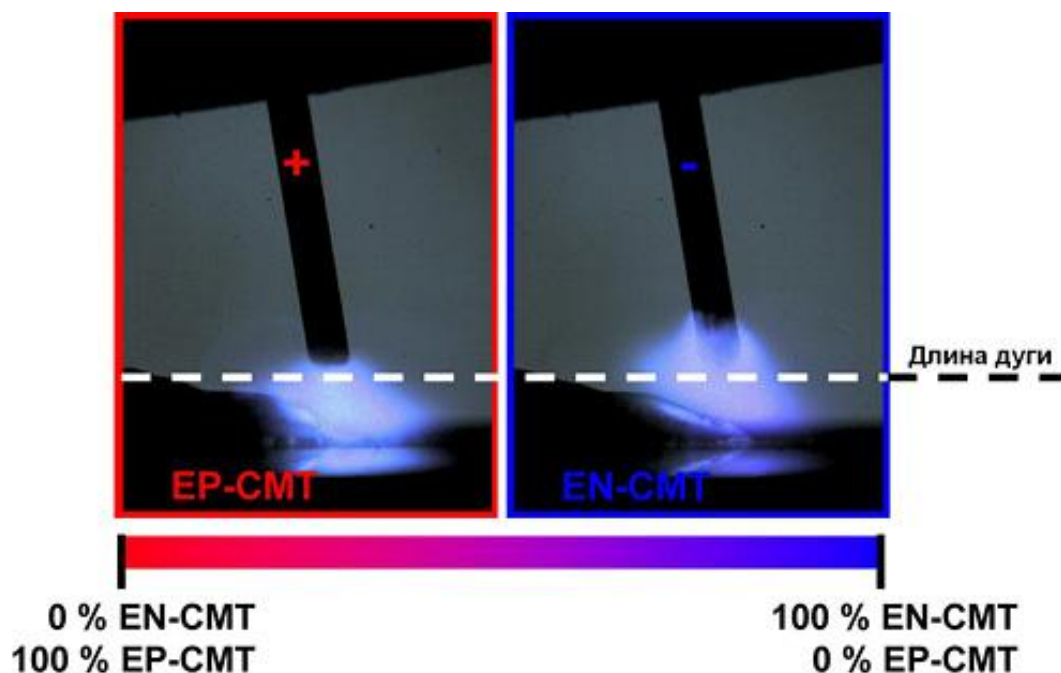


Рисунок 4: Влияние полярности на свойства электрической дуги.

