



РАЗВИТИЕ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В ИЭС им. Е. О. ПАТОНА (Обзор)

В. Ю. ХАСКИН

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Работы, связанные с созданием прецизионных технологий сварки конструкций из алюминиевых сплавов, позволяющих минимизировать остаточные сварочные деформации, являются актуальными. К ним, например, относятся технологии, предусматривающие использование лазерной сварки. Целью настоящей статьи является обзор исследований по сварке алюминия и его сплавов с применением лазерного излучения, проводившихся в ИЭС им. Е. О. Патона с конца 1960-х годов до настоящего времени. Показано поэтапное развитие этих исследований в зависимости от прогресса лазерной техники и роста уровня знаний исследователей. Выделены три основных этапа работ по лазерной сварке: с применением маломощных импульсных лазеров (с конца 1960-х по конец 1970-х гг.), с применением мощных непрерывных лазеров (с начала 1980-х по начало 2000-х гг.) и с применением гибридных лазерно-дуговых и лазерно-плазменных процессов (с начала 2000-х гг. до настоящего времени). Для каждого этапа отмечены наиболее интересные в научном и технологическом плане результаты исследований. Предложенный обзор иллюстрирует достаточно высокий уровень исследований сварки алюминиевых сплавов с использованием лазерного излучения, проводившихся в ИЭС им. Е. О. Патона в разные годы. Показано, что на сегодня такие исследования продолжаются. Отмечены их перспективы, в том числе промышленные применения описанных способов сварки для изготовления тонкостенных корпусных конструкций автомобилей, скоростных железнодорожных вагонов, судов различного назначения, самолетов, ракет и космической техники. Библиогр. 16, табл. 1, рис. 4.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, лазерное излучение, гибриды, дуга плавящегося электрода, плазма прямого действия, скорости сварки, остаточные деформации, механические свойства

Алюминий и его сплавы широко применяются в современном промышленном производстве. Разнообразие конструкций, изготавливаемых из алюминиевых сплавов, потребовало разработки различных способов их сварки [1]. Среди них особое внимание уделяется тем, в которых используется лазерное излучение. В ИЭС им. Е. О. Патона с конца 1960-х годов проводили исследования лазерной сварки алюминиевых сплавов. Обзору этих исследований и посвящена данная работа.

В конце 1960-х – начале 1970-х годов стали эффективно применяться импульсные твердотельные лазеры для производства изделий приборостроения, радиотехники, электровакуумных систем и в других отраслях мелкого машиностроения. Это способствовало развитию в ИЭС исследований и разработки промышленных технологий сварки, которые использовали для нагрева и сварки металлических заготовок лазерный импульсный источник нагрева.

Проведение технологических исследований возглавил О. А. Величко, ответственным за аппаратную часть являлся В. П. Гарашук, а общее руководство работами осуществлял В. Э. Моравский. В экспериментах использовали лазерные установки типов УЛ-2м, СЛС-10, позже — Квант-10. В связи со сравнительно низкими энергиями импульса (до 10 Дж) образцы изготавливали преимущественно из фольг толщиной 0,1...0,5 мм.

Непрерывные швы получали путем перекрытия сварочных точек, образующихся за один импульс. Коэффициент перекрытия обычно составлял от 50 до 75 %. Сварку вели в защитных газах, зачастую отдавая предпочтение гелию. Отличительной чертой данного этапа работ являлось тщательное изучение металлографических особенностей получаемых соединений, а также их влияние на механические свойства соединений.

Примером таких исследований является работа [2]. В ней впервые были опубликованы данные о механических свойствах стыковых соединений разнородных металлов, выполненных лазерной сваркой. В том числе была исследована свариваемость технически чистого алюминия с такими материалами, как медь М1, бронза Бр. Б2, аустенитная нержавеющая сталь 1Х18Н9Т и углеродистая сталь 08кп. Было установлено, что во всех случаях разрушение сварного соединения происходит по шву и является хрупким. Для соединения алюминия с медью М1 отношение предела прочности σ_B металла шва к соответствующему показателю менее прочного металла (σ_B алюминия) составляло 40 % при угле загиба 60°. Для соединения Al–Бр. Б2 отношение пределов прочности составляло 60 % при угле загиба 30°. Для соединения Al–1Х18Н9Т отношение пределов прочности составляло 10% при угле загиба 5°. Для соединения Al–08кп отношение пределов прочности составляло 66 % при угле загиба 80°.

