Доклад „Гибридная технология лазерной сварки и лазерная пайка с подогревом присадочной проволоки, два высокоскоростных процесса для соединения материалов“

Резюме:
Как лазерная, так и дуговая сварка уже давно используются в промышленности и позволяют решать широкий спектр технологических задач в области соединения материалов. Каждый из этих процессов имеет свою область использования, определяемую физическими особенностями переноса энергии в изделие и величиной плотности потока энергии, которая может быть при этом достигнута. Энергия переносится от источника лазерного луча в материал с помощью высокоэнергетичного инфракрасного когерентного излучения по оптоволоконному кабелю.

В дуговых процессах тепло передаётся в свариваемое изделие с помощью тока большой величины по столбу дуги. Лазерное излучение позволят формировать соединение с очень узкой зоной термического влияния и высоким соотношением глубины проплавления к ширине шва (эффект “глубинной сварки”). Однако свариваемость при лазерной сварке очень мала, поскольку мал диаметр пятна нагрева, но при этом использование этого способа позволяет достичь очень высоких скоростей сварки.

Процесс дуговой сварки характеризуется значительно меньшей плотностью потока энергии, однако создаёт на поверхности свариваемой детали большое пятно нагрева и происходит на меньших скоростях сварки. Объединение этих двух процессов открывает новые возможности при решении задач соединения материалов. Это позволяет достичь высокого качества шва и даёт ряд производственных преимуществ, в частности снижение производственных затрат.

Этот процесс даёт ряд интересных и экономически привлекательных преимуществ и может быть использован, в частности, в автомобильной промышленности, не только из-за того, что позволяет увеличить допуски при сборке свариваемого изделия и достичь более высокой скорости сварки, но и потому, что позволяет достичь очень хороших механических / технологических параметров сварного соединения.

1. Введение:

О том, как объединять лазерное излучение с электрической дугой в комбинированный сварочный процесс, было известно ещё с 70-х годов прошлого века, однако в течение долгого времени в этом направлении не было предпринято никаких научных исследований. И вот недавно специалисты вновь обратили своё внимание на этот процесс и попробовали объединить преимущества дуговой сварки с преимуществами лазерной, разработав гибридный сварочный процесс.

В то время как в те давние годы лазерные источники ещё должны были доказать свою применимость в промышленности, сегодня они стали стандартным технологическим оборудованием во многих производственных предприятиях. Объединение лазерной сварки с другим сварочным процессом обычно называют “гибридным сварочным процессом”.

Это значит, что лазурный луч и дуга действуют одновременно в одной зоне сварки, они взаимодействуют и поддерживают друг друга.

2. Лазер:

Для получения нужного эффекта “глубокой сварки” лазерная сварка требует не только высокой мощности лазера, но и луча высокого качества. Луч высокого качества может быть использован либо для получения меньшего фокусного диаметра, либо большего фокусного расстояния. Для разрабатываемых в настоящее время исследовательских проектов используется твердотельный лазер с ламповой накачкой и мощностью пучка 4 кВт. Лазерное излечение при этом передаётся с помощью 600 мм стекловолокна.

Лазерный пучок передаётся по стекловолокну, в котором начало и конец охлаждаются водой. Лазерный луч затем проецируется на изделие с помощью фокусирующего модуля с фокусным расстоянием 200 мм.

3. Гибридная технология лазерной сварки:

Для сварки металлических изделий луч Nd:YAG-лазера фокусируется при интенсивности свыше 10^6 Вт/см^2. Когда лазерный луч попадает на поверхность материала, он разогревает очень малое по площади пятно до температуры испарения и в свариваемом металле, благодаря высвобождающимся

парам, образуется полость. Характерным отличием полученного таким образом шва является высокое соотношение его глубины к ширине. Плотность потока энергии свободно горящей дуги лишь немногим более 10^4 Вт/см^2.