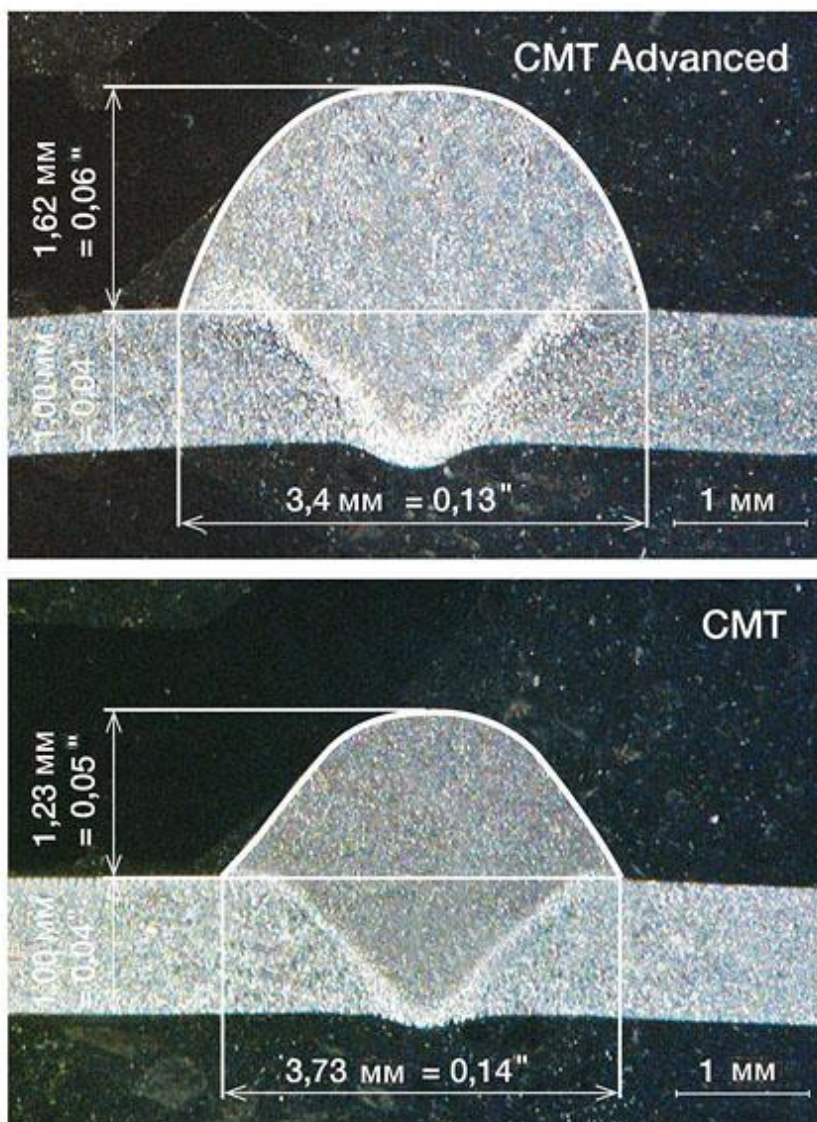


Рисунок 5: Влияние полярности на производительность наплавки.

## CMT Advanced: особенности

При сварке деталей из алюминия и сплавов из него особое влияние на качество шва оказывают два фактора. В первую очередь необходимо оптимальное управление сварочной ванной и предшествующей зоной нагрева. Данное условие имеет особенное значение при наличии больших зазоров между заготовками. Кроме того, для выполнения данной задачи необходимо регулировать тепловложение в начале процесса сварки. При этом