

СВОЙСТВА СТАЛЕМЕДНОГО БИМЕТАЛЛА, ПОЛУЧЕННОГО НАПАЙКОЙ В АВТОНОМНОМ ВАКУУМЕ

И. П. СЕРЕБРЯНИК, М. Г. АТРОШЕНКО, М. А. ПОЛЕЩУК, А. Л. ПУЗРИН, А. В. ШЕВЦОВ
ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Определено, что при напайке меди на сталь в условиях автономного вакуума в зоне контакта образуется участок повышенной микротвердости, которая устраняется стандартной для стали термической обработкой. Показано, что содержание углерода в стали не оказывает существенного влияния на свойства переходной зоны медь–сталь. Установлено, что в условиях напайки в автономном вакууме взаимодействие жидкой меди со сталью не приводит к образованию трещин в зоне соединения. Определено, что увеличение времени контакта жидкой меди со сталью приводит к образованию хрупких структур, что снижает ударную вязкость соединения. При испытаниях на статическое растяжение разрушение сталемедного соединения происходит по медной части. При этом прочностные свойства напаянного слоя превышают справочные данные для деформированной и отожженной меди. Библиогр. 7, табл. 2, рис. 9.

Ключевые слова: напайка меди на сталь в автономном вакууме, сталемедный биметалл, структура и свойства переходной зоны

Сталемедные детали, сочетающие прочность стального слоя и высокую тепло- и электропроводность меди, находят широкое применение в металлургии, судостроении, машиностроении и других отраслях промышленности. Это, к примеру, крупногабаритные подшипники скольжения валов рудоразмельных мельниц, подовые электроды дуговых печей постоянного тока, элементы кристаллизаторов металлургических печей. Во многих промышленных установках для подвода электрического тока в тысячу и более ампер используются биметаллические сталемедные шины, которые сочетают конструкционную прочность стали и высокую электропроводность меди.

В зависимости от назначения биметаллические детали изготавливаются в широком диапазоне толщин как плакирующего, так и основного слоя. В соответствии с этим применяются разнообразные способы соединения меди со сталью: сварка взрывом, диффузионная сварка, электрошлаковая наплавка, дуговая и индукционная наплавки, заливка и совместная прокатка.

В последнее время разработан способ изготовления биметаллических деталей такого типа путем напайки меди на сталь в условиях автономного вакуума, отличающийся высоким качеством соединения и не требующий применения специального оборудования [1].

Учитывая, что сталемедные детали используются, как правило, в агрегатах с большим энергопотреблением, при повышенных температурах, в условиях постоянных теплосмен, состав и свойства переходной зоны медь–сталь могут быть определяющими для работоспособности детали и узла в целом.

При различных способах дуговой напайки меди на сталь в зоне соединения могут возникать

микротрещины, которые обусловлены высокой температурой столба электрической или плазменной дуги, а также совместной кристаллизацией медно-стальной жидкой фазы [2–5].

Напайка меди на сталь в условиях автономного вакуума осуществляется при относительно низкой температуре, не превышающей 1150 °С, а при образовании соединения в жидкой фазе находится только медь. Это позволяет получить высококачественное биметаллическое соединение [1].

В биметаллических деталях в качестве прочного слоя наиболее часто применяются конструкционные стали, которые по содержанию основных компонентов близки друг к другу и существенно отличаются только содержанием углерода. Поэтому с целью рационального проектирования технологического процесса напайки меди на стали проведена оценка влияния содержания углерода в сталях на структуру и свойства сталемедной переходной зоны. Для экспериментов выбрали электротехническую сталь, сталь 20 и сталь 45 [6] с содержанием углерода 0,03, 0,19 и 0,42 %, соответственно.

Исследования проводили на образцах, представленных на рис. 1.

