

## ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОМОЩНЫХ ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ В ПРОЦЕССАХ СВАРКИ\*

С. ТОМИ, Г. КОН, Ф. ФОЛЛЕРТСЕН (Бременский ин-т прикладных лучевых технологий, Германия)

Новейшие разработки в области лазерной физики позволили выпустить высокомогущные волоконные лазеры мощностью пучка свыше 10 кВт и отличного качества. Если прибавить к этим свойствам высокий энергетический КПД, большой расчетный срок службы и компактные размеры, то их можно рассматривать как альтернативу современным Nd:YAG-лазерам как с ламповой, так и с диодной накачкой, а также CO<sub>2</sub>-лазерам. BIAS провел испытания двух высокомогущных волоконных лазерных установок (7 и 10 кВт) для оценки их потенциальных возможностей применительно к сварке стальных и алюминиевых листов. Показано, как преодолеть ограничения по скорости сварки и толщине свариваемых листов, которые ранее казались непреодолимыми при сварке твердотельным лазером.

*Ключевые слова: лазерная сварка, гибридная сварка, сталь, алюминий, листовой материал, скорость сварки, толщина, перспективы*

Новые разработки в области лазерной физики позволили создать такие типы лазерных источников, как дисковый и высокомогущный волоконный лазер. В последние годы стремительное развитие получили волоконные лазеры, в частности, удалось повысить их мощность (благодаря модульной конструкции) от нескольких сотен ватт до 10 кВт и более [1]. В настоящее время серийно выпускаются лазеры мощностью до 10 кВт, что достаточно для большинства областей применения, где требуется обработка материалов лазером. Однако для лазерного или гибридного лазерно-дугового процессов сварки плавящимся электродом в защитном газе данные системы все еще подлежат аттестации [2].

Волоконный лазер так же, как и Nd:YAG-лазер, относится к большой группе твердотельных лазеров, но его отличие заключается в том, что его активная среда состоит, как правило, из стекловолокна, легированного иттербием, а накачка осуществляется излучением светодиодов на концах и через плакированную поверхность оболочки — брэгговскую решетку. Длина волны составляет  $1070 \pm 5$  нм. Такой тип лазера имеет определенные преимущества. Его КПД на 25 % превышает КПД, который обеспечивается современными Nd:YAG-лазерами с накачкой лампой и излучением светодиодов. Благодаря улучшенному качеству пучка (2003: ППП (произведение параметров пучка) — 17,5 мм·мрад для системы мощностью 10 и 8,5 — 5 кВт; 2004: 12,5 мм·мрад для системы мощностью 10 и 5 — 5 кВт; источник: IPG) по срав-

нению с системами с ламповой накачкой (произведение параметров пучка обычно составляет около 25 мм·мрад при мощности 4 кВт) здесь можно использовать волокно меньшего диаметра, что позволит увеличить плотность мощности в фокусном пятне. Кроме того, лучевой источник очень компактен, если учесть его мощность (благодаря прочности конструкции, низкому потреблению энергии, а также длине волокна до 200 м) и подходит для гибкого и потенциально мобильного использования, особенно в тех областях, где применение лазерных технологий ранее не было возможным. Принимая во внимание эксплуатационные расходы, срок службы светодиодов накачки имеет первостепенное значение. Предполагается, что он будет значительно увеличен по сравнению с другими лучевыми источниками с накачкой светодиодами.

**Свойства лучевого источника.** В таблице приведено сравнение некоторых основных параметров высокомогущного волоконного лазера YLR 7000 и YLR 10000 с Nd:YAG-лазерами с накачкой светодиодами типа Trumpf HL 4006D, Rofin DY044 и CO<sub>2</sub>-лазерами типа Trumpf TLF 6000 и TLF 15000 при соответствующих максимальных значениях мощности пучка. Все измерения выполнены в Бременском институте прикладных лучевых технологий (BIAS).