нужен практически «холодный» процесс с минимальным, но регулируемым тепловложением. Технология CMT Advanced полностью соответствует данным условиям. Регулируемая фаза пуска в начале сварочного процесса обеспечивает пользователю возможность точного регулирования тепловложения в соответствии с производственными условиями.

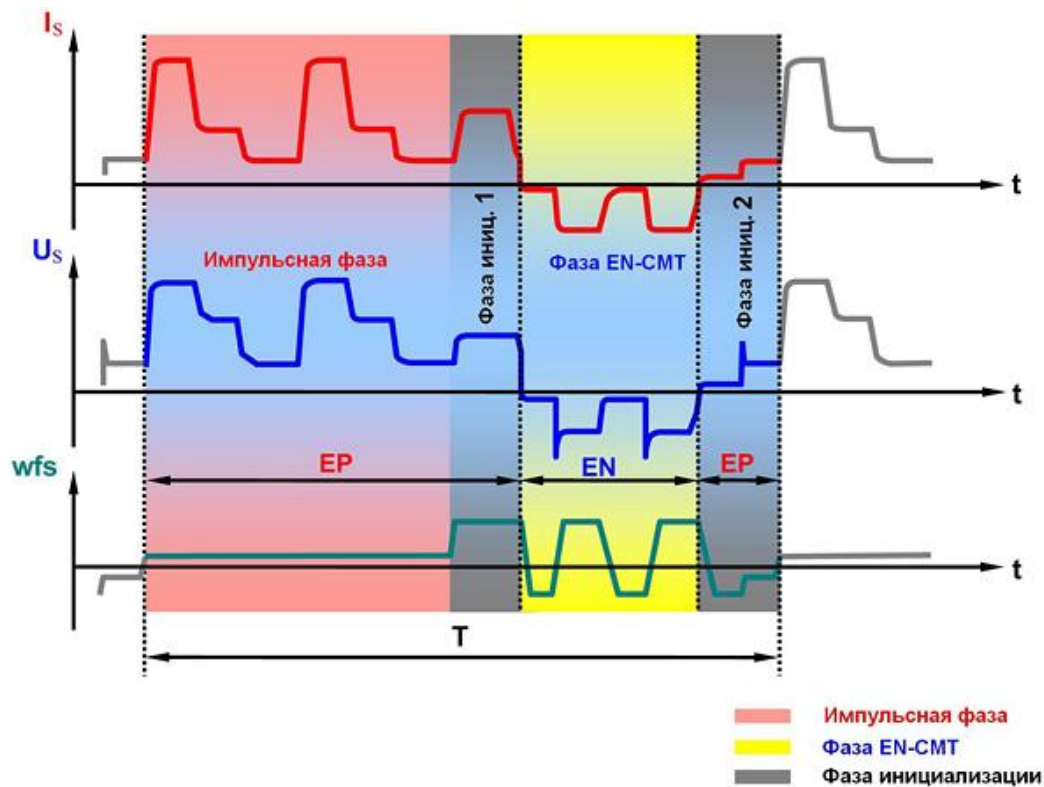


Рисунок 6: Кривая сварочного тока ( $I_s$ ), кривая сварочного напряжения ( $U_s$ ) и скорость подачи проволоки ( $wfD$ ) для импульсно-дуговой сварки CMT Advanced Pulse.