Для повышения механических характеристик разнородных соединений и улучшения геометрии шва в работе [2] был предложен такой технологический прием лазерной сварки, как смещение пятна нагрева от оси стыка в сторону одного из соединяемых металлов. Так были получены высококачественные стыковые соединения с расплавлением только одного из металлов — так называемый процесс сваркопайки. Среди таких соединений были отмечены соединения алюминия с вольфрамом, молибденом и сталью.

Постепенно все большее внимание стало уделяться изучению технологических особенностей процесса импульсной лазерной сварки алюминиевых сплавов. Так, в работе [3] впервые были приведены данные о лазерной сварке алюминия. В ней рассматривались вопросы возникновения различного рода дефектов, связанных с изменением режимов процесса — как дефектов формирования соединения (раковин, пор, подрезов, утонений), так и металлургического происхождения (структурных и химических изменений металла сварной точки и ЗТВ, трещин). Было установлено, что при импульсной лазерной сварке в режиме теплопроводностного проплавления механические свойства металла сварной точки практически не зависят от интенсивности излучения, а при переходе в режим глубокого проплавления структура и механические характеристики сварной точки могут ухудшаться с увеличением интенсивности излучения. Так же при этом возрастает склонность к образованию раковин, пор, микротрещин и других дефектов. Установили, что алюминий в весьма малой степени реагирует на изменение интенсивности излучения (рис. 1).

Еще на начальном этапе работ по лазерной сварке алюминия в ИЭС им. Е. О. Патона большую заинтересованность к полученным результатам проявил Д. М. Рабкин. К концу 1980-х годов, когда начался переход на мощные лазеры непрерывного действия, развитие технологических приемов лазерной сварки позволило получать протяженные бездефектные швы, он дал высокую оценку этому способу сварки и предсказал дальнейшее его развитие.

В отличие от импульсной лазерной сварки лазерная сварка алюминиевых сплавов непрерывным излучением считалась крайне проблематичной примерно до 1978–1979 гг. В то время эксперименты проводили на установке ОБ-1617, разработанной в ИЭС им. Е. О. Патона под руководством В. П. Гаращука. При сварке сплава АМг6 излучением этого CO_2 -лазера мощностью 1,4 кВт в шве наблюдалась значительная микропористость, оксидные пленки и скопления продуктов взаимодействия металла шва с газами воздуха в виде хрупких игольчатых фаз. При защите

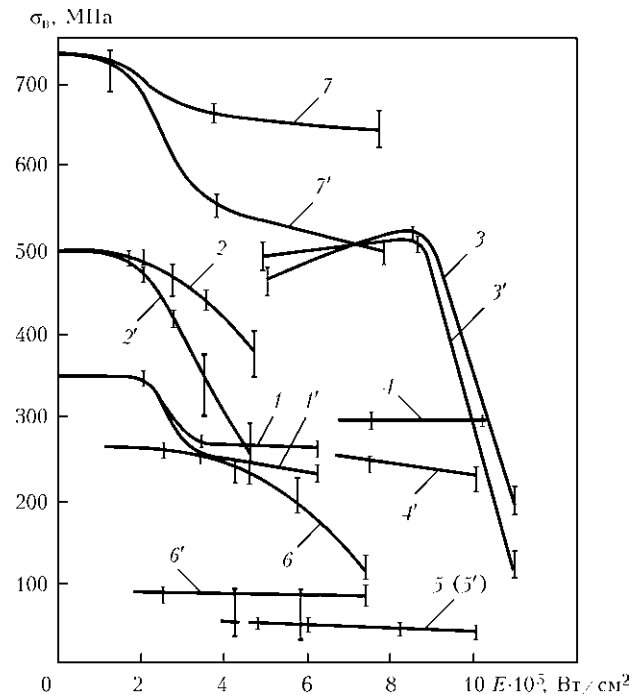


Рис. 1. Экспериментально полученные кривые зависимости прочности металла шва от интенсивности сфокусированного излучения при выполнении стыковых соединений [2]: 1 — сталь 08кп ($\delta = 0,3+0,3$ мм); 2 — титан ($\delta = 0,3+0,3$ мм); 3 — тантал ($\delta = 0,3+0,3$ мм); 4 — ниобий ($\delta = 0,2+0,2$ мм); 5 — алюминий ($\delta = 0,3+0,3$ мм); 6 — никель ($\delta = 0,3$ мм) и ниобий ($\delta = 0,2$ мм); 7 — ниобий ($\delta = 0,5+0,5$ мм); 1–7 — сварка в аргоне; 1'–7' — сварка на воздухе

сварочной ванны аргоном глубина проплавления уменьшалась до нуля [4].

