

ПРЯМАЯ СВАРКА АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СПЛАВОВ ДИОДНЫМИ ЛАЗЕРАМИ

При сварке металлов с помощью лазеров важно то, на какую глубину проваривается шов, и то, какая ширина шва при этом получается. Известно, что глубина шва растет с ростом диаметра пучка. Широкий пучок имеет мощный диодный лазер (HPDL). В данной статье [1] рассмотрены возможности оптимизации условий сварки аэрокосмических материалов, таких как Al (серии 2000) и Ti, диодными лазерами. Для понимания полученных результатов проводилось термическое моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Хотя режим сварки с глубоким проплавлением (keyhole welding) мощными лазерами предпочтителен для сварных соединений, проблемы стабильности проплавления стыка остаются, что может снизить качество сварки в таких материалах, как алюминиевые сплавы. Альтернативный подход – проводить сварку в режиме поверхностного плавления (conduction limited). Для мощных диодных лазеров это напоминает ситуацию, когда пучок плохого качества ограничивает возможные размеры пятна. В этой работе описаны результаты исследований пригодности таких диодных лазеров для сварки широко используемых аэрокосмических материалов – алюминия (Al серии 2000) и титана (Ti).

Исследования включали сварку Al-сплавов серии 2000 встык с использованием и без использования присадочной проволоки. Была получена сварка листов толщиной 1,6 и 3,2 мм высокого качества без пустот и трещин. Также высокого качества была сварка встык и с перекрытием листов титана типа Ti-6Al-4V толщиной 1–2 мм. Эти исследования показали, что для получения большой глубины сварки в толстых материалах нужны пучки большого размера. Уменьшение размера пучка (то есть использование более жесткой фокусировки) приводит к уменьшению глубины проплавления.

Для интерпретации результатов экспериментов использовалось термическое моделирование, которое позволило также оптимизировать процесс сварки в режиме поверхностного плавления и получить глубину проплавления порядка 6,35 мм для сплавов типа 2024 при мощности лазера 3 кВт.

Практическая реализация техники сварки в режиме поверхностного плавления требует эффективного поглощения лазерного излучения. При использовании алюминия реализация такой техники сварки в оптимизированном режиме представляет основную проблему. В статье описано использование предварительной подготовки поверхности для создания эффективного взаимодействия излучения с веществом, а также комбинированный TIG-лазер-процесс (дуговая сварка с лазерной сваркой), который позволяет получить высокоэффективное использование всей доступной мощности лазера.

Уровни мощности, доступные для диодных лазеров высокой мощности (HPDL), постоянно растут. К сожалению, это не сопровождается улучшением качества пучка. В результате диодные лазеры могут только фокусироваться до размеров миллиметрового (или больше) пятна. На практике эти большие размеры пятна означают, что HPDL работает при сварке в режиме поверхностного плавления. Дальнейшее повышение лазерной выходной мощности и улучшение качества пучка

могут обеспечить в режиме глубокого проплавления качество сварки, сравнимое с CO₂- и YAG-лазерами. Сварка в режиме поверхностного плавления дает ряд преимуществ в некоторых конкретных приложениях. В таблице ниже рассмотрены преимущества и недостатки обоих режимов сварки.

Скорость сварки обычно не такой важный параметр в аэрокосмических приложениях, поэтому используемые решения больше направлены на преодоление проблемы возникающих искажений [2]. В этом смысле режим сварки с поверхностным плавлением – предмет особого интереса для аэрокосмических приложений.

Ранее было показано, что для получения значительной глубины проплавления при использовании сварки в режиме поверхностного плавления требуется низкая скорость и большой диаметр пучка [3]. Для примера на рис.1 показаны глубины проплавления (взяты из работы [3]), полученные для алюминия типа 8090 толщиной 1,6 мм в зависимости от диаметра пучка CO₂-лазера мощностью 1,3 кВт (свариваемая поверхность была специально обработана для получения хорошего поглощения тепла).