В обычном варианте «горячего пуска», применяемом для сварки более толстых листов, дуга со струйным переносом металла обеспечивает достаточное проплавление. На настоящий момент экспертами компании Fronius разработана полностью регулируемая фаза сварочного процесса для сварки тонких и ультратонких листов. В данной, так называемой фазе начала сварки пользователь может задать пропорции циклов и количество положительных и отрицательных фаз CMT независимо для каждого процесса.

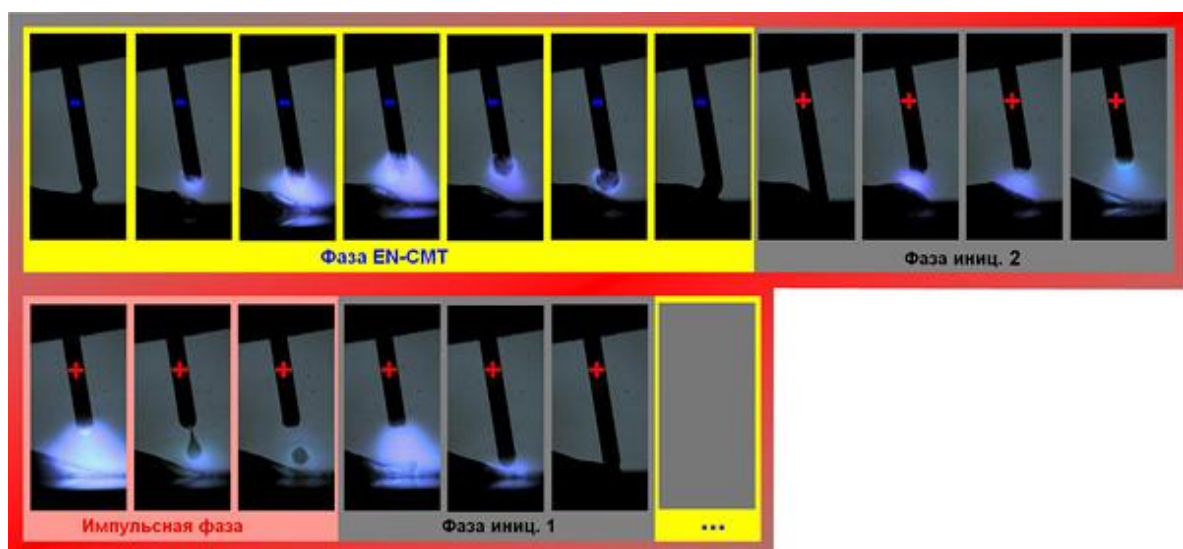


Рисунок 7: Процесс сварки по технологии CMT Advanced Pulse, снятый высокоскоростной камерой.

## Расширение границ применения процесса дуговой сварки

Разрабатывая и внедряя новые технологии, компания Fronius продолжает существенно расширять область применения дуговой сварки по сравнению со стандартными технологиями (рисунок 9). На диаграмме показаны средние арифметические значения сварочного тока  $I_s$ , сварочного напряжения  $U_s$  и скорости подачи проволоки  $v_D$  для различных технологий. Сварка выполнялась с использованием присадочного металла AlSi5 (диаметр проволоки 1,2 мм) в атмосфере защитного газа (аргона) при сварочном положении PA.

