



УДК 261.791.317.5

## ДУГОВАЯ ПАЙКА НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

**В. Ф. ХОРУНОВ, И. В. ЗВОЛИНСКИЙ, С. В. МАКСИМОВА**

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

Статья посвящена исследованию процесса дуговой пайки тонколистовой стали 08кп при использовании припоя БрКМц 3-1. Рассмотрены особенности растекания припоя в условиях дугового нагрева неплавящимся электродом с применением различных защитных сред. Показано, что наилучшее растекание достигается в смеси аргона с 10 мас. % водорода. Расчетным путем произведено сравнение тепловложения при дуговой сварке и пайке: погонная энергия (для конкретного случая) составила соответственно 1200 и 516,7 Дж/см. Показана возможность уменьшения тепловложения за счет использования импульсного процесса. Выявлены особенности формирования стыковых и нахлесточных соединений. При пайке стыковых соединений зазор может регулироваться в широких пределах (0,2...0,8 мм), а при пайке нахлесточных соединений этот параметр находится в более узких пределах. Однако в целом применение нахлесточных соединений представляется более перспективным. На основе данных оптической микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа установлено, что на границе соединения образуется силицидная прослойка, где содержание кремния может превышать 10 мас. %. Структура шва представляет собой твердый раствор с отдельными выделениями по границам зерен фазы с повышенным содержанием кремния. Показано, что при пайке на оптимальных режимах прочность стыковых соединений низкоуглеродистой стали, паянных припоем БрКМц 3-1, составляет 330...390 МПа. В нахлесточных соединениях равнопрочность достигается при нахлестке, равной толщине соединяемых материалов. Библиогр. 11, рис. 8.

*Ключевые слова:* сварка, дуговая пайка, низкоуглеродистые стали, припой, защитная среда, растекание припоя, покрытие, прочность соединений

Пайка — один из важнейших технических процессов современного производства. Бурное развитие различных отраслей промышленности обусловило ее широкое применение прежде всего в автомобилестроении и других отраслях, где необходимо соединять конструкции из тонкостенных материалов, в том числе имеющих защитные покрытия (цинка, алюминия и др.). Это обусловлено тем, что пайка как процесс формирования соединений материалов осуществляется при температурах ниже температуры плавления паяемого материала.

В настоящее время пайка наряду со сваркой является одним из наиболее распространенных способов получения неразъемных соединений. Разнообразие технологических задач диктует необходимость применения различных методов нагрева при пайке. Дуга является одним из перспективных источников нагрева для получения паяных соединений. В настоящее время способы пайки с применением дугового нагрева используются при соединении узлов из тонколистовых, в том числе оцинкованных, заготовок, например кузовов автомобилей [1–11]. Однако некоторые способы дуговой высокотемпературной пайки, в частности, дуговая пайка неплавящимся электродом в защитных газах, плазменная пайка, исследованы мало.

Целью настоящей работы являлось изучение возможности дуговой пайки низкоуглеродистых

сталей с использованием в качестве припоя стандартного сплава на основе меди БрКМц 3-1.

Для проведения экспериментов был подготовлен специальный стенд, который включал аппарат для аргонодуговой сварки «Master TIG MLS 2300» фирмы «Kemppi», устройство для подачи проволоки диаметром 0,8...1,6 мм с диапазоном плавного регулирования в пределах 0...130 мм/с (468 м/ч) и устройство для перемещения горелки со скоростью 0,5...25 мм/с (90 м/ч). Присадочную проволоку подавали под дугу, т. е. она не находилась под напряжением, что расширяло пределы регулирования параметров дуговой пайки.

Для проведения экспериментов использовали указанный выше припой в виде проволоки диаметром 1,2 мм. Температура ликвидуса сплава составляла 1020 °С. В качестве подложек использовали образцы стали 08кп размером 150×60×1 мм в горизонтальном положении. Исследовали влияние погонной энергии, зазора, времени импульса, скорости подачи припоя на параметры шва.

Естественно, интересно было определить изменение погонной энергии при переходе от сварки к дуговой пайке. В качестве отправной точки отметим, что режим сварки указанного образца под защитой аргона проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм был следующий:  $I = 100$  А,  $U = 10,8$  В,  $v_{св} = 22,7$  м/ч,  $v_{пр} = 10$  мм/с.