В стальных корпусах диаметром 42 мм, изготовленных из соответствующей стали, выполнена проточка глубиной 4 мм, в которую вкладывали медный диск толщиной 3 мм. Образцы помещали в герметичный контейнер, который после вакуумирования нагревали в печи до температуры 1150 °С с изотермической выдержкой 30 мин. Для проведения металлографических исследований сталемедной переходной зоны из половинок образцов после напайки и охлаждения изготовив-

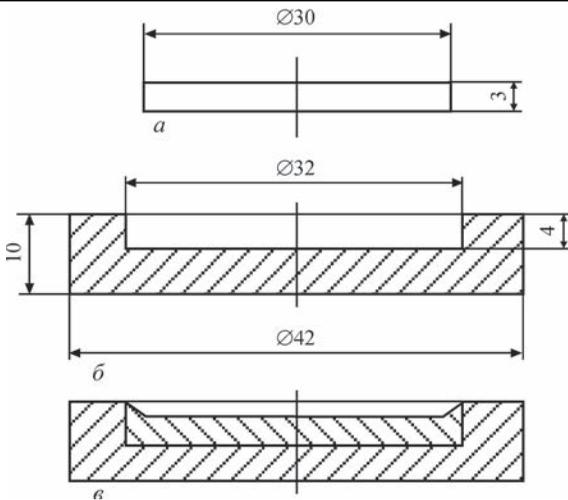


Рис. 1. Образец для исследования взаимодействия расплава меди со сталью: *а* — диск из меди; *б* — стальной корпус; *в* — сечение образца после затвердевания меди

ливали микрошлифы. На рис. 2 представлены микроструктуры переходных зон, полученных при напайке меди на электротехническую сталь (рис. 2, *а*), сталь 20 (рис. 2, *б*) и сталь 45 (рис. 2, *в*).

Как видно, в зоне сплавления во всех случаях в меди наблюдаются стальные включения. С увеличением содержания углерода в стали количество таких включений уменьшается, а значит, уменьшается проникновение меди по границам зерен основного металла. Расплав меди, проникая

в сталь по границам зерен, охватывает и отрывает их (рис. 3).

Дальнейшее растворение продолжается в расплаве меди. Дендритная основа стального кристаллита имеет, вероятно, наименьшую растворимость в жидкой меди, поэтому дендриты располагаются после кристаллизации в медном слое (рис. 4).

На границе сталь–медь процесс проникновения меди и отрыва стальных зерен с течением времени повторяется снова и зона сплавления перемещается в сторону стали.

Существует мнение, что сталь растрескивается под действием медного расплава, который затем заполняет трещины [2–5]. Если такой процесс имеет место, то должен существовать остроугольный участок в вершине трещины, который будет таким узким, что из условий капиллярности жидкая медь не сможет его заполнить, и он останется пустым. Наличие таких дефектов существенно снизит работоспособность соединения при знакопеременных нагрузках. Для проверки этого предположения (вида вершины меди, проникшей в сталь) образцы, полученные напайкой в условиях автономного вакуума, рассмотрели под электронным микроскопом при увеличении $\times 3000$ (рис. 5).

Вершины меди, проникшей в сталь, имеют плавную криволинейную конфигурацию. Пустот

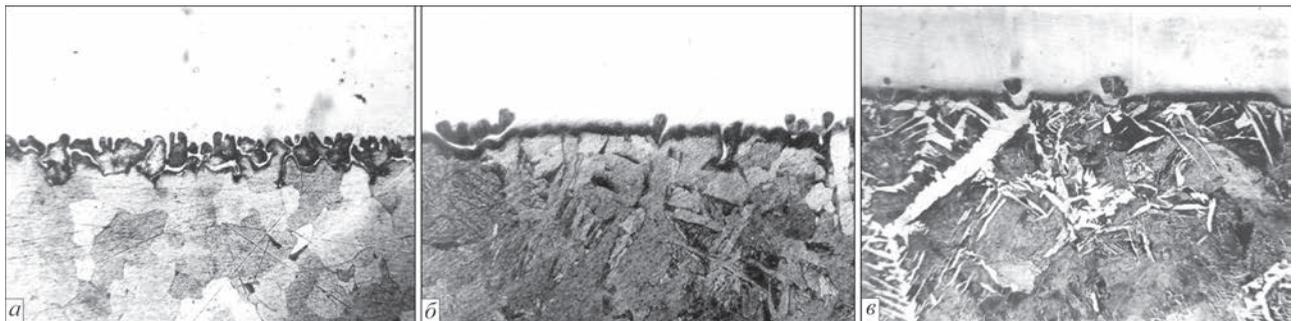


Рис. 2. Микроструктура ($\times 115$) металла зоны соединения медь–сталь: *а* — электротехническая сталь; *б* — сталь 20; *в* — сталь 45