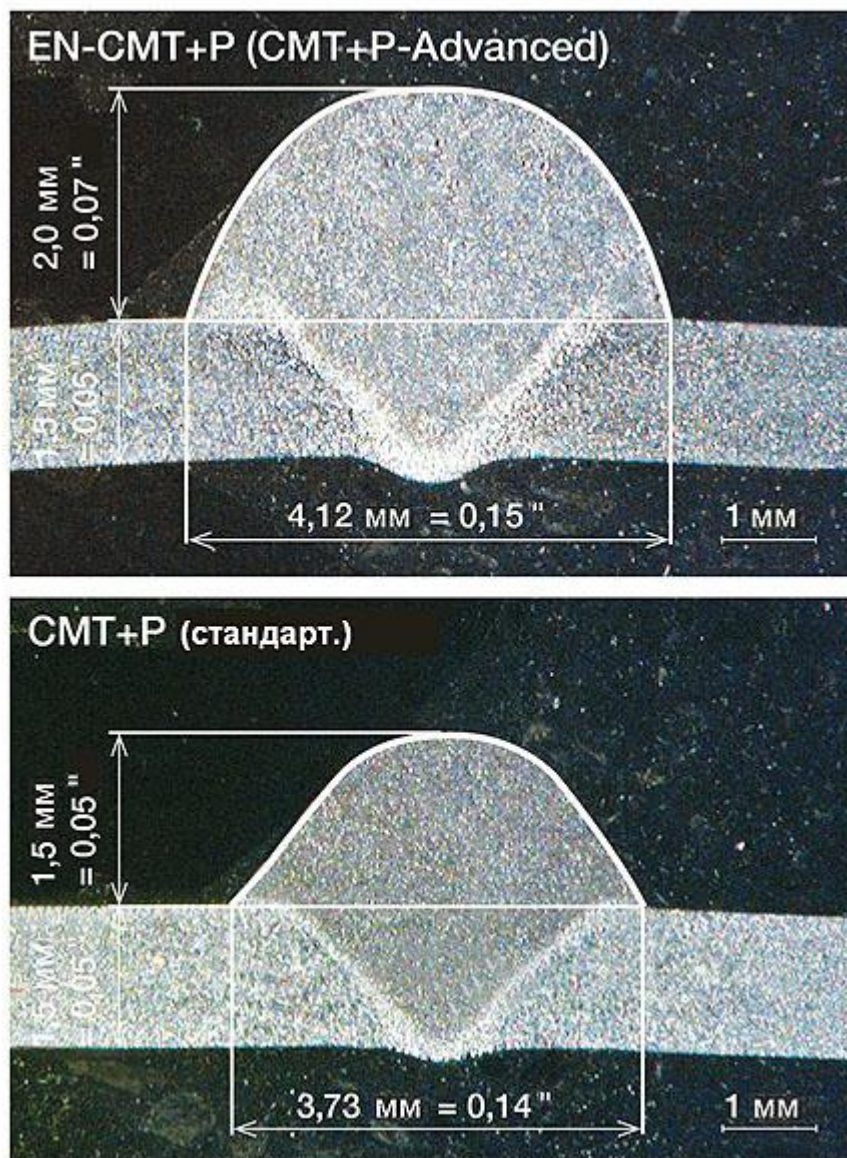
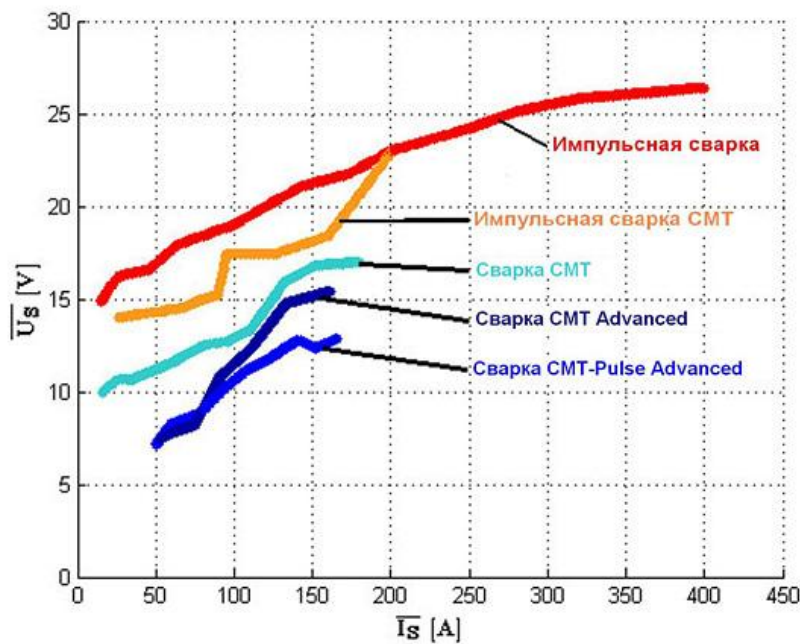
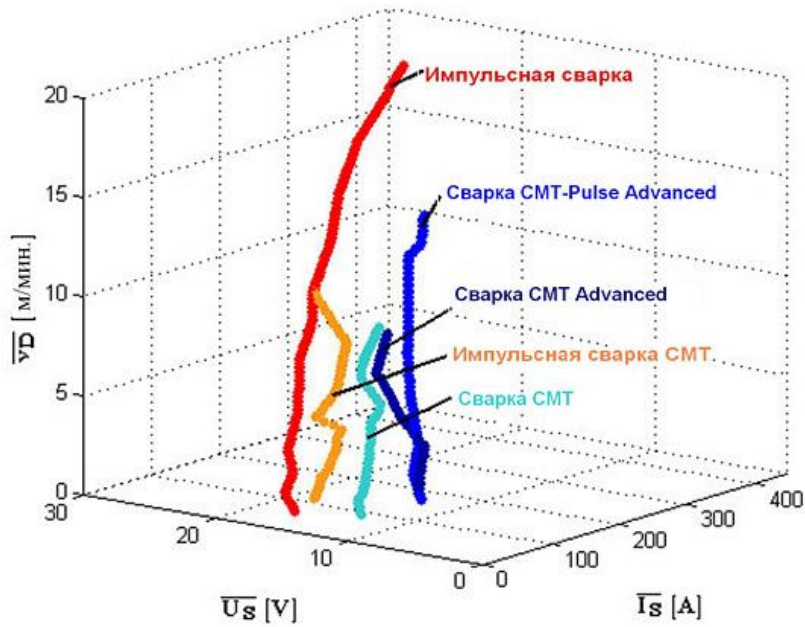