В конце 1970-х годов начался переход на мощные CO_2 -лазеры, генерирующие непрерывное излучение, что позволило значительно расширить технологические возможности процесса лазерной сварки [5]. Например, в ИЭС в 1981 г. была установлена принципиальная возможность сварки сплава АМг6 ($\delta = 4$ мм) непрерывным лазерным излучением [4]. Использование защитной среды гелия при мощности излучения 5 кВт позволило на скорости 120 м/ч получить качественные кинжальные сварные швы, а по характеру и дисперсности микроструктура металла шва на сплаве АМг6 была идентична металлу шва, полученному при электронно-лучевой сварке. Достигнутый результат был впервые отмечен среди лидеров освоения лазерной сварки в промышленном производстве аэрокосмической техники.

Описанные исследования дали возможность в наши дни выполнять сварку тавровых соединений из сплава АМг6 с присадочной проволокой СвАМг6 (диаметром 1,2...3,0 мм) при изготовлении стрингерных панелей. В этом случае к листу толщиной 8 мм двусторонними угловыми швами приваривали ребра жесткости толщиной 5 мм при помощи излучения CO_2 -лазера мощностью до 5 кВт [5]. Для устранения остаточных сварочных напряжений и деформаций использовали предва-



рительное растяжение свариваемых элементов с максимальным усилием до 750 кН. Было установлено, что в условиях проводившихся экспериментов для получения качественных швов оптимальная мощность излучения составляла 3,8...3,9 кВт. Определено также, что наиболее эффективным является равномерное предварительное растяжение листа и ребер с усилием, величина которого находилась на уровне остаточных напряжений в шве, который выполнялся без предварительного растяжения свариваемых элементов [6].

Проведенные технологические исследования доказали эффективность и актуальность применения для сварки алюминиевых сплавов мощных CO₂-лазеров с непрерывным излучением. В связи с этим в начале 1990-х годов в ИЭС им. Е. О. Патона под руководством В. П. Гарашука был создан CO₂-лазер ЛТ-104 с ВЧ-накачкой мощностью излучения до 10 кВт [7]. Источник питания этого лазера был разработан в отделе, руководимым В. Д. Шелягиным.

Дальнейшие эксперименты по сварке алюминиевых сплавов стали проводиться с применением этой установки. Так, в конце 1990-х годов были исследованы особенности лазерной сварки алюминий-литиевых сплавов 1410, 1420, 1460, а также сплавов 1201, АМг6 и Д16 [8]. Возникший интерес к сварке высокопрочных алюминий-литиевых сплавов был вызван тем, что их применение в конструкциях позволяет уменьшить массу последних на 10...15 %, что особенно актуально при создании авиакосмической техники. Проведенные в ИЭС сотрудниками отделов № 7 (сварки алюминиевых сплавов) и № 77 (лазерной сварки) исследования показали, что при лазерной сварке заготовок из указанных сплавов при толщине кромок 2...5 мм ширина зоны термического влияния уменьшается в 3-4 раза по сравнению со сваркой дуговыми способами и на 10...20 % по сравнению с электронно-лучевой сваркой [8]. При исполь-

зовании лазерной сварки наблюдаются меньшие изменения химического состава металла швов [9, 10].

Наиболее существенные достижения в области сварки алюминиевых сплавов с применением лазерного излучения были получены в результате объединения лазерного и дугового источников энергии [11]. Так, было показано, что повышение тока дуги приводит к повышению скорости сварки (рис. 2). Важным здесь является переход от сравнительно малых токов (в районе 100 А) к пороговому значению 130...150 А, после которого достаточно небольшое увеличение тока приводит к значительному увеличению скорости сварки. По мнению авторов работы [11] это связано с пороговым значением поглощения лазерного излучения, требующим достижения определенного уровня плотности мощности. При превышении порогового значения становится возможной стабильная сварка алюминиевых сплавов. Для излучения CO₂-лазера этот порог соответствует плотности мощности близкой к $3 \cdot 10^6$ Вт/см². Очевидно, дуговой источник на токах свыше 150 А создает условия для лучшего поглощения сварочной ванны лазерного излучения.