Эффективная мощность дуги составляла примерно 750 Дж/с, погонная энергия — около 1250 Дж/см. Можно было ожидать, что в случае применения металла со значительно более низкой

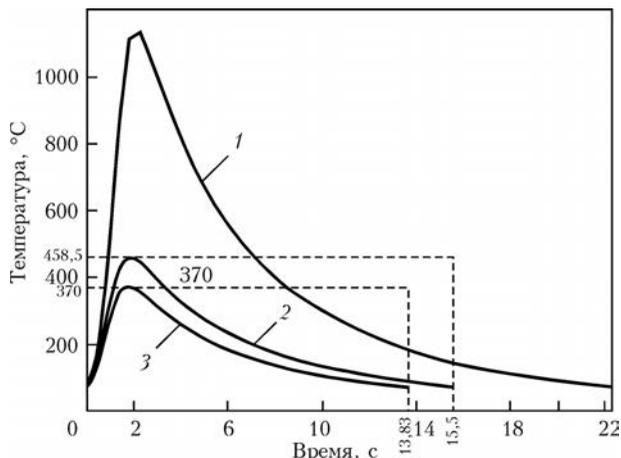


Рис. 1. Термический цикл дуговой сварки и пайки стали 08 кп на разных режимах: 1 — сварка ( $I = 100$  А,  $U = 10,8$  В,  $v_{св} = 22,7$  м/ч,  $v_{пр} = 10$  мм/с); 2 — пайка ( $I = 60$  А,  $U = 9,5$  В,  $v_{п} = 22,7$  м/ч,  $v_{пр} = 15$  мм/с,  $\delta = 0,4$  мм); 3 — пайка в импульсном режиме ( $I_{и} = 100$  А,  $I_{п} = 10$  А,  $U = 10,2$  В,  $v_{п} = 22,7$  м/ч,  $v_{пр} = 6$  мм/с,  $\nu = 5$  Гц,  $\tau_{и} = 30$  %,  $\delta = 0,04$  мм)

температурой плавления энергии для образования соединения потребуется меньше. Действительно, при дуговой пайке погонная энергия составляет примерно 625 Дж/см ( $I = 60$  А,  $U = 9,5$  В,  $v_{п} = 22,7$  м/ч,  $v_{пр} = 15$  мм/с). Значение тепловложения может быть уменьшено за счет применения импульсного режима. Так, при пайке на режиме 3 (рис. 1) погонная энергия составляет около 416,7 Дж/см.

Для оценки изменения тепловложения при переходе от сварки к дуговой пайке были произведены расчеты по известным формулам. Соотношение термических циклов в точке, удаленной от центра шва на 0,6 мм, показано на рис. 1.

Из приведенных данных следует, что переход от сварки к дуговой пайке позволяет существенно понизить тепловложение и тем самым уменьшить возможность прожогов и деформаций в процессе получения соединений.

Данных о поведении припоев в условиях дугового нагрева явно недостаточно. В частности, не существует общепринятой методики для изучения процесса растекания в рассматриваемых условиях. Поэтому нами использованы известные рекомендации, которые были приспособлены к дуговому нагреву (рис. 2).

Эксперименты по смачиванию стали 08кп проводили по ГОСТ 23904–79 «Определение площади растекания припоя». Для этого были изготовлены образцы размером 40×40×1 мм и навески припоя БрКМц 3-1 диаметром 4 мм (массой 0,42 г). Для контроля температуры использовали хромель-алюмелевую термопару, которую приваривали к образцу для получения горячего спая. Контроль температуры производили прибором ТРМ-202. В качестве защитных газов использовали аргон, гелий и смесь  $Ar + 10\% H_2$ . Навеску припоя располагали строго в центре подложки для равно-