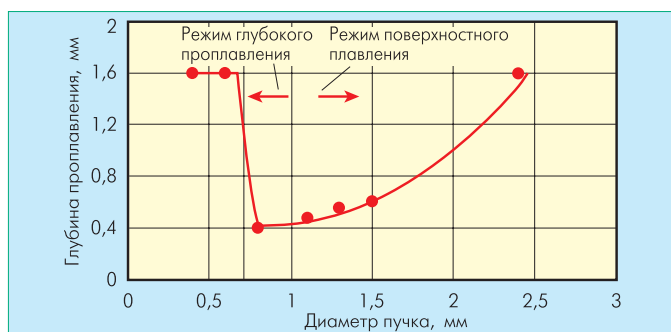


Рис. 1 Глубина проплавления, полученная с помощью 1,3-кВт CO₂-лазера для алюминиевого образца 8090 толщиной 1,6 мм, в зависимости от диаметра пучка [2]

ПОДГОТОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА И ПРОЦЕДУРА

Для исследований использовались два лазера. Одним был лазер типа DILAS 015, обеспечивающий максимальную мощность 1,5 кВт на длине волны 808 нм. Он использовался вместе с линзой, фокусное расстояние которой 50 мм позволяло обеспечить минимально возможное пятно размером 3×1,5 мм. Другим – экспериментальный DILAS, обеспечивающий среднюю мощность 3 кВт на двух длинах волн 808 и 920 нм. Минимальный диаметр пятна этого лазера был меньше, чем у первого лазера.

Сравнение целевой сварки и сварки плавлением

Процесс	Преимущества	Недостатки
Сварка с глубоким проплавлением	Малый расход тепла на единицу длины, малый наплавленный валик – низкие искажения. Глубокое проплавление – большое отношение глубины к ширине. Очень высокая скорость сварки.	Недостаточно стабилен – прерывается, образуя пустоты и капли. Требует тщательной подгонки устройств. Требует лазеров с определенным профилем луча.
Сварка с поверхностным плавлением	Может использовать лазеры с очень плохим профилем пучка. Процесс очень стабильный. Большой пучок может уменьшить требования к подгонке устройств.	Большой расход тепла на единицу длины, большой наплавленный валик – большие искажения. Относительно низкая скорость сварки.

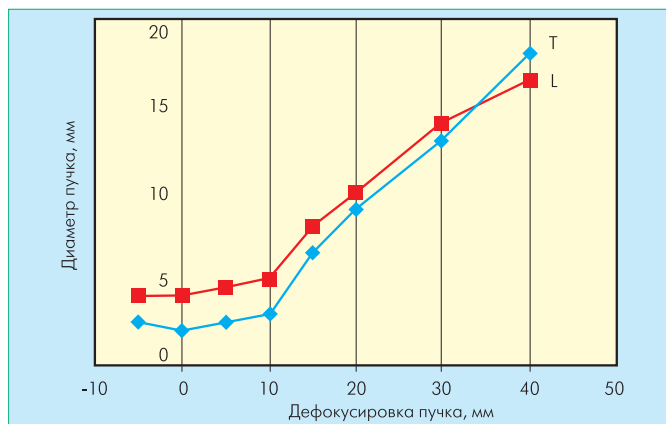


Рис. 2 Кривые, показывающие изменение диаметра пучка при дефокусировке DILAS 015 HPDL при мощности 1,5 кВт. Заметим, что диаметры пучка измерялись по прожигаемым рисункам Т и L по отношению к двум осям профиля пучка

Первые же эксперименты показали, что, несмотря на короткую длину волны (808 нм), были проблемы с взаимодействием лазерного пучка и алюминиевого сплава, который был очищен с целью получения гладкой поверхности. Для тестирования возможности глубокого проплавления и проведения экспериментальной сварки алюминия было использовано тонкое графитовое покрытие, наносимое путем распыления, для улучшения теплового контакта. Для титана, например, контактных проблем нет. Однако требуется использовать адекватную защиту верха и низа свариваемого изделия инертным газом, чтобы предотвратить окисление отвердевающего свариваемого металла.

Были использованы алюминиевые сплавы типа AA2024 T351 и AA2014 T4, пока изучались титановые сплавы CP и 6Al-4V. Для получения пучка больших диаметров, требуемого для конкретных условий сварки, варьировалось расстояние между фокусирующей лазерное излучение линзой и свариваемым образцом. На рис.2 показано изменение размера пучка с расстоянием для лазера мощностью 1,5 кВт. При большом расстоянии дефокусировки (30–40 мм от фокальной плоскости) пучок приобретает полосатую структуру, отображающую положение отдельных диодных линеек в матрице.