Эксперименты по гибридной лазерно-дуговой сварке сплавов АМг5, АМг6, 1915 и технически чистого алюминия с диапазоном толщин $\delta = 2...6$ мм проводили с использованием электродной проволоки СвАМг6 диаметром 1,0...1,2 мм в защите аргона [11]. Было установлено, что эффект взаимного влияния лазерного и дугового тепловых источников проявляется, в первую очередь, в возможности значительного (в 2...4 раза) повышения скорости процесса. Также важным аспектом явилось определение того, что в случае гибридной сварки 1 кВт дуговой мощности способен заменить от 0,5 до 1,0 кВт мощности лазерного излучения. При этом качество получаемых швов может приближаться к лазерному.

Дальнейшие исследования в области лазерно-дуговой сварки показали, что в сравнении с обычной МИГ сваркой гибридная сварка стыковых соединений из тонколистового сплава АМг6 ($\delta = 1,9$ мм) способствует значительному уменьшению поперечных остаточных деформаций и напряжений за счет шестикратного увеличения скорости сварки (до 250...300 м/ч), 40%-го снижения ее погонной энергии и двукратного уменьшения сечения шва [12]. Установлено, что значения поперечных остаточных напряжений в околошовной зоне при гибридной сварке не превышают ± 20 МПа, что в 4...5 раз меньше напряжений, образующихся при МИГ сварке. Дополнительные поперечные остаточные напряжения от остаточного изгиба образца находятся в пределах

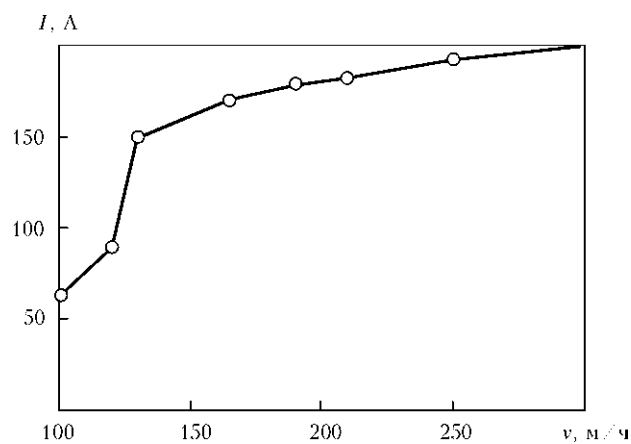
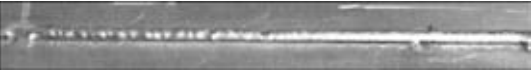














Рис. 2. Зависимость скорости гибридной сварки сплава АМг6 толщиной 2 мм от тока дуги при вложенной в металл мощности излучения CO₂-лазера 2,8 кВт [10]

Режимы сварки, внешний вид лицевой части шва и поперечные макрошлифы стыковых и нахлесточного соединений сплава АМг3 толщиной 1,5 мм, выполненных лазерной, плазменной и гибридной сваркой [12]

Режимы сварки		Внешний вид шва с лицевой стороны	Поперечный макрошлиф
P , Вт	$I_{\text{п}}/I_{\text{о}}$, А		
Скорость сварки 108 м/ч; лазер — диодный DF020HQ; диаметр сфокусированного пятна 1,2 мм; заглупление фокуса 1,0 мм; напряжение плазменной дуги 20 В			
2000	—		
—	100/50		
1000	50/50		
1500	100/50		
Скорость сварки 130 м/ч; CO ₂ -лазер ЛТ-104; диаметр сфокусированного пятна 0,5 мм; заглупление фокуса 1,0 мм; напряжение плазменной дуги 20 В			
1500	—		—
—	100/50		
1000	60/50		
Примечание. P — мощность лазера; $I_{\text{п}}/I_{\text{о}}$ — соотношение тока прямой и обратной полярности.			

± 40 МПа, что в 2,0...2,5 раза ниже значений, соответствующих МИГ сварке. Зона с продольными растягивающими остаточными напряжениями сужается в 1,5 раза по сравнению с МИГ сваркой.