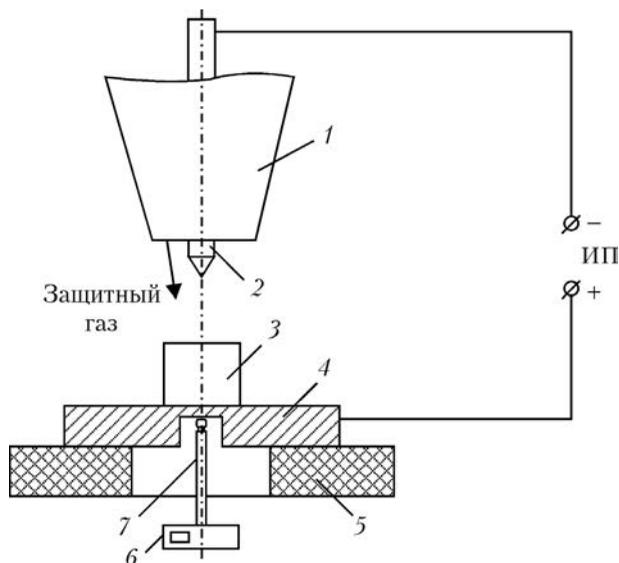


Рис. 2. Схема эксперимента по растеканию припоя в условиях дугового нагрева: 1 — соплó; 2 — вольфрамовый электрод; 3 — навеска припоя; 4 — подложка; 5 — изолятор; 6 — регистратор температуры; 7 — термопара

мерного нагрева. Расстояние от торца электрода до навески составляло 2 мм.

Температуру процесса смачивания ограничили и она превышала на 30 °С температуру ликвидуса припоев, т. е. для припоя БрКМц 3-1 составляла 1050 °С. Эксперименты по смачиванию производили на постоянном и переменном токе с разной формой импульса. Полученные наплавки фотографировали и обрабатывали на компьютере по программе AutoCard 2002.

Как видно из рис. 3, площадь растекания существенно зависит от состава защитной среды. Наилучшие результаты достигнуты в смеси аргона с водородом. Кроме того, площадь растекания возрастает и с увеличением диаметра электрода.

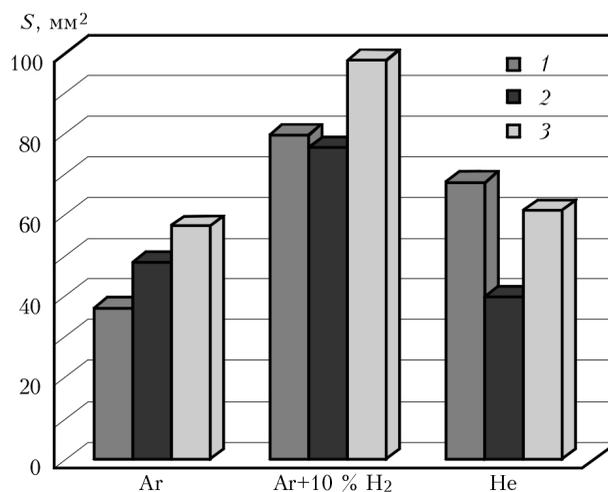


Рис. 3. Диаграммы площади растекания припоя БрКМц 3-1 по стали 08кп в зависимости от защитной среды и рода тока: 1 — постоянный ток; 2 — переменный ток (синусоидальный); 3 — переменный ток с прямоугольной формой импульса