Рисунок 8: Сравнение производительности наплавки для стандартной технологии CMT Pulse и технологии CMT Advanced Pulse.

Технология CMT Advanced на диаграмме  $U_s$ - $I_s$  (рисунок 10, слева сверху) характеризуется значительно сниженным сварочным током  $I_s$  и пропорционально уменьшенным сварочным напряжением  $U_s$ . Очевидное увеличение производительности наплавки, выраженное скоростью подачи проволоки  $v_D$ , показано путем поворота диаграммы в плоскости  $v_D$ - $I_s$  (рисунок 9). Для традиционной технологии импульсно-дуговой сварки необходимый сварочный ток составляет в



среднем  $I_s = 308,8$  А при средней скорости подачи проволоки  $vD = 14,4$  м/мин. Для сравнения отметим, что технология CMT Advanced Pulse при той же производительности наплавки требует всего 165,9 А. Среднее сварочное напряжение  $U_s$  определяет минимальную мощность, необходимую при работе в нижнем диапазоне мощности.



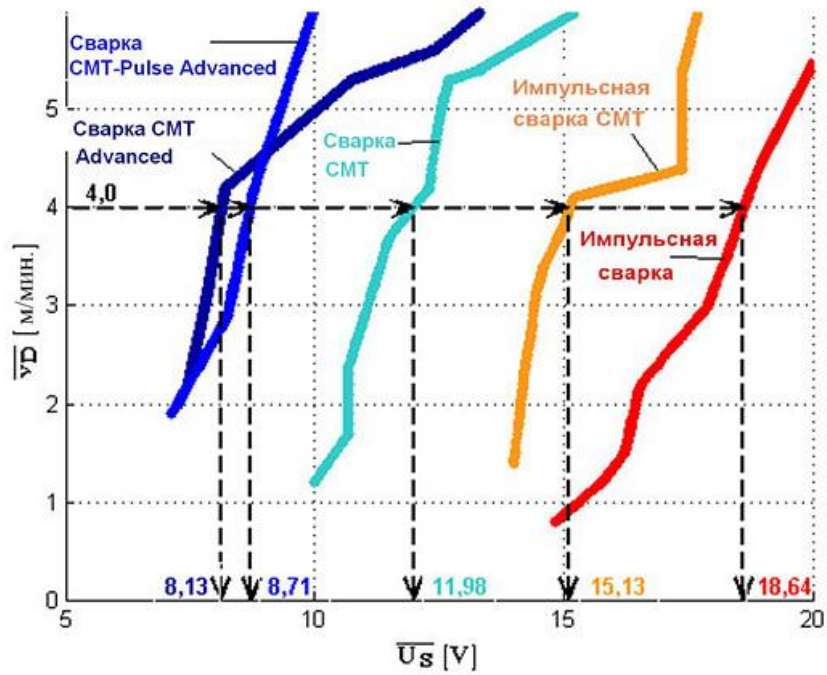
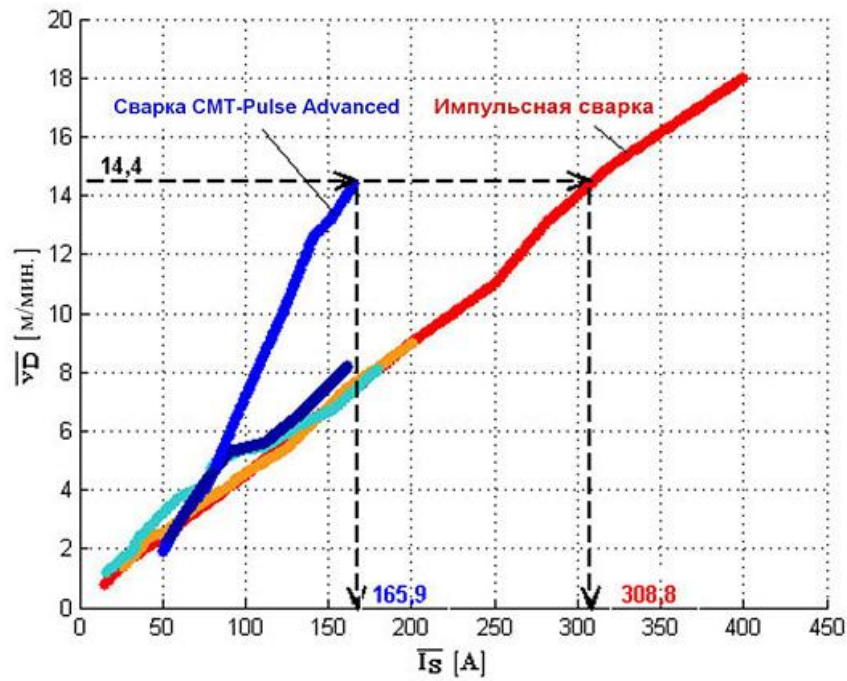