Рисунок 1 иллюстрирует основные принципы гибридной технологии сварки. Показанный здесь лазерный луч разогревает верхние слои свариваемого металла в районе соединения в дополнение к разогреву, осуществляемому сварочной дугой. В отличие от последовательного применения, когда происходит два раздельных процесса, гибридная технология сварки может рассматриваться как сочетание обоих процессов, действующих одновременно в одной и той же зоне сварки. В зависимости от того, какой лазерный или дуговой процесс используется и от их параметров, они будут влиять друг на друга в различной степени и различным образом [1, 2].

Благодаря сочетанию лазерного и дугового процесса также становится возможным повысить как глубину проплавления, так и скорость сварки по сравнению с раздельным применением этих технологий. Высвобождающиеся из образующейся полости пары металла взаимодействуют с плазмой дуги. Поглощение же излучения Nd:YAG-лазера плазмой является пренебрежимо малым. Тем, каково соотношение мощностей этих двух источников нагрева, определяется преимущественный характер процесса в целом, то есть, является ли он преимущественно “лазерным”, или преимущественно “дуговым” [3,4].

Рис. 1: Схематическое представление: Гибридная технология лазерной сварки

На поглощение лазерного излучения существенно влияет температура рабочей поверхности. Перед тем, как процесс лазерной сварки сможет углубиться в основной металл, необходимо в первую очередь преодолеть отражательную способность поверхности металла, особенно при сварке алюминия. Это может быть достигнуто за счёт использования при сварке специальной стартовой программы. После того, как достигнута температура испарения и сформирована паровая полость, почти вся энергия излучения может быть вложена в изделие. Необходимая для этого энергия определяется температурно-зависимой величиной поглощения и количеством энергии, потерянной за счёт теплоотвода в основной металл. В гибридной технологии лазерной сварки испарение происходит не только с поверхности основного металла, но и с поверхности присадочной проволоки, что обеспечивает большее количество металлических паров в зоне сварки и повышает поглощение излучения лазера. Это также предотвращает затухание процесса [5, 6, 7, 8, 9].

4. Применение технологии в автомобильной промышленности:

Использованием пространственной рамочной технологии можно добиться снижения веса конструкции на 43% по сравнению со стальным каркасом.

Рис. 2: Пространственная рамочная концепция Audi A2

Рамочный каркас Audi A2 содержит 30 м швов, полученных при помощи лазерной сварки, и 20 м швов, полученных сваркой плавящимся электродом в инертном газе. Кроме того, имеется 1700 заклёпок.

Рис. 3: Сравнение характеристик и способов соединения на примере Audi-A2

Технологии соединения:
20 м – сварка плавящимся электродом в инертном газе
30 м – лазерная сварка
1700 – заклёпочные соединения
168 – листовой материал – 71%
50 – металлопрофиль – 21%
20 – литые материалы – 8%

На рисунке 4 показан шов, полученный с помощью гибридной технологии лазерной сварки отливки $AlMg_3$ с листом AlMgSi. В качестве присадочной проволоки использовался $AlSi_5$, а в качестве защитного газа – аргон. При увеличении мощности лазера можно получить и боле глубокое проплавление. Сочетание лазерного луча с электрической дугой в этом случае позволяет увеличить размер сварочной ванны по сравнению с традиционным процессом лазерной сварки. Это, в свою очередь, даёт возможность сваривать компоненты с более широкими зазорами.

Рис. 4: Стыковое соединение с зазором 0,5 мм

В автомобильной промышленности приходится решать множество технических задач, требующих получения стыковых соединений без подготовки шва. На данный момент для решения подобных задач используется лазерная сварка с холодной присадочной проволокой, что обусловлено горячим растрескиванием сплава AA 6xxx. Использование холодной присадочной проволоки приводит к значительным потерям энергии лазерного луча на её плавление.