Волоконный лазер YLR 10000 (рис. 1) значительно усовершенствован по сравнению с YLR 7000 как по выходной мощности, так и по качеству пучка. Он обеспечивает мощность 10 кВт, которая попадает на изделие через волокно толщиной 200 мкм и фокусируется с помощью комплекта оптики 125 и 200 мм для коллимации и фокусировки соответственно в диаметр пучка 360 мкм. Наименьшее значение произведения параметров пучка составляет 11,6 мм·мрад. Благодаря компактной конструкции этот лазер имеет очень ма-

\* По материалам Второй международной конференции «Laser Technologies in Welding and Materials Processing», 23–27 мая 2005 г., пос. Кацивели, Крым, Украина.



Сравнение основных параметров пучка разных лазерных систем

Параметры пучка	YLR 7000	YLR 10000	HL 4006D	DY 044	TLF 6000	TLF 15000
Максимальная мощность пучка на изделие, кВт	6,9	10	4,0	4,2	5,5	13,6
Диаметр сердцевины волокна, мкм	300	200	600	400	—	—
Типичное фокусное расстояние, мм	200	200	150	200	350	300
Диаметр пучка (фокус), мкм	510	360	430	434	262	512
Произведение параметров пучка, мм-мрад	18,5	11,6	23,9	15,7	6,7	15,3



Рис. 1. Высокомощный волоконный лазер IPG YLR 10000

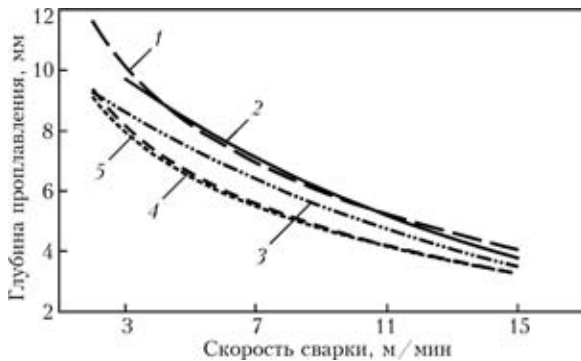


Рис. 2. Кривые проплавления для разных видов материалов (YLR 10000,  $z = 0$  мм;  $P_L = 10$  кВт; Precitec YW50,  $f = 200$  мм, коаксиальная подача защитного газа, аргон — 20 л/мин): 1 — AlSi1MgMn; 2 — AlMg4.5Mn; 3 — X5CrNi 18 10; 4 — S235JR; 5 — X70

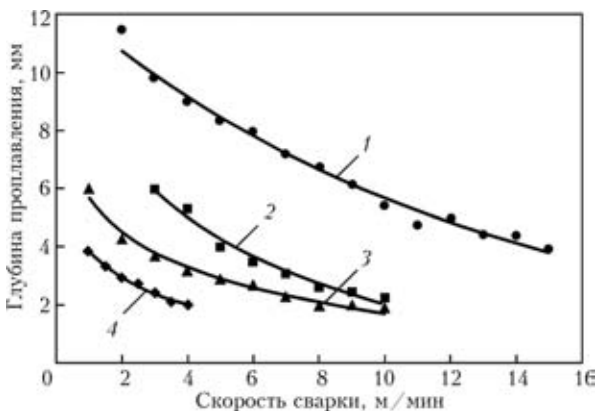


Рис. 3. Глубина проплавления при использовании разных лазерных установок на алюминии 6XXX ( $P_L = \max$ ,  $z = 0$  мм,  $f = 200$  мм): 1 — YLR 10000 мощностью 10 кВт; 2 — YLR7000 мощностью 6,9; 3, 4 — соответственно DY044 и YL4006D мощностью 4 кВт

ленькое фокусное пятно и КПД 25 % (источник: IPG).