Для случая гибридной сварки алюминиевых сплавов путем совмещения действия лазерного излучения с дуговой плазмой прямого действия в ИЭС были проведены исследования лазерно-плазменной сварки сплавов АМц, АМг3, АМг5м, АМг6 толщиной 0,5...3,0 мм с использованием присадочной проволоки СвАМг6 диаметром 1,2 мм и без нее. При этом использовали излучение диодного лазера модели DF 020 HQ (Рофин-Синар, Германия) мощностью до 2 кВт с длинами волн 0,808/0,940 мкм и CO₂-лазер ЛТ-104 с длиной волны 10,6 мкм [7] (таблица). Было установлено, что применение гибридной лазерно-плазменной сварки алюминиевых сплавов позволяет в 2...4 раза повысить глубину проплавления по сравнению с лазерной сваркой и примерно также повысить скорость сварки по сравнению с плазменной [13]. При этом важным фактором является использование явления катодной очистки поверхности от оксидной пленки. Времен-

ное сопротивление разрыву для полученных соединений составило 0,85...0,90 прочности основного металла, что превышает свойства аналогичных соединений, выполненных дугowymi способами сварки. Структуры сварных соединений, полученных лазерно-плазменным способом, характеризуются более мелкой дисперсностью металла шва и узкой зоной сплавления по сравнению с дугowymi способами сварки, что приближает их к соединениям, полученным лазерным способом.

Помимо экспериментов по сварке проводили исследования лазерно-дуговой наплавки алюминиевых сплавов [14]. Была установлена возможность достижения качественного заплывления узких полостей в алюминиевых изделиях без их механической разделки за счет фиксации электрической дуги на дне полости при помощи сфокусированного лазерного излучения. Лазерно-дуговая наплавка позволила устранить такие характерные для дугового процесса недостатки, как наличие пор и несплавлений в нижней части заплывляемых полостей, а также снизить перегрев наплавляемых образцов.

В работе [15] было показано, что увеличение глубины проплавления при лазерной сварке прямо

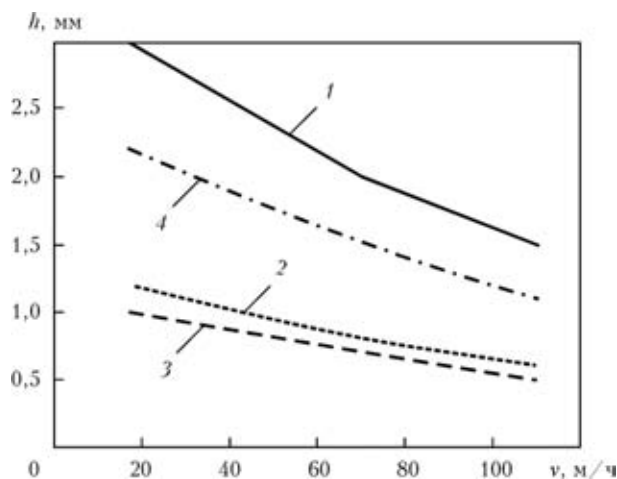


Рис. 3. Зависимости глубины провара от скорости сварки алюминиевого сплава АМг6 ($\delta = 1,0 \dots 3,0$ мм): 1 — гибридная лазерно-плазменная сварка; 2 — лазерная сварка; 3 — плазменная сварка; 4 — сумма глубин проваров, полученных лазерной и плазменной сваркой ($P = 1,2$ кВт; $I_{II}/I_0 = 50/50$ А; $U_d = 18$ В)

пропорционально уменьшению длины волны излучения. Как для лазерной, так и для плазменной сварки в диапазоне скоростей 18...330 м/ч наблюдается монотонное убывание глубины проплавления с увеличением скорости процесса. Сравнение арифметической суммы глубин проплавления для лазерного и для плазменного процессов с глубинами проплавления, полученного при гибридном лазерно-плазменном процессе, показало наличие синергетического эффекта при одновременной сварке в общую ванну лазерной и плазменной составляющими (рис. 3). Этот эффект заключается в неаддитивном возрастании глубины провара и демонстрирует преимущество гибридной сварки по сравнению со сваркой, осуществляемой отдельно лазерным и плазменным способами.