Рисунок 9: Расширение границ применения процесса дуговой сварки.

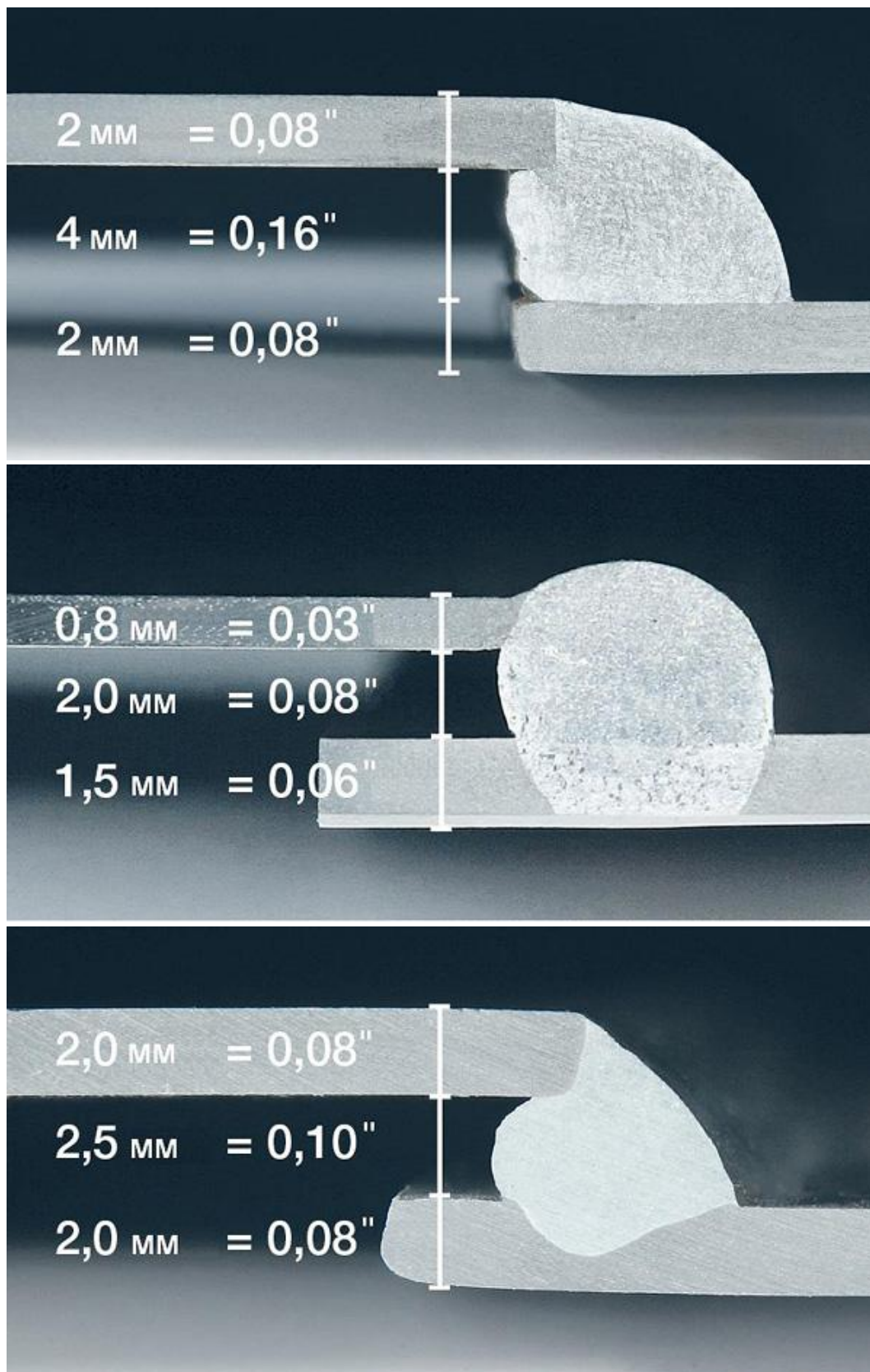


Рисунок 10: Максимально высокая способность по перекрытию зазора при сварке различных материалов.

## Области применения технологии CMT Advanced

Особое внимание следует обратить на те области, работа в которых требует низкого и регулируемого тепловложения. Благодаря очень высокому отношению производительности наплавки к потребляемой мощности, при сварке тонких и ультратонких металлических листов можно перекрывать значительно большие зазоры. Незначительное расплавление основных металлов существенно расширяет сферу применения, добавляя в нее новые области или способы, позволяющие получить особые преимущества. При соединении разнородных материалов, например, алюминия и стали согласно или при соединении материалов с поверхностным покрытием (оболочкой) можно добиться значительного экономического эффекта.

В примере на рисунке 10 показана высокая способность по перекрытию зазора. Пользователь просто выбирает уровень заполнения и регулирует тепловложение. По величине тепловложения определяется соотношение отрицательных и положительных циклов процесса. Скорость сварки составляет 60 см/мин., основной материал: AlMg3. Зазор шириной 2 мм может быть перекрыт без какого-либо поперечного перемещения. Кроме того, циклическое переключение полярности обеспечивает создание ровного сварного шва.

Новая технология обеспечивает выполнение требования по надежному перекрытию зазоров различной ширины (от 0 до X). Решающим фактором является идентичность выбранных параметров независимо от ширины зазора. Наиболее часто встречаются зазоры, ширина которых варьируется от нуля до максимума (X). Технология CMT Pulsed Advanced позволяет без труда справляться даже с подобными зазорами. Рассмотрим ещё один пример.

Нахлесточное соединение заготовок из листового материала AlMg3 толщиной 2 мм имеет зазор, ширина которого варьируется от 0 до 2,5 мм. Данное нахлесточное соединение выполняется с применением технологии CMT Pulsed Advanced при постоянной скорости сварки 60 см/мин. и неизменных параметрах сварки с использованием присадочного материала AlSi5 с диаметром проволоки 1,2 мм. Несмотря на неравномерный зазор, процесс сварки осуществляется с постоянными параметрами при отсутствии какой-либо нестабильности процесса. В результате получен шов, совершенный по всей длине (рисунок 11).

Нахлесточное соединение заготовок из листового материала AlMg3 толщиной 0,8 мм с зазором 1,33 мм, выполненное с применением технологии CMT Advanced и присадочной проволоки AlSi5 диаметром 1,2 мм, показано на рисунке 13 в качестве ещё одного примера.