Алюминиевые капли на поверхности сварных швов: экспериментальные результаты

Параметрами основного процесса, которые варьировались, были положение фокуса (а следовательно, размер фокусируемого пятна) и скорость перемещения. Мощность лазера

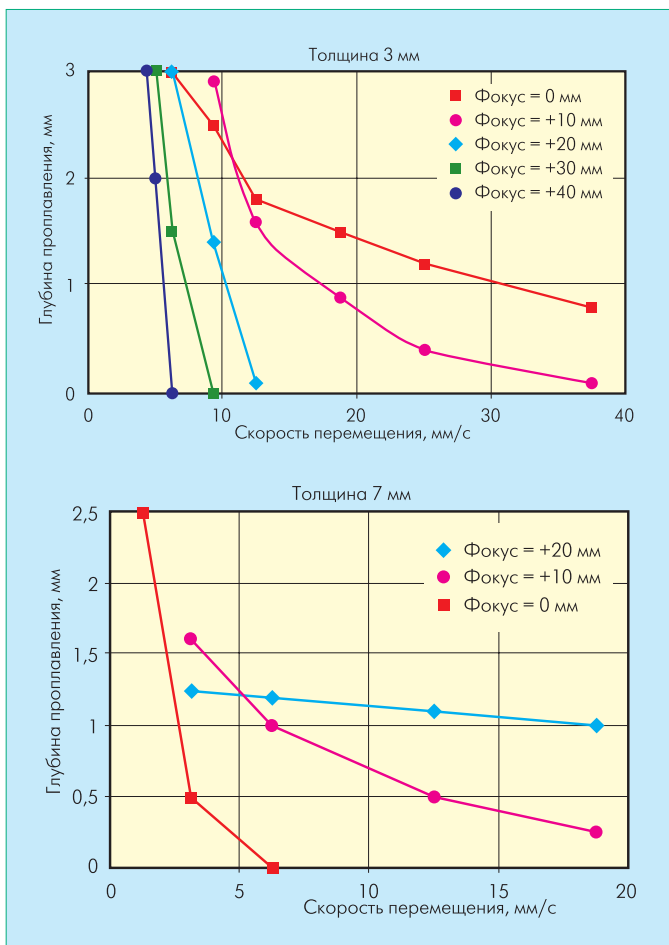


Рис.3 Изменение глубины проплавления от скорости перемещения при различном положении фокуса для образца 2024

была установлена максимальной – 1,5 кВт (измеренная мощность составила 1,34 кВт).

На рис.3 показаны результаты сварки образцов типа 2024 толщиной 3 и 7 мм. Заметим, что образец толщиной 3 мм полностью проплавлялся практически при всех размерах пучка. В обоих экспериментах некоторые кривые пересекались. Например, для 3-мм материала полное проплавление может быть достигнуто расфокусировкой и при более высоких скоростях перемещения, чем при сфокусированном пучке. Для 7-мм образца при использовании расфокусировки достигается почти вдвое большая глубина проплавления, чем при наличии фокусировки пучка.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЛУБИНЫ ПРОПЛАВЛЕНИЯ

Для того, чтобы понять поведение процессов на рис.3, применялось термическое моделирование. В его основе лежит модель, использующая численное решение уравнения теплопроводности, зависящее от времени и полученное для конечного объема [4]. Для моделирования сварки в режиме поверхностного плавления в модель были введены важные граничные условия – температура поверхности ограничивалась температурой испарения рассматриваемого материала. Для этой работы вычисления проводились для устойчивого

режима. Максимальная глубина проплавления, предсказанная моделью, сравнивалась с экспериментальными данными. На рис.4 показаны теоретически рассчитанные кривые и экспериментальные данные для образца типа 2024 толщиной 1,6 и 7 мм для разных положений фокуса. Теоретические и экспериментальные данные хорошо согласуются и хорошо воспроизводится основное поведение процесса.

Для изучения влияния лазерных параметров на сварку более удобно построить зависимость глубины проплавления от эффективного диаметра пучка, который используется в данной модели. Эта зависимость показана на рис.5 для образца типа 2014 толщиной 3 мм. Видно, что существует рассогласование между теоретическими и экспериментальными данными по глубине проплавления при медленных скоростях перемещения. Это происходит благодаря нагреванию всего материала образца и может быть скомпенсировано в данной модели путем выбора более высокой эффективной мощности поглощения или более высокой температуры подложки для таких низких скоростей. Однако наиболее важная особенность, отраженная на рис.5, состоит в том, что существует оптимальный диаметр пучка, позволяющий получить максимальную глубину проплавления. Этот оптимальный диаметр пучка растет с повышением мощности лазера.