Исследования гибридной лазерно-дуговой сварки алюминиевых сплавов, при которой использовалась дуга на плавящемся электроде, показали, что интенсивность испарения отдельных элементов из основного металла и электродной проволоки, а также состав защитной газовой среды существенно влияют на прохождение лазерного излучения к свариваемому металлу [16]. Использование дуги в аргоне или высоком сварочном токе приводило к экранированию излучения и, как следствие, значительному уменьшению глубины проплавления. Для устранения этого эффекта оказалось целесообразным применять для защиты сварочной ванны смеси аргона с гелием или чистый гелий, а также использовать импульсную модуляцию лазерного излучения. При этом гибридная сварка в диапазоне скоростей 30...60 м/ч позволила по сравнению с импульсно-дуговой сваркой плавящимся электродом повысить в 1,8...2,6 раза скорость сварки металла

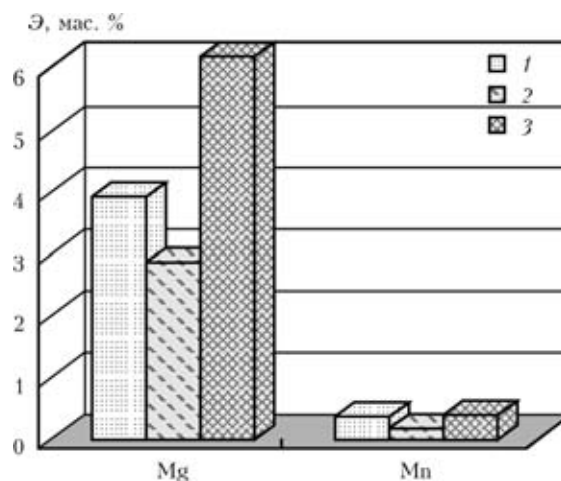


Рис. 4. Влияние погонной энергии $E_{\text{пог}}$ лазерной сварки сплава АМг6 ($\delta = 1,2$ мм) с плотностью мощности излучения $W_p = 2 \cdot 10^7$ Вт/см² на содержание легирующих элементов Э в литом металле шва: 1 — лазерная сварка ($E_{\text{пог}} = 50$ Дж/мм); 2 — лазерная сварка ($E_{\text{пог}} = 120$ Дж/мм); 3 — основной металл

толщиной 6 мм, уменьшить в 1,3...1,6 раза тепловложение в свариваемый металл и значительно снизить деформации соединений толщиной 4 мм. Исследование характера формирования сварных швов позволило заключить, что при гибридной сварке алюминиевых сплавов толщиной 6 мм и более целесообразно применять лазерное излучение мощностью более 4 кВт.

В настоящее время проводятся исследования интенсивности потерь легирующих элементов в алюминиевых сплавах при их расплавлении в процессе сварки с использованием лазерного или лазерно-дугового источников нагрева. Установлены области режимов лазерной и гибридной сварки, при которых такие потери от испарения отрицательно влияют на механические свойства соединений (рис. 4). Устранение этого недостатка предложено путем управления величиной энерговложения, в том числе за счет применения импульсной модуляции излучения и его сканирования, использования гибридных лазерно-дуговых процессов внутри канала проплавления (например, путем создания и применения систем защиты с дифференцированной подачей газа непосредственно в парогазовый канал), а также процессов легирования металла шва путем подачи присадочных материалов.

Предложенный обзор отмечает достаточно высокий уровень исследований сварки алюминиевых сплавов с использованием лазерного излучения, проводившихся в ИЭС им. Е. О. Патона в разные годы. На сегодня такие исследования продолжаются. Они включают разработку и создание более эффективных способов сварки для изготовления тонкостенных корпусных конструкций автомобилей, скоростных железнодорожных

вагонов, судов различного назначения, самолетов, ракет и космической техники.