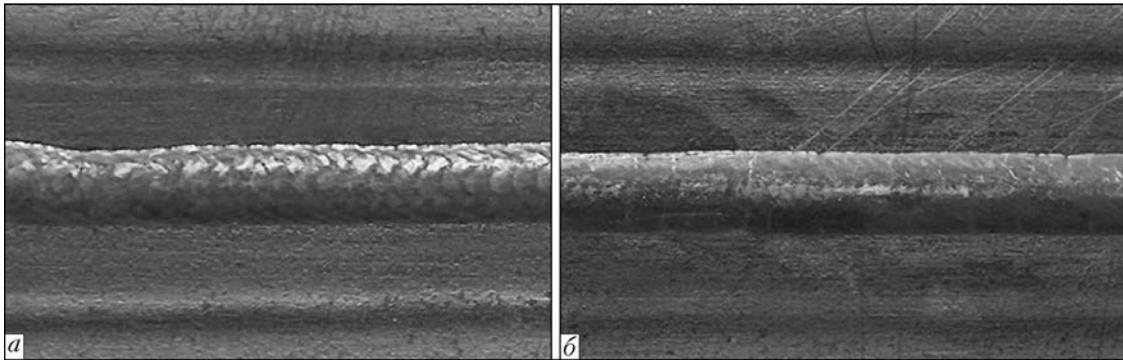


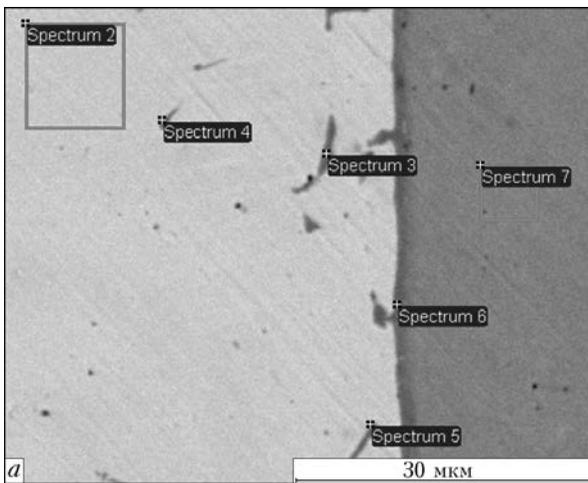
Рис. 4. Внешний вид швов стыковых соединений, паянных припоем БрКМц 3-1 на разных режимах: а —  $I_{н} = 100$  А,  $I_{п} = 10$  А,  $U = 10,1$  В,  $v = 5$  Гц,  $\tau_{н} = 30$  %,  $v_{п} = 22,7$  м/ч,  $v_{пр} = 6$  мм/с,  $Q = 416,7$  Дж/см; б —  $I_{н} = 100$  А,  $I_{п} = 10$  А,  $U = 10,3$  В,  $v = 10$  Гц,  $\tau_{н} = 30$  %,  $v_{п} = 22,7$  м/ч,  $v_{пр} = 10$  мм/с,  $Q = 525$  Дж/см

С практической точки зрения применение гелия из-за его высокой стоимости вряд ли целесообразно, а вот на смесь аргона с водородом как на перспективную защитную среду следует обратить внимание.

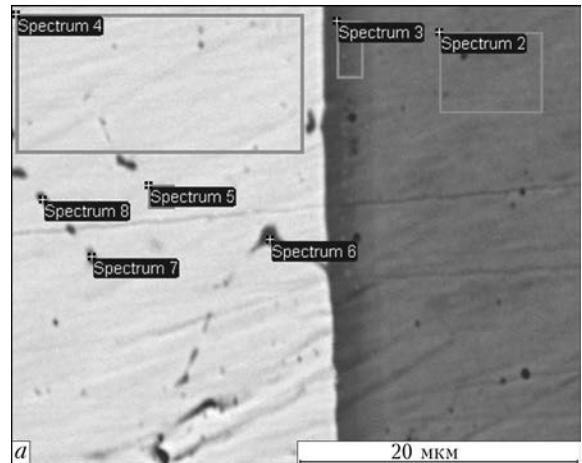
С использованием указанного выше припоя получено хорошее формирование стыковых и нахлесточных соединений. При получении стыковых соединений на оптимальных режимах полностью отсутствовало разбрызгивание, поверхность швов была гладкой. Хорошее формирование паяных швов можно получить при различном сочетании режимов дуговой пайки, в том числе импульсной (рис. 4), однако интегральным критерием качества

швов является погонная энергия. При этом изменение величины зазора при пайке стыковых соединений в пределах 0,2 ... 0,6 мм мало влияет на качество швов.

При рассмотрении микроструктуры соединений, полученных на различных режимах, отмечено, что во всех случаях при пайке припоем БрКМц 3-1 на границе соединения появлялась резко травящаяся прослойка, которая на нетравленном шлифе выглядит светлой, т. е. имеет повышенную твердость. Поскольку припой содержит 3 мас. % кремния, нами было сделано предположение, что это силицид. Для получения данных о конкретном химическом составе этой прослойки



№ спектра	Химический состав, мас. %			
	Si	Mn	Fe	Cu
2	3,87	1,13	0,89	94,12
3	12,93	2,74	40,3	44,02
4	14,74	10,15	32,33	42,78
5	10,29	1,47	47,66	40,58
6	12,04	0,83	78,91	8,21
7	0,16	0,24	99,47	0,13



№ спектра	Химический состав, мас. %			
	Si	Mn	Fe	Cu
2	0,15	0,26	99,11	0,48
3	10,19	0,67	84,91	4,24
4	2,41	0,92	2,53	94,13
5	3,01	0,93	1,63	94,44
6	4,93	1,26	17,32	76,5
7	3,9	1,13	4,23	90,74
8	3,43	1	2,38	93,19