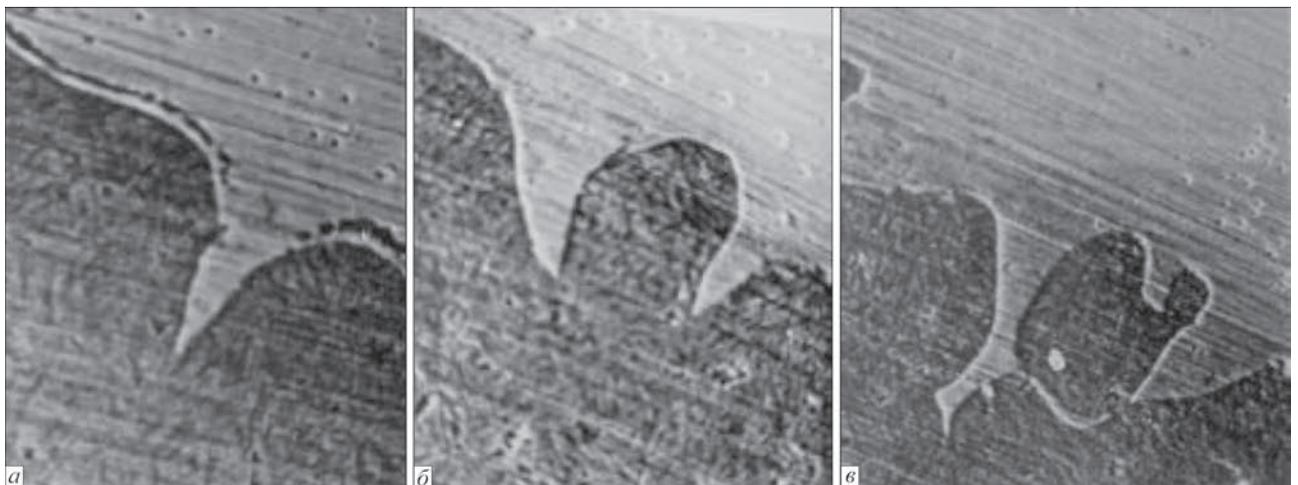


Рис. 3. Этапы отделения частиц стали расплавом меди: *а* — одиночное проникновение; *б* — двухстороннее проникновение; *в* — завершение отрыва стальной частицы

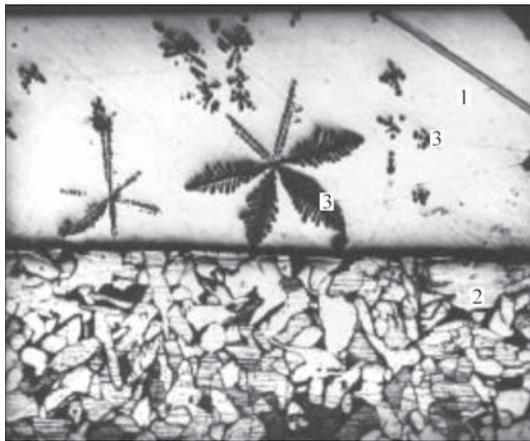


Рис. 4. Стальные дендриты в медном слое: 1 — медь; 2 — сталь; 3 — стальные дендриты

нет. Таким образом, гипотеза о растрескивании стали в контакте с жидкой медью в наших экспериментах не нашла подтверждения.

Замеры микротвердости сталемедной переходной зоны выполняли на приборе ПМТ-3. Результаты замеров приведены в табл. 1. У линии сплавления, со стороны стали наблюдается зона повышенной микротвердости. Для электротехнической стали ее протяженность составляет около 80 мкм, для стали 20 около 50 мкм, для стали 45 около 25 мкм. Такая зона в процессе эксплуатации может вызвать появление дополнительных напряжений и снизить работоспособность соединения.

Для устранения этого явления образцы были подвергнуты термической обработке по стандартному режиму нормализации для соответствующей марки конструкционной стали.

Исследование микрошлифов после термической обработки показало, что микротвердость переходной зоны удалось существенно снизить (см. табл. 1).