1. Рабкин Д. М. *Металлургия сварки плавлением алюминия и его сплавов*. — Киев: Наук. думка, 1986. — 256 с.
2. Величко О. А., Гаращук В. П., Моравский В. Э. *Лазерная сварка стыковых соединений разнородных металлов // Автомат. сварка*. — 1972. — № 3. — С. 71–73.
3. Величко О. А., Гаращук В. П., Моравский В. Э. *Зависимость качества соединений от режимов лазерной сварки // Там же*. — 1973. — № 3. — С. 24–27.
4. *Информационное письмо / АН УССР. Ин-т электросварки им. Е. О. Патона*. — Киев, 1979. — № 37: Технологические возможности лазерной сварочной установки ЛТ1-5 / О. К. Назаренко, О. А. Величко, П. Ф. Аврамченко и др. — [4] с.
5. Аврамченко П. Ф., Молчан И. В. *Сварка сплава АМг6 непрерывным лучом лазера // Автомат. сварка*. — 1983. — № 5. — С. 68–69.
6. *Сварка тавровых соединений из алюминиево-магниевого сплава АМг6 излучением СО₂-лазера / О. А. Величко, П. Ф. Аврамченко, И. В. Молчан и др. // Там же*. — 1987. — № 6. — С. 34–37.
7. *Технологический СО₂-лазер ЛТ104 мощностью 10 кВт / В. П. Гаращук, В. Д. Шелягин, О. К. Назаренко и др. // Там же*. — 1997. — № 1. — С. 36–39.
8. *Особенности лазерной сварки высокопрочных алюминий-литиевых сплавов / А. А. Бондарев, А. А. Болдин, В. Д. Шелягин, В. П. Гаращук // Сварка и родственные технологии — в XXI век*. — Киев, ноябрь 1998 г.: Тез. докл. ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. — Киев, 1998. — 168 с.
9. Бондарев А. А., Бондарев Андр. А. *Лазерная сварка алюминиевых сплавов (Обзор) // Автомат. сварка*. — 2001. — № 12. — С. 21–29.
10. Бондарев А. А., Бондарев Андр. А. *Устройство защиты фокусирующей линзы от напыления и нагрева при лазерной сварке // Там же*. — 2001. — № 12. — С. 70–73.
11. *Гибридная лазерно-дуговая сварка углеродистых сталей и алюминиевых сплавов / В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин, Т. Н. Набок и др. // Доп. НАН України*. — 2005. — № 7. — С. 97–102.
12. *Остаточные напряжения в соединениях тонколистового сплава АМг6, вызванные дуговой и лазерно-дуговой сваркой / В. А. Шонин, В. С. Машин, В. Ю. Хаскин, Т. Н. Недей // Автомат. сварка*. — 2006. — № 9. — С. 26–31.
13. *Гибридная лазерно-плазменная сварка алюминиевых сплавов / И. В. Кривцун, В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин и др. // Там же*. — 2007. — № 5. — С. 49–53.
14. Хаскин В. Ю. *Использование лазерно-дуговой наплавки для заплавления полостей в алюминиевых сплавах // Там же*. — 2009. — № 2. — С. 41–45.
15. *Hybrid laser-plasma and laser-arc welding of various aluminum alloys / I. V. Krivtsun, V. D. Shelyagin, V. Yu. Khaskin et al. // Laser technologies in welding and materials processing*. — Kyiv: E. O. Paton Electric Welding Institute NASU, 2009. — P. 47–49.
16. *Особенности лазерно-дуговой сварки плавящимся электродом высокопрочных алюминиевых сплавов / В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин, В. С. Машин и др. // Автомат. сварка*. — 2009. — № 12. — С. 28–35.

Поступила в редакцию 25.01.2013

ОАО «ТУРБОАТОМ» ИЗГОТОВИЛО ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ КАХОВСКОЙ ГЭС

В марте 2013 г. ОАО «Турбоатом» предъявило заказчику и сдало под отгрузку рабочее колесо и детали направляющего аппарата гидротурбины для Каховской ГЭС № 6 (Украина).

На Каховской ГЭС начата установка камеры рабочего колеса, после чего будут смонтированы закладные части, нижнее и верхнее кольцо направляющего аппарата, направляющий аппарат и другие узлы турбины. Специалисты «Турбоатома» также выполняют шефмонтаж и пусконаладочные работы. Пуск гидроагрегата намечен на 2013 г.

На Каховской ГЭС осуществляется модернизация поворотной лопастью гидротурбины с установкой нового экологически чистого рабочего колеса и направляющего аппарата. После реконструкции мощность гидроагрегата возрастет с 51,8 до 54 МВт.

Это последний шестой гидроагрегат Каховской ГЭС, который модернизировал «Турбоатом».