Рис. 5. Микроструктура границы соединения стали 08кп, выполненного припоем БрКМц 3-1 на режиме  $I = 19$  А,  $U = 8,9$  В,  $v_{п} = 7,2$  м/ч,  $v_{пр} = 2$  мм/с, толщина основного материала 1 мм, диаметр присадочной проволоки 1,2 мм (а) и химический состав металла в местах проб (б)

Рис. 6. Микроструктура границы соединения стали 08кп, паянного припоем БрКМц 3-1 на режиме  $I = 30$  А (постоянный),  $U = 10,8$  В,  $v_{п} = 2$  мм/с,  $v_{пр} = 4$  мм/с, толщина пластины 1 мм, диаметр присадочной проволоки 1,2 мм, зазор 0 (а) и химический состав металла в местах проб (б)

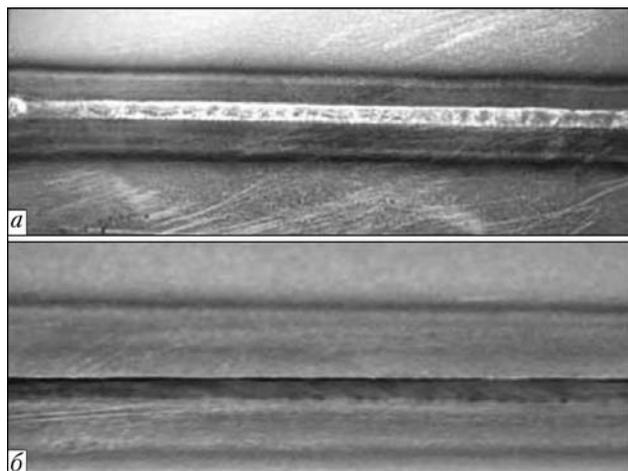


Рис. 7. Внешний вид нахлесточных соединений, выполненных дуговой пайкой на режиме  $I_{н} = 100 \text{ А}$ ,  $I_{п} = 10 \text{ А}$ ,  $U = 10,2 \text{ В}$ ,  $\nu = 5 \text{ Гц}$ ,  $\nu_{п} = 22,7 \text{ м/ч}$ ,  $\nu_{пр} = 6 \text{ мм/с}$ ,  $\tau_{н} = 60 \%$ : а — прямой шов; б — обратный

были проведены исследования на сканирующем микроскопе «CamScan», оснащенный энергодисперсионным спектрометром «Energy-200».

Микроструктура и результаты микрорентгеноспектрального анализа шва, выполненного при тепловложении  $591,7 \text{ Дж/см}$ , представлены на рис. 5. Основной металл и припой сохраняют свой исходный состав практически без изменения. Однако вдоль паяного шва (на границе соединения) кристаллизуется фаза, содержащая повышенную долю кремния до 12 мас. %, т. е., действительно, это силицид (рис. 5, спектр 6). Более того, в паяном шве вдоль границ зерен основного металла выделяется фаза, содержащая примерно от 10 до 15 мас. % кремния (рис. 5, спектры 3–5).

При увеличении тепловложения примерно до  $1125 \text{ Дж/см}$  ширина силицидной прослойки возрастает (рис. 6), хотя фазовый состав принципиально не меняется.

Эксперименты по пайке нахлесточных соединений проводили с учетом данных, полученных