Наличие оптимального диаметра пучка для кривых на рис.5 указывает на ограничительный механизм сварки, использующей режим поверхностного плавления при ограниченной

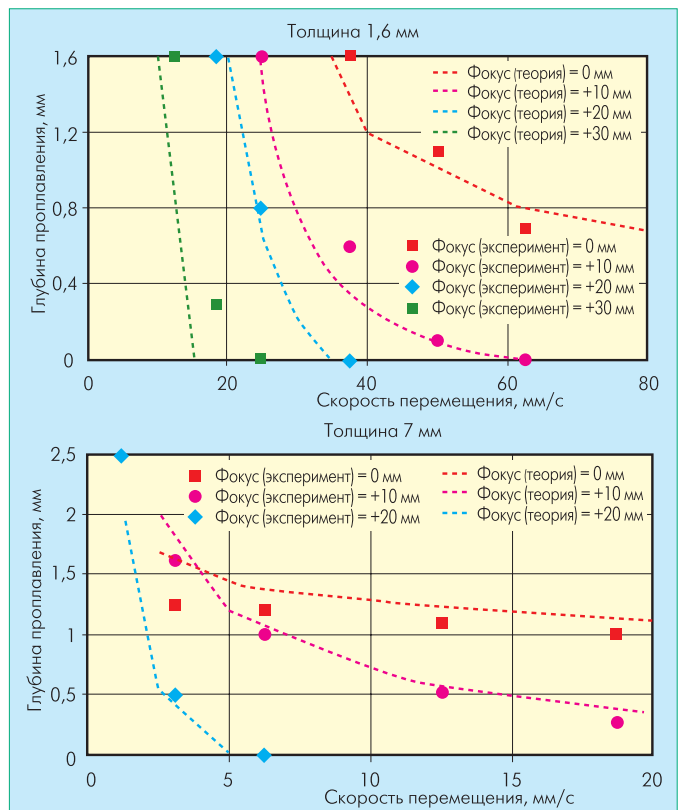


Рис.4 Сравнение теоретических и экспериментальных данных зависимости глубины проплавления от скорости перемещения для образца 2024 толщиной 1,6 и 7 мм при различном положении фокуса

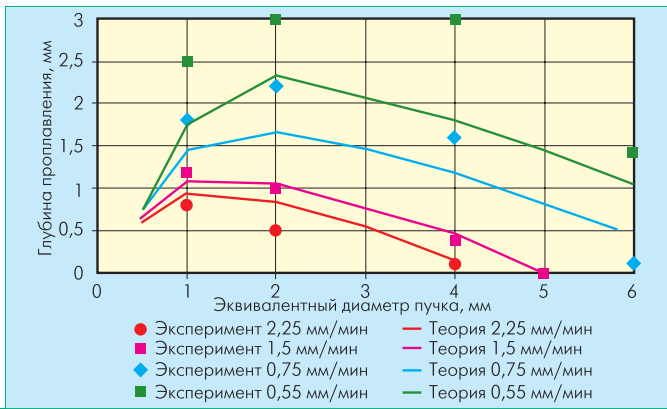


Рис.5 Сравнение теоретических и экспериментальных данных зависимости глубины проплавления от диаметра пучка для образца 2014 толщиной 3 мм при различной скорости перемещения

теплопроводности. Для больших диаметров пучка модель предсказывает некоторые проплавления с температурами сварки, лишь немного превышающими температуру плавления алюминия (660°C).

При уменьшении диаметра пучка его плотность мощности возрастает, и температура сварочной ванны и глубина проплавления увеличиваются. При оптимальном размере пучка температура сварочной ванны достигает температуры испарения материала (2740K для образцов типа 2014/2024). Дальнейшее снижение диаметра пучка приводит к перегреву материала и к потере энергии на его испарение с поверхности сварочной ванны, а не к большему проплавлению, поэтому глубина проплавления начинает падать. Если скорость перемещения уменьшается при заданном диаметре пучка, то температура будет расти и требуется больший диаметр пучка для поддержания температуры сварочной ванны на уровне температуры испарения или несколько ниже ее. Это объясняет то, что оптимальный диаметр пучка имеет тенденцию к росту с уменьшением скорости перемещения, что видно из рис.5.