Из таблицы видно, что свойства пучка высокомощного волоконного лазера сопоставимы или даже лучше, чем свойства Nd-YAG-лазера с накачкой светодиодами. Произведение параметров пучка обоих волоконных лазеров выше, чем у CO<sub>2</sub>-лазера с максимальной мощностью пучка 6 кВт. Оба волоконных лазера опережают YAG-лазерные системы как по мощности, так и по качеству пучка.

**Особенности сварки стали и алюминия.** Чтобы оценить потенциальные возможности обеих волоконных лазерных систем для разных марок сталей (низкоуглеродистая сталь S235JR, трубная сталь X70, аустенитная нержавеющая сталь 1.4404) и алюминиевых материалов (АА 5083, АА6056, АА6082), выполнены валиковые пробы. В качестве защитного газа для всех швов применяли аргон.

Из рис. 2 видно, что при заданной скорости сварки обе марки низкоуглеродистой стали (кривые 4, 5) имеют одинаковую глубину проплавления. Ориентировочно проплавление на 8, 6 и 4 мм было достигнуто при скорости 3, 6 и 11 м/мин. Для нержавеющей стали достигнутая скорость сварки значительно выше (до 50 %) по сравнению с марками низкоуглеродистой стали. Глубина проплавления двух алюминиевых материалов значительно больше, особенно по сравнению с марками низкоуглеродистой стали. Для алюминия глубина проплавления 8, 6 и 4 мм была достигнута при более высоких скоростях — соответственно при 5, 9 и 14 м/мин.

Волоконный лазер мощностью 10 кВт по сравнению с другими твердотельными лазерами (таблица) имеет существенное преимущество по глубине проплавления, особенно на алюминии (рис. 3), что может быть связано с уникальным сочетанием мощности лазера и качества пучка при длине волны, близкой к инфракрасному излучению. На рис. 4 представлен макрошлиф валиковой пробы на пластине из алюминия АА6082, выполненный лазером IPG YLR 10000.

Проплавление составило 10 мм при скорости сварки 3 м/мин, что в 2,5 раза превысило проплавление, которое можно достичь при использовании современных Nd:YAG-лазеров мощностью

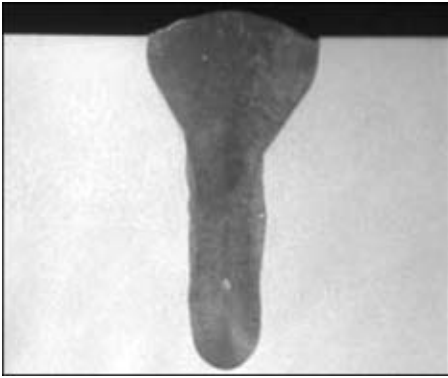


Рис. 4. Макрошлиф валиковой пробы на сплаве AA6082 (толщина 12 мм,  $P_{\text{л}} = 10$  кВт,  $v_{\text{с}} = 3$  м/мин)

4 кВт с накачкой светодиодами. Полученный шов очень узкий, с параллельными линиями сплавления и вершиной в форме шляпки гвоздя. Можно также отметить микроструктурную целостность шва, в то время как степень пористости относительно низкая, процесс сварки плавный и стабильный (несмотря на использование однофокусного пучка с минимальным диаметром 360 мкм и относительно небольшим сужением).

Установлено также, что в случае с алюминием при расположении фокуса  $f$  относительно поверхности образца на расстоянии  $z = -5 \dots +1$  мм влияние его на глубину проплавления довольно слабое. В процессе этих испытаний, которые проведены на стали и алюминии с перпендикулярным углом введения пучка, волоконный лазер оказался нечувствительным к проблемам обратного отражения.

**Применение волоконного лазера при сварке стали и алюминия.** На рис. 5 показан пример стыковой сварки стали X70. Полное проплавление достигнуто на материале толщиной 11,2 мм при скорости сварки 2,2 м/мин и мощности лазера 10 кВт. Сварной шов узкий, имеется небольшое усиление со стороны вершины и корня шва, трещины отсутствуют. В настоящее время BIAS разрабатывает процессы сварки во всех пространственных положениях для данного типа материала при разной толщине монтажных труб.