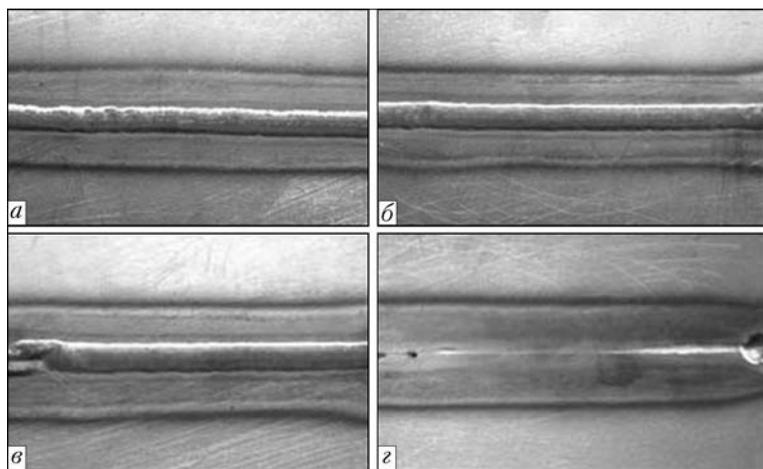


Рис. 8. Внешний вид швов, паянных на режиме  $I = 28 \text{ А}$ ,  $U = 15,2 \text{ В}$ ,  $\nu_{п} = 7,2 \text{ м/ч}$ ,  $\nu_{пр} = 4 \text{ мм/с}$  при зазоре 0,2 (а), 0,4 (б), 0,6 (в), 0,6 мм (z) (обратная галтель)

при пайке стыковых соединений низкоуглеродистой стали 08кп. Как указывалось выше, для получения качественных стыковых соединений необходимо было обеспечить тепловложение в пределах  $416,7...583,3 \text{ Дж/см}$ . Для нахлесточных соединений этот уровень тепловложения оказался недостаточным. При повышении тепловложения за счет увеличения времени импульса примерно на 70 % формируется хорошая прямая (рис. 7, а) и обратная галтель (рис. 7, б).

Следует отметить, что нахлесточные соединения наиболее характерны для пайки, и есть основания полагать, что они и будут составлять основной вид соединений в промышленности.

Прочность стыковых соединений низкоуглеродистой стали, паянных припоем БрКМц 3-1, составляет (при снятом усилении)  $330...390 \text{ МПа}$ ; в состоянии после пайки разрыв происходит по основному металлу. В нахлесточных соединениях равнопрочность достигается при нахлестке, равной толщине соединяемых материалов.

Как отмечалось выше, приведенные результаты экспериментов дуговой пайки низкоуглеродистой стали получены при использовании современного оборудования с широкими возможностями управления дуговым процессом. Поэтому переход к применению микроплазменного нагрева с использованием установки МПУ-4 оказался не эффективным, достичь тех же результатов при том же тепловложении не удалось. При увеличении погонной энергии до  $1275 \text{ Дж/см}$  удалось получить хорошее формирование шва со стороны дуги при зазоре 0,2; 0,4; 0,6 мм, однако обратная галтель образуется только при зазоре 0,6 мм, причем места зазор едва заполнен (рис. 8).

Проанализировав полученные данные, следует отметить, что при пайке стыковых соединений на малых токах повышение тепловложения в исследуемых пределах не дало ожидаемого эффекта: постепенно увеличивалось количество металла в шве со стороны дуги, а обратный шов формировался только при достаточно большом зазоре (0,6...0,8 мм), т. е. нижняя кромка стыка не прогревалась, и припой не мог заполнять зазор. При пайке нахлесточных соединений создаются более благоприятные условия для формирования соединений, причем диапазон благоприятных режимов расширяется. Так, была сделана приставка к указанной выше установке «Master TIG MLS 2300», которая позволила осуществлять управление этим процессом в широком диапазоне мощности. В результате оказалось возможным получение результатов, близких к таковым при использовании дугового нагрева.



## Выводы

1. Исследованный в работе припой БрКМц 3-1 хорошо растекается по стали 08кп и образует качественные стыковые и нахлесточные соединения без заметного растворения в жидком припое основного металла.

2. Наиболее благоприятной защитной средой для дуговой пайки с использованием исследуемого припоя является смесь аргона с 10 мас. % водорода.

3. Использование сплавов со значительно меньшей, чем сталь, температурой плавления позволяет радикально изменить уровень тепловложения при получении неразъемных соединений. Так, при пайке пластин толщиной 1 мм тепловложение составляет примерно 416...625 Дж/см. Для сварки таких же образцов необходима погонная энергия 1166...1250 Дж/см.

4. Прочность стыковых соединений низкоуглеродистой стали, паянных припоем БрКМц 3-1, составляет (при снятом усилении) 330...390 МПа; в состоянии после пайки разрыв происходит по основному металлу. В нахлесточных соединениях равнопрочность достигается при нахлестке, равной толщине соединяемых материалов.