Следующий рисунок демонстрирует различия между гибридной технологией лазерной сварки и лазерной сваркой на примере стыкового соединения при скорости сварки 2.4 м/мин. В случае лазерной сварки невозможно заполнить корень шва, что приводит к формированию подрезов. Кроме того, проплавление основного металла крайне мало. Ширина корня шва также очень мала, поэтому следует ожидать низкой прочности на разрыв. В случае гибридной технологии лазерной сварки обеспечивается перенос дополнительного металла в сварочную ванну. Подрезы заполняются за счёт проволоки, расплавляемой электрической дугой в инертном газе, что позволяет сэкономить часть энергии лазера. Эта сэкономленная энергия может быть в этом случае использована для увеличения глубины проплавления основного металла, а ширина корня шва при этом больше, чем толщина материала, что, исходя из результатов численного моделирования, необходимо для получения качественного соединения.

Рис. 5 Сравнение гибридной технологии лазерной сварки и лазерной сварки без присадочной проволоки

Гибридная технология лазерной сварки позволяет сваривать материалы из алюминия, сталей и нержавеющих сталей толщиной до 4 мм. Если толщина слишком велика, не достигается полное проплавление основного металла. Для соединения оцинкованных материалов предпочтительно использовать процесс лазерной пайки. Гибридная технология лазерной сварки в автомобильной промышленности может также применяться в производстве передач, валов и кузовов автомобилей.

Сварочная головка:

Сварочная головка должна быть достаточно миниатюрной, чтобы обеспечить хороший доступ к свариваемым компонентам, особенно при производстве кузовов автомобилей. Более того, она должна быть сконструирована таким образом, чтобы было предусмотрено как разъёмное соединение с головой робота, так и настройка таких переменных процесса, как фокусное расстояние и позиционирование горелки во всех декартовых координатах. На рисунке 5 показана такая сварочная головка во время работы. Разбрызгивание, происходящее по время процесса сварки, приводит к дополнительному загрязнению защитных стёкол. Кварцевые стёкла с обеих сторон покрыты практически не отражающим материалом и предназначены для защиты от повреждений оптической системы лазера.

В зависимости от степени загрязнения, скапливающиеся на стекле брызги могут снизить мощность лазера, вкладываемую в изделие, вплоть до 10%. Большее загрязнение в общем случае приводит к разрушению защитного стекла, поскольку значительная часть энергии излучения в этом случае поглощается самим стеклом, что вызывает появление термических напряжений. Эту сварочную головку и сварочное оборудование можно использовать для гибридной технологии лазерной сварки, лазерной сварки и лазерной пайки с подогревом присадочной проволоки.

Рис. 6: Сварочная головка и процессы

5. Преимущества гибридной технологии лазерной сварки:

Совместное применение электрической дуги и лазерного луча даёт следующие преимущества:
Преимущества гибридной технологии лазерной сварки по сравнению с лазерной сваркой:
- более высокая стабильность процесса
- лучшая свариваемость
- более глубокое проплавление
- меньшие капитальные вложения
- большая гибкость

Преимущества гибридной технологии лазерной сварки по сравнению со сваркой плавящимся электродом в инертном газе:

- большие скорости сварки
- более глубокое проплавление при больших скоростях сварки
- снижение тепловложений
- большая прочность на разрыв
- более узкие сварные швы
- ...