Волоконный лазер IPG YLR 10000 также применялся в гибридных процессах при сварке алюминиевых прессованных профилей для железнодорожной промышленности. На рис. 6 представлены результаты, полученные на материале EN-AW 6008 (толщина стенок соответственно 4 и 8 мм) с присадочной проволокой AlSi5. Скорость сварки во всех случаях составляла 6 м/мин, мощ-

The latest development in the field of laser physics enabled manufacturing high-power fiber-optic lasers with beam power above 10 kW and of excellent quality. If we add to these properties the high power efficiency, high design life and compact dimensions, they may be regarded as an alternative to the modern Nd:YAG lasers both with lamp and diode pumping, as well as CO<sub>2</sub> lasers. BIAS has tested two high-power laser systems (7 and 20 kW) to evaluate their potential capabilities for welding of steel and aluminium sheet material. It is shown how process limitations in terms of welding speed and sheet thickness, can be overcome. These limitations seemed insurmountable earlier in solid-state laser welding.

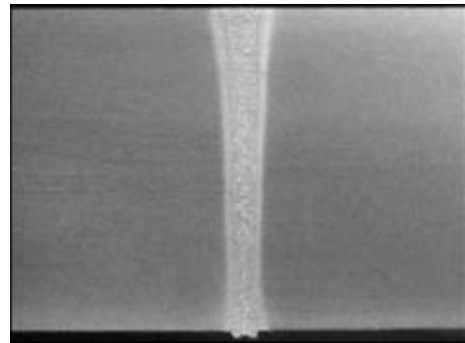


Рис. 5. Макрошлиф стыкового соединения на стали X70 (толщина 11,2 мм;  $P_{\text{л}} = 10$  кВт,  $v_{\text{с}} = 2,2$  м/мин)

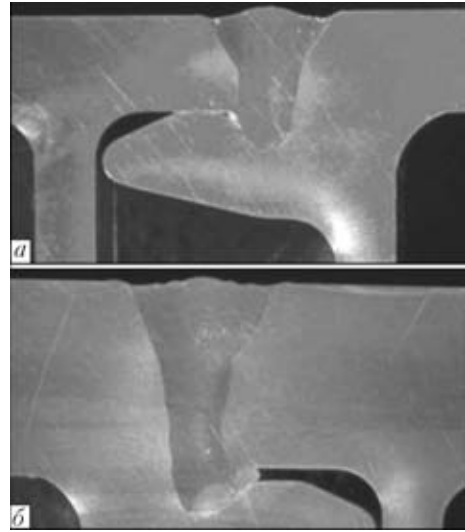


Рис. 6. Макрошлифы соединений толщиной 4 (а) и 8 (б) мм, полученные гибридной лазерно-дуговой сваркой плавящимся электродом (EN-AW 6008)

ность лазера до 10,5 кВт, толщина материала 8 мм. Процесс отличается стабильностью, шов удовлетворительным качеством. Дальнейшая оптимизация может привести к увеличению скорости сварки, особенно при толщине стенок около 4 мм.

Поскольку результаты оказались перспективными, были предусмотрены дальнейшие испытания по предварительной аттестации гибридного лазерно-дугового процесса сварки железнодорожных конструкций плавящимся электродом в защитном газе волоконным лазером.

1. *Grupp M., Sepold G.* Laser system technology // Laser Physics and laser applications: Vol. 1, Pt. C. — Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2004.
2. *Thomy C., Grupp M., Seefeld T.* Schweißen mit dem Hochleistungs-Faserlaser // Strahltechnik. — Vortraege der 6. Konferenz «Strahltechnik», Halle, Deutschland, 26–28, April 2004. — P. 39–45.