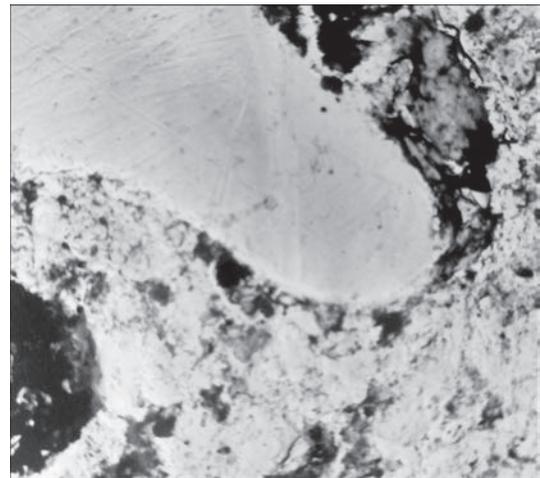


Рис. 5. Микроструктура ($\times 3000$) зоны соединения при напайке в автономном вакууме меди М1 на сталь 20 ($T = 1150^\circ\text{C}$, изотермическая выдержка 30 мин)

Как было приведено выше, зона сплавления в результате взаимодействия жидкой меди со сталью смещается в сторону стали.

Для оценки величины этого перемещения при изготовлении образцов (см. рис. 1) фиксировали фактическую глубину проточки с помощью индикаторного глубиномера. После напайки на отшлифованный торец половинки образца прибором ПМТ-3 наносили точку на расстоянии 3,5 мм от верхнего края образца. Расстояние от контрольной точки до видимой границы сплавления определяли в процессе замера микротвердости. В результате замеров установлено, что перемещение линии сплавления составило 220...240 мкм для электротехнической стали, 165...215 мкм для стали 20 и 150...180 мкм для стали 45. Такую разницу величин перемещения линии сплавления для сталей с различным содержанием углерода при взаимодействии жидкой меди со сталью в течение 30 мин следует признать незначительной и можно не учи-

Таблица 1. Микротвердость металла переходной зоны соединения, полученного автовакуумной напайкой, до и после термообработки

Состав соединения	Расстояние от линии сплавления, мкм							
	Медь							
	600		50		30		20	
	без т/о	после т/о	без т/о	после т/о	без т/о	после т/о	без т/о	после т/о
Эл. тех. сталь+М1	92	79	93	78	97	66	95	76
сталь 20 + М1	113	87	113	89	115	78	105	92
сталь 45 + М1	93	81	108	81	107	68	116	79

Продолжение табл. 1

Состав соединения	Расстояние от линии сплавления, мкм											
	Сталь											
	10		20		30		50		100		1000	
	без т/о	после т/о	без т/о	после т/о	без т/о	после т/о	без т/о	после т/о	без т/о	после т/о	без т/о	после т/о
Эл. тех. сталь+М1	255	116	252	141	237	122	233	114	164	132	153	136
сталь 20 + М1	270	129	250	143	247	124	230	148	191	135	190	143
сталь 45 + М1	269	177	261	176	205	170	200	183	213	188	212	182

Примечание. Даны статистически достоверные средние (из 12-21 замеров) значения микротвердости.