Этот эффект может быть легко предсказан, используя аналитическое решение уравнения теплопроводности. Для полубесконечной твердой поверхности температура T_s , как функция диаметра пучка, определяется уравнением [4]:

$$T_s = I_0 R / kT, \quad (1)$$

где I_0 – поглощенная падающая интенсивность, R – радиус пучка, а kT – теплопроводность. Глубина проплавления Z_m определяется при этом уравнением [5]:

$$Z_m = R/2 (T_s/T_m - T_m/T_s), \quad (2)$$

где T_m – температура плавления. Для сварки в режиме поверхностного плавления температура поверхности не может быть выше температуры испарения. Следовательно, для радиусов пучка, при которых достигается температура испарения T_v , $T_s = T_v$. В этом случае глубина проплавления не зависит от интенсивности падающего луча, но линейно зависит от радиуса пучка. Жесткая фокусировка при этом ведет к потере глубины проплавления. Следует заметить, что глубина для заданного радиуса пучка зависит от отношения

T_v/T_m . Поэтому алюминий (у которого $T_v/T_m=2,94$) больше подходит для сварки в режиме поверхностного плавления, чем титан или сталь (у которых T_v/T_m равно 1,84 и 1,67, соответственно).

Когда температура поверхности падает ниже температуры испарения, то, подставляя выражение (1) в (2), получаем выражение для Z_m :

$$Z_m = I_0 R^2 / (2kT \cdot T_m) - kT \cdot T_m / 2I_0. \quad (3)$$

В этом случае глубина проплавления уменьшается пропорционально квадрату радиуса пучка. На рис.6 приведенные выражения (1), (2) и (3) представлены как функции радиуса пучка.

Оптимальный (с точки зрения максимизации глубины проплавления) радиус пучка получается тогда, когда температура поверхности достигает температуры испарения. На практике, при уменьшении размера пучка ниже этого значения глубина проплавления вновь начинает расти, начиная с некоторой точки, как только наступает режим глубокого проплавления (см. рис.1).

Моделирование показывает, что для 3-кВт лазера полное проплавление должно наступить при скорости перемещения 0,2 м/мин, если материал поглощает, по крайней мере, 1,6 кВт лазерной мощности. На рис.7 показано поперечное сечение, полученное при сварке образца типа 2024 толщиной 6,35 мм 3-кВт лазером при скорости перемещения 0,2 м/мин. Так как при сварке не было подкладки, то проваливание сварочной ванны при этих скоростях сварки очевидно.

СВАРКА АЛЮМИНИЯ ВСТЫК

При сварке встык используемые начальные параметры были те же, что и разработанные для исследования глубины проплавления. Однако, учитывая, что для получения сварки высокого качества требуется присадочная проволока, скорость сварки была несколько уменьшена. Эта проволока (типа 5356) подавалась в зону сварки под углом 30° к поверхности образца со скоростью 30 мм/с. Скорость перемещения первоначально была установлена 0,6 м/мин, но это приводило к неполному

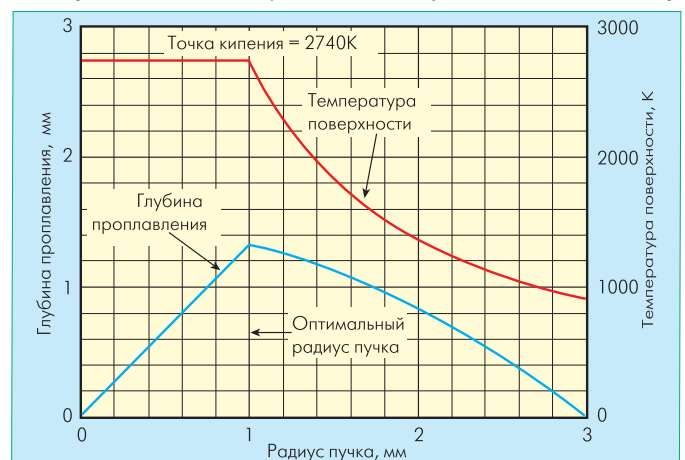


Рис.6 Расчетные зависимости температуры поверхности и глубины проплавления от радиуса пучка для алюминия

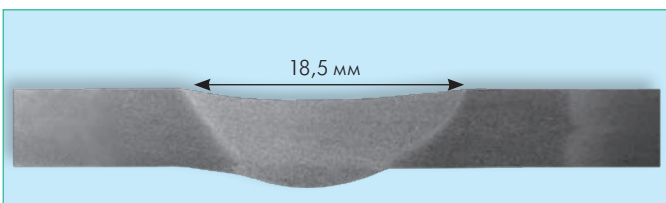


Рис.7 Поперечное сечение сварки образца 2024 толщиной 6,35 мм диодным лазером мощностью 3 кВт

смешиванию материала проволоки, как это видно из картины, похожей на водоворот, на верхней фотографии рис.8. Эта ситуация была улучшена путем снижения скорости до 0,4 м/мин.