Рис. 7: Преимущества объединения двух процессов

Процесс дуговой сварки характеризуется дешевым источником питания, хорошей свариваемостью и возможностью влиять на структуру, за счёт добавки присадочных металлов. Лазерный процесс, с другой стороны, отличают большая глубина проплавления, высокая скорость сварки, низкие тепловложения и узкие сварные швы. Лазерный пучок производит " эффект глубокой сварки" в металлических материалах за счёт плотности потока, которая позволяет сваривать детали больших толщин при достаточно высокой мощности лазера. Гибридная технология лазерной сварки таким образом позволяет повысить скорость сварки, стабилизировать процесс за счёт взаимодействия между дугой и лазерным пучком, и повысить допуски. Поскольку сварочная ванна меньше, чем при сварке плавящимся электродом в среде инертных газов, то снижаются тепловложения и, таким образом, уменьшается зона термического влияния. Это приводит к лучшей геометрии сварного шва, что снижает трудозатраты по его обработке после сварки. В процессах, где сварка происходит с образованием двух раздельных сварочных ванн, последующие тепловложения за счёт дуги приводят к тому, что в сваренной лазером области, особенно в случае стали, происходит послесварочный отпуск, что приводит к более равномерному распределению величины твёрдости в области шва.
Кроме того, и временные и материальные производственные затраты можно снизить за счёт более высокой скорости сварки.

Рисунок 6 подытоживает преимущества комбинированного (т.е. гибридного) процесса.

Рассматривая экономические преимущества гибридной сварки по отношению к лазерной, можно сказать следующее. Сварной шов состоит отчасти из лазерного шва, а отчасти из шва, полученного сваркой плавящимся электродом в среде инертного газа. Гибридный процесс позволяет снизить мощность лазерного луча, что означает значительное снижение потребления энергии лазерным источником, вплоть до работы лазерного аппарата лишь на 3% своей мощности. Другими словами: снижение мощности лазерного излучения, потребляемого изделием на 1 кВт приводит к снижению мощности, потребляемой из сети, на примерно 35 кВА. Лазерные аппараты стоят около 100 000 евро на каждый кВт мощности лазерного луча.

Например, если внедрение гибридного процесса позволяет использовать аппарат с мощностью лазерного пучка 2 кВт вместо аппарата с мощностью пучка 4 кВт, то при этом экономится 200 000 евро инвестиционных издержек. Однако при этом необходимо помнить, что для реализации гибридной технологии необходимо оборудование для сварки плавящимся электродом в среде инертного газа стоимостью около 20 000 евро.

Благодаря большим скоростям сварки также снижаются как временные издержки, так и затраты на сварку.

6. Лазерная пайка с подогревом присадочной проволоки:

Ещё одним способом совместного использования лазерного луча и присадочной проволоки является лазерная пайка с подогревом присадочной проволоки [10]. В этом случае присадочная проволока предварительно разогревается с помощью источника питания, который может также использоваться для гибридного процесса лазерной сварки. Присадочная проволока имеет токовую нагрузку от 100 до 220 А. Скорость подачи проволоки при этом зависит от поперечного сечения паяного шва и скорости пайки. При пайке также, за счёт присадочного металла, получение расплава облегчено по сравнению со сварными швами.

Таким образом, пайка листовых материалов и проведение ремонтных работ могут быть значительно облегчены по сравнению с использованием сварных соединений. Характерным преимуществом лазерной пайки с подогревом присадочной проволоки является высокая коррозионная стойкость зоны пайки. В качестве присадочного металла используются дешёвые сплавы на основы меди, такие как $SG\text{-}CuSi_3$, а в качестве защитного газа обычно служит аргон.

Рис. 8: Схематическое представление лазерной пайки с подогревом присадочной проволоки

На следующем рисунке показано поперечное сечение материала, спаянного методом лазерной пайки с подогревом присадочной проволоки. Оцинкованный материал паялся со скоростью 3 м/мин, а на присадочную проволоку подавалась токовая нагрузка 205 А. Поскольку тепловложения очень малы, в результате пайки практически не происходит деформации основного металла.

Рис. 9: Лазерная пайка с подогревом присадочной проволоки

Скорость сварки: 3 м/мин
Токовая нагрузка на присадочную проволоку: 205 А
Основной материал: DC 04 + ZE 25/25
Толщина: 1,5 мм
Присадочная проволока: SG $CuSi_3$; ∅ 1,6 мм

7. Заключение:

Гибридная технология лазерной сварки – это абсолютно новая технология, которая открывает новые перспективы для решения широкого спектра технологических задач, возникающих в металлообрабатывающей промышленности, в особенности там, где невозможно или нерентабельно достичь тех допусков по чистоте поверхности, которые необходимы для проведения сварки лазерным лучом. Широкий диапазон решаемых задач и улучшенные характеристики объединённого процесса означают в первую очередь повышение конкурентоспособности за счёт снижения как инвестиционных, так и временных издержек и себестоимости, а также за счёт повышения производительности.