1. *WIG-Loeten verzinkter Bleche // Bleche Rohre Profile.* — 1999. — **46**, № 7/8. — С. 16.
2. *Verfahren zum MSG-Loeten und Verwendung eines Schutzgases.* Заявка 19952043. Германия. МПК<sup>7</sup> В23К 3/04, В23К 1/08. / F. Tischter. — Заявл. 28.01.1999. Оpubл. 03.05.2001.
3. *Knopp N., Killing R. Hartloeten verzinkter Feinbleche mit dem Lichtbogen sicher und wirtschaftlich [Teil 2] // Der Praktiker.* — 2004. — № 1. — С. 8–12.
4. *Hackl H. MIG-Loeten von verzinkten Duennblechen // Technica (Suisse).* — 1998. — **47**, № 25/26. — С. 54–58.
5. *Hackl H. MIG-brazing of galvanised thin sheets and profiles // Welding and Cutting.* — 1998. — **50**, № 6. — P. 102–104.
6. *Hackl H. Loeten statt Schweißen steigert Qualitaet von PKWS Stahlmarkt: Informationen ans Stahjndustries // Stahlhandel und Verarbeitung.* — 2001. — **51**, № 1. — С. 68–69.
7. *Hackl H. Loeten statt Schweißen // Bleche Rohre Profile.* — 2000. — **47**, № 12. — С. 110.
8. *Verzinkte Bleche MIG-Loeten // Ibid.* — 2003. — **50**, № 1. — С. 24–25.
9. *Hackl H. Beim MIG-Loeten eruebricht sich das Nachverzinken // Ind.-Anz.* — 2002. — **124**, № 23/24. — С. 38–39.
10. *Grzybicki M., Jakubowski J. Comparitive tests of welding of sheets made of car body steel using the CMT and MIG/MAG methods // Przegląd Spawalnictwa.* — 2009. — № 10. — С. 32–36.
11. *Rozanski M. Modern weldbrazing methods // Ibid.* — 2010. — № 9. — С. 24–28.

Поступила в редакцию 05.02.2013

## ОАО «ТУРБОАТОМ» ЗАКЛЮЧИЛО КРУПНЕЙШИЙ КОНТРАКТ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 25 ЛЕТ

ОАО «Турбоатом» (г. Харьков) заключило контракт на изготовление и поставку паровой турбины мощностью 1100 МВт с конденсатором для блока № 4 Ростовской АЭС (Россия).

Турбина-«миллионник» имеет высокие конкурентоспособные показатели на уровне мировых требований.

В соответствии с контрактными обязательствами ОАО «Турбоатом» осуществит проектирование, изготовление и поставку цилиндра высокого давления, трех цилиндров низкого давления, системы регулирования и парораспределения, системы маслоснабжения, конденсатор и другое вспомогательное оборудование. При производстве оборудования будут применены новые технологии сварки роторов, литья деталей, а также будет продолжена модернизация станочного парка завода.

Сроки поставки конденсатора — июль 2014 г., турбины — март 2015 г.

Изготовление будет проводиться по согласованному графику на протяжении 2012–2014 гг., а отгрузка отдельными узлами — в 2014–2015 гг.

Общий вес оборудования составляет около 5 тыс. т.

Срок ввода энергоблока № 4 Ростовской АЭС в эксплуатацию запланирован на июнь 2017 г.

Стоимость контракта составляет более 100 млн. дол.

На Ростовской АЭС работают 2 энергоблока с турбинами мощностью 1000 МВт, изготовленными ОАО «Турбоатом»: блок № 1 пущен в 2001 г., блок № 2 — в 2010 г.

С пуском блока № 3 Ростовской АЭС в 2014–2015 гг. это будет уже 19-я турбина-«миллионник», изготовленная ОАО «Турбоатом» и введенная в эксплуатацию. Всего на данный момент успешно работают 18 аналогичных турбин на АЭС Украины, России и Болгарии (Южно-Украинская, Запорожская, Калининская, Балаковская, Ростовская АЭС и АЭС Козлодуй). Эти агрегаты хорошо зарекомендовали себя в эксплуатации, первые турбины уже отработали около 200 тыс. ч. Отличительная особенность турбин мощностью 1000...1100 МВт — тихоходное исполнение (1500 об/мин), что дает целый ряд преимуществ по экономичности, надежности, безопасности, удобству в эксплуатации и ремонтпригодности.