СВАРКА ТИТАНА

Аналогичные исследования были проведены при сварке титановых сплавов. Они показали то же поведение и закономерности, при которых большие глубины проплавления получаются при больших размерах пучка и относительно малой скорости перемещения. На рис.9 показана матрица параметров для сварки образца титана Ti6Al4V толщиной 6 мм с помощью 3-кВт лазера HPDL, а на рис.10 – сваренные внахлест и стык образцы титана толщиной 6,34 мм.

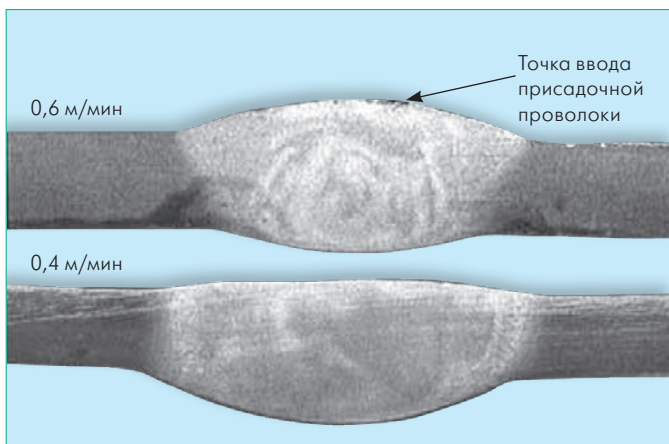


Рис.8 Поперечное сечение сварки стыком для образца 2014 толщиной 1,6 мм с использованием присадочной проволоки типа 5356 при скорости перемещения 0,6 и 0,4 м/мин

ГИБРИДНАЯ (TIG-ЛАЗЕР) СВАРКА В РЕЖИМЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

Одной из основных проблем, ограничивающих применение сварки в режиме поверхностного плавления для алюминия, является низкая поглощающая способность некоторых сплавов после приготовления к сварке (даже при длине волны 808 нм). Возможное решение в этом случае – использовать гибридный процесс сварки, когда для инициализации процесса применяется дуговая сварка (TIG), а затем сварка продолжается с использованием лазера. Те же условия необходимы для того, чтобы избежать любых потерь, вызванных испарением металла. Проводилось изучение влияния размера пучка и его положение относительно факела дуговой горелки. На рис.11 показана схема экспериментальной установки лазера и дуговой горелки.

Дуга TIG-сварки работает при следующих условиях: ток – 100 А, глубина проплавления 1,3 мм в сплаве типа 8090AlLi толщиной 3 мм. Влияние размера лазерного пучка и его положения на глубину проплавления представлено на рис.12.

Эксперименты показывают, что добавлением 100 ваттного лазера (работающего в непрерывном режиме) можно получить полное проплавление материала. Нужно, однако, использовать достаточно большой размер пучка и позиционировать его пятно, смещенное от центра дуги TIG. При небольшом размере пучка его термическая эффективность очень низкая, что можно видеть из рис.12.

Заметим, что того же эффекта увеличения проплавления можно достичь путем увеличения на 10 А тока TIG-сварки, что соответствует увеличению мощности дуговой сварки на 100 Вт. Это демонстрирует, насколько эффективным может быть процесс сварки в режиме поверхностного плавления