Гибридная технология лазерной сварки также предлагает новый подход к сварке алюминия. Однако стабильный процесс, который может быть внедрён на производстве, стал возможен лишь относительно недавно, благодаря повышению предела выходной мощности твердотельных лазеров. Для изучения фундаментальных основ гибридного сварочного процесса лазер-дуга были проведены многочисленные исследования.

Говоря “гибридный сварочный процесс”, мы подразумеваем сочетание сварки лазерным лучом с дуговой сваркой с единой рабочей зоной (плазма и расплав). Первоначальные исследования показали, что процесс возможен, определили, какие перспективы открывает объединение этих процессов, и что при этом происходит взаимная компенсация недостатков обоих способов сварки, что приводит к расширению возможностей процесса, улучшению свариваемости и надёжности сварки для многих самых различных материалов и конструкций.

В частности, это может быть проиллюстрировано на примере алюминиевых сплавов. Подбирая оптимальные параметры процесса, можно выборочно влиять на такие характеристики сварного шва, как его геометрия и структурное строение. Процесс дуговой сварки увеличивает свариваемость за счёт добавки присадочного металла; он также определяет ширину шва и снижает трудозатраты по подготовке свариваемых деталей под сварку.

Кроме того, взаимодействие между этими двумя процессами существенно увеличивает эффективность процесса сварки в целом. Этот комбинированный процесс также требует значительно меньших инвестиционных вложений по сравнению с традиционной технологией лазерной сварки.

Процесс лазерной пайки с подогревом присадочной проволоки может быть использован специально для оцинкованных материалов для достижения высокой коррозионной стойкости.

Литература:

[1] Dausinger, F.: Hohe Prozeßsicherheit beim Aluminiumschweißen mit Nd: YAG-Lasern. Bleche und Profile 42 (1995) Nr.9, S.544-547.
[2] Cui, H.: Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Schweißlichtbogen und fokussiertem Laserstrahl und der Anwendungsmöglichkeiten kombinierter Laser-Lichtbogentechnik. TU Braunschweig, Dissertation, 1991.
12
[3] Maier, C.; Beersiek, J.; Neuenhahn, K.: Kombiniertes Lichtbogen- Laserstrahl-Schweißverfahren -Online-Prozeßüberwachung. DVS 170 (1995) S.45-51.
[4] Steen et al.: Arc-Augmented Laser Welding. 4th Int. Conf. on Advances in Welding Processes, Paper No.17 (1978) pp.257-265.
[5] Steen: Laser Material Processing, Springer Verlag, 1996.
[6] Schweißen mit Festkörperlasern, Laser in der Materialbearbeitung, Band 2, VDI- Verlag, 1995.
[7] Beyer, E.: Schweißen mit Laser: Grundlagen, Springer-Verlag, 1997.
[8] Faißt, F.: Weick, J.M.; Fitz, R.; Kern, M.: Anwendungen der Twinfokus-Technik. Stuttgarter

Lasertage 19 99. S.50-52.
[9] Helten, S.: Qualifizierung und Implementierung des lichbogenunterstützten Lasersrahlschweißverfahrens in den Fertigungsprozeß im Aluminiumkarosserieleichtbau. Diplomarbeit Audi, RWTH (ISF) Aachen 1999.
[10] Haldenwanger, H.; Schmid, G.; Korte, M.; Bayerlein, H.: Laserstrahlhartlöten für Karosseriesichtteile in Class-A-Oberflächenqualität. DVS 204, S.191-196.