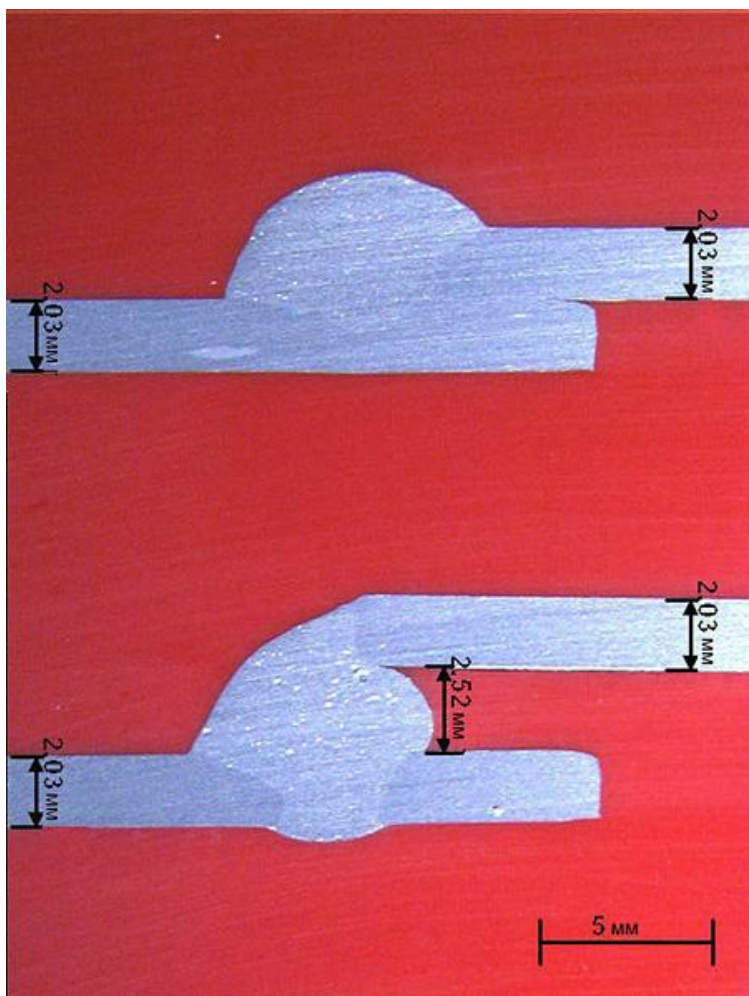


Рисунок 11: Способность по перекрытию зазора шириной от  $X$  до нуля для нахлесточного соединения заготовок из AlMg3 толщиной 0,8 мм без регулирования параметров процесса.

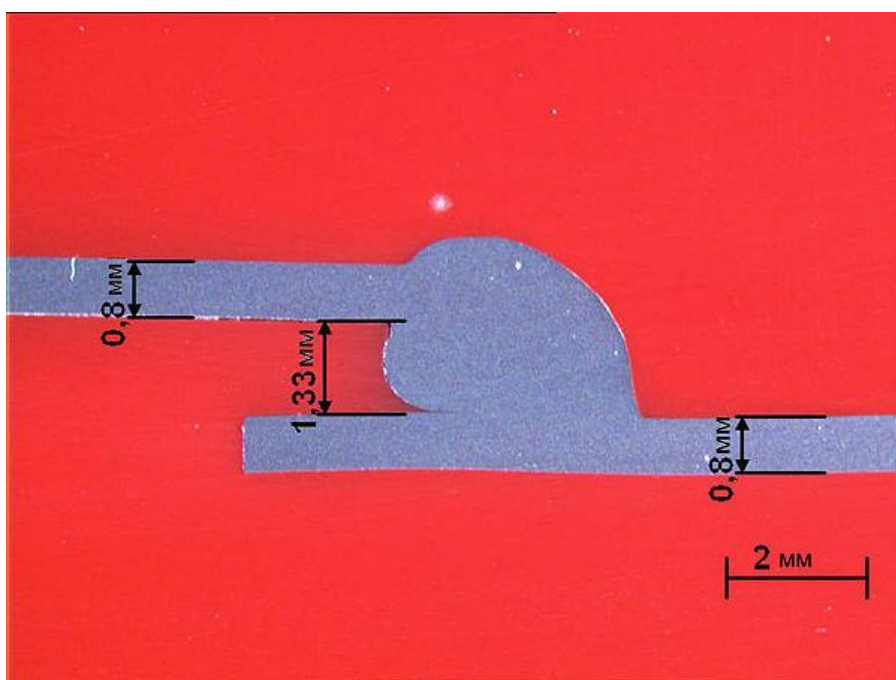


Рисунок 12: Способность по перекрытию зазора нахлесточного соединения заготовок из AlMg3 толщиной 0,8 мм.

## Заключение

Технология SMT Advanced предоставляет пользователю два новых варианта соединения тонких и ультратонких листов металла. Ключевой особенностью данной технологии является интеграция функции переключения полярности в алгоритмы управления в сочетании с реверсивной подачей проволоки. Настраиваемые циклы, с отрицательной полярностью электрода, увеличивают производительность наплавки на основной металл при постоянном тепловложении, и/или существенно уменьшают тепловложение при постоянной производительности наплавки. Новые варианты технологии отличаются очень высокой стабильностью дуги, унаследованной из уже традиционной технологии SMT. Точное переключение полярности в фазе короткого замыкания полностью предотвращает прерывания дуги и соответствующие нарушения стабильности процесса.