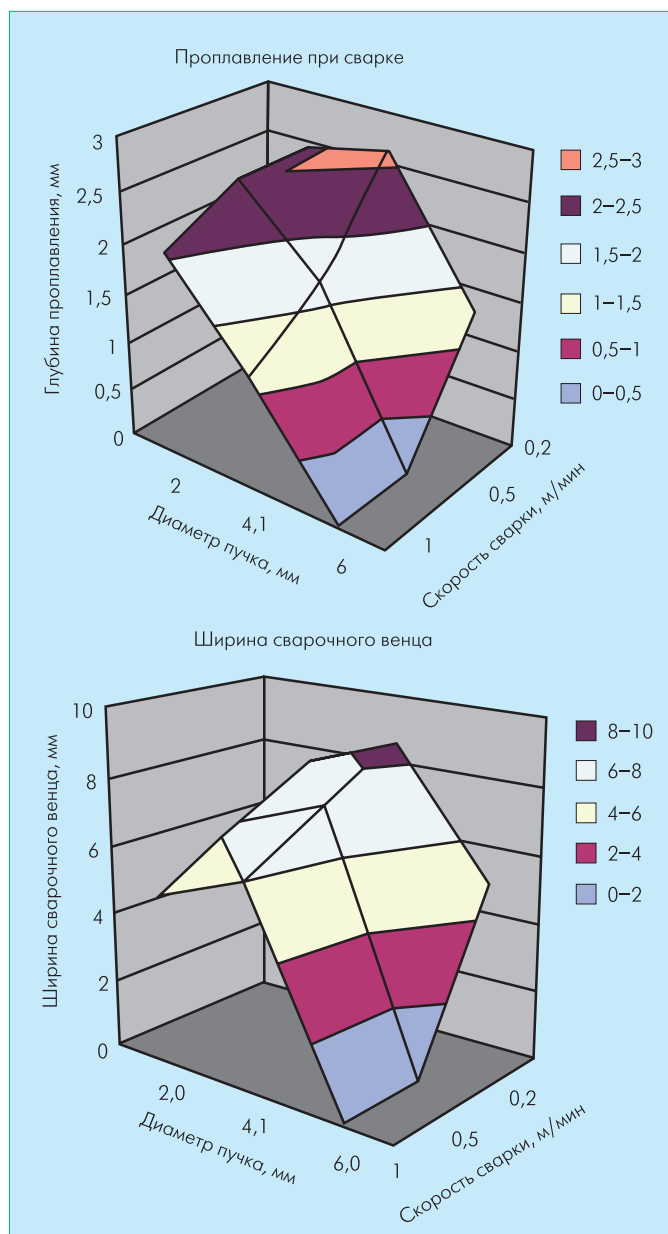


Рис.9 Матрица параметров для сварки сплава Ti6Al4V с помощью диодного лазера мощностью 3 кВт

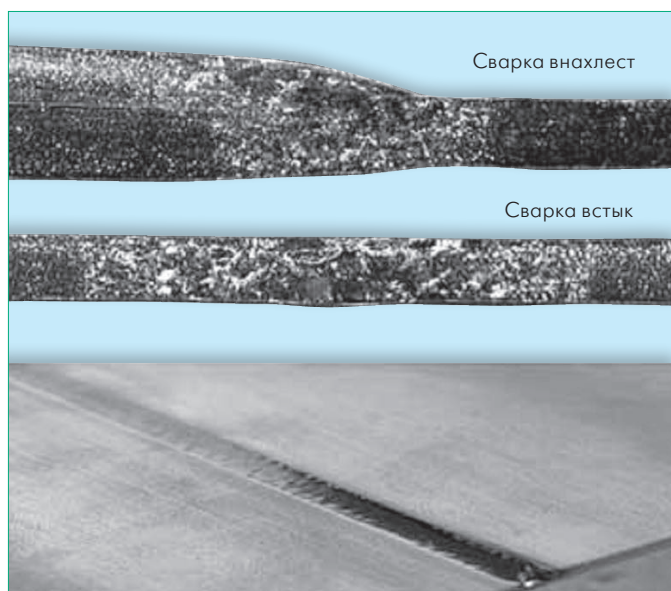


Рис.10 Сварка титана внахлест и встык с помощью диодного лазера мощностью 1,5 кВт при скорости перемещения 0,75 м/мин

при оптимальных условиях. Это также показывает, как, используя нагревание металла дугой TIG, можно обеспечить хорошее взаимодействие между лазерным излучением и алюминием.

ВЫВОДЫ

Было показано, что лазерная сварка в режиме поверхностного плавления может обеспечить высокое качество для ряда аэрокосмических материалов и является привлекательной альтернативой другим процессам сварки. Она дает преимущества в легкости осуществления, хороших механических свойствах сварного соединения и высокой стабильности процесса сварки. Необходимость иметь большой размер пучка означает, что HPDL-лазеры являются оптимальным источником излучения для сварки в режиме поверхностного плавления. В самом деле, размер пучка может быть несколько миллиметров, а это значит, что используемые промышленные оптические системы можно значительно упростить, снижая стоимость и облегчая практическое использование этих устройств. Благодаря оптимизации процесса сварки мы получили возможность сваривать алюминий толщиной 6,35 мм с помощью 3-кВт лазеров. Было показано, что лазерная сварка в режиме

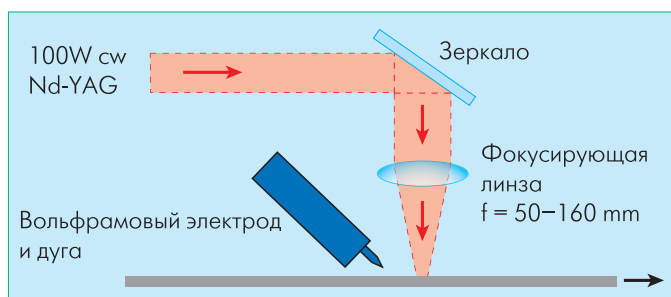


Рис.11 Схема экспериментальной установки для исследования гибридной (TIG-лазер) сварки в режиме плавления

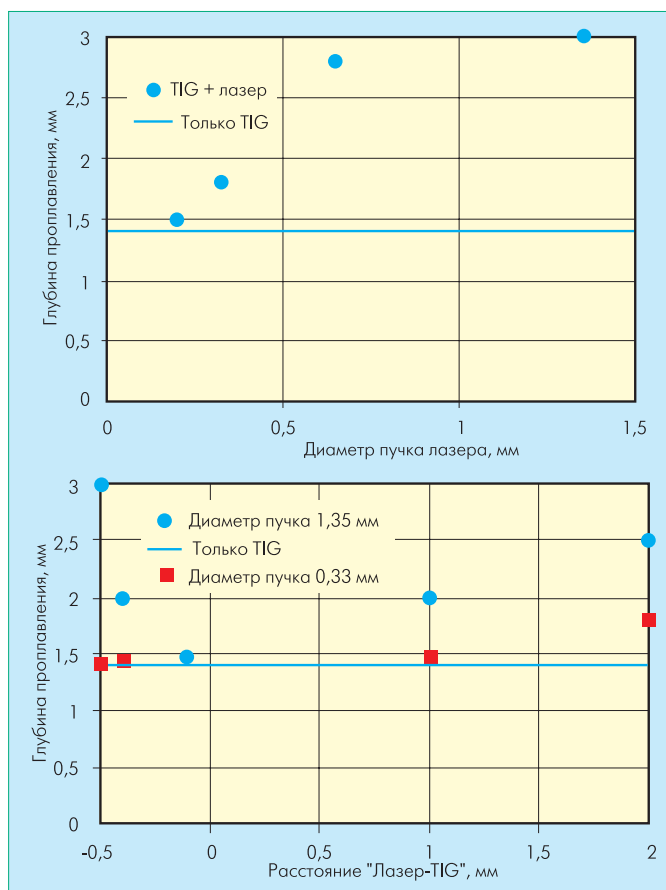


Рис.12 Влияние размера пучка 100-Вт (CW) лазера и его положения, добавляемого к дуговой TIG-сварке сплава типа 8090 AlLi толщиной 3 мм

поверхностного плавления очень удобна для осуществления гибридного процесса сварки, приводящего практически к полному использованию доступной энергии лазера. Главная проблема, которую предстоит решить, – искажения или остаточное напряженное состояние, вызванное низкой скоростью сварки. Его изучение должно проводиться с помощью методов анализа термических напряженных состояний [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. S.W.Williams, G.Scott, N.Calder. Control of Laser and Friction Stir Weld Distortion by Thermal Tensioning. – WLT Proceedings of Lasers in Manufacturing, 2001.
2. DUWALP Final Report. BRITE EURAM Project BE-4370, 1993.
3. NAWM Final Report. BRITE EURAM project no. BE95–2044, 1999.
4. A.M.Prokhorov et al. Laser Heating of Metals, Adam Hilger, 48, 75, 1990.

Перевод с англ. с согласия журнала LaserOpto

ОБ АВТОРЕ

Стюарт Вильямс (Stewart Williams) – последние годы работал в компании BAE Systems и занимался исследованием применения лазеров в аэрокосмической промышленности: изучением процессов сварки, резки, поверхностной обработки и сверления аэрокосмических материалов.