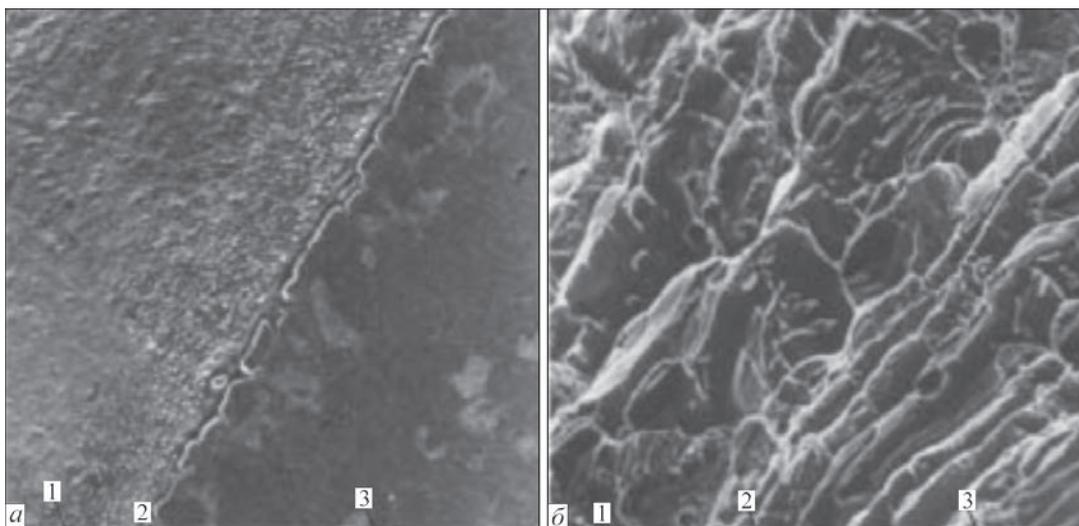


Рис. 6. Переходная зона сталемедного соединения, полученного автовакуумной напайкой при $T = 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ и изотермической выдержке 30 мин: *a* — микроструктура ($\times 130$); *б* — фрактограмма излома ($\times 3000$); 1 — медь; 2 — зона сплавления; 3 — сталь

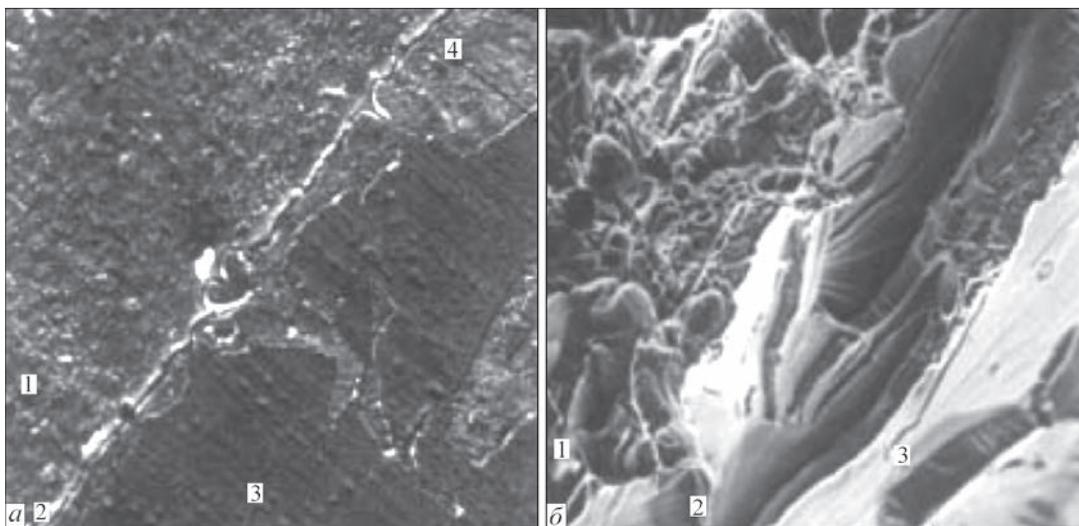


Рис. 7. Переходная зона сталемедного соединения полученного автовакуумной напайкой при $T = 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ и изотермической выдержке 2 ч: *a* — микроструктура ($\times 130$); *б* — фрактограмма излома ($\times 3000$); 1 — медь; 2 — зона сплавления; 3 — сталь; 4 — цепочка зерен перлита в стали

тывать при проектировании технологических процессов напайки меди на сталь.

С целью определения оптимального времени контакта жидкой меди со сталью методом автовакуумной напайки изготовили два образца из стали 20 размером $150 \times 100 \times 50$ мм с толщиной медного слоя 10 мм. При этом время контакта жидкой меди со сталью при температуре $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ составило на одном образце 0,5 и 2,0 ч на другом. После напайки провели термообработку — нормализацию по стандартному для стали 20 режиму. Из полученных соединений изготовили образцы для ис-

пытания на ударный изгиб с острым надрезом [7] таким образом, чтобы плоскость разрушения проходила поперек зоны соединения. Образцы имели размеры $10 \times 10 \times 55$ мм; толщина стали 6 мм; толщина меди 4 мм; глубина надреза, проходящего через оба слоя, 2 мм.

Среднее значение ударной вязкости по результатам испытаний трех образцов составило $15,7\text{ мДж/м}^2$ для времени выдержки 0,5 ч и $13,2\text{ мДж/м}^2$ для 2,0 ч. Из половинок образцов после испытания изготавливали шлифы для фрактурграфических и металлографических исследо-

Т а б л и ц а 2. Механические свойства сталемедных образцов

Объект и метод исследований	Механические свойства		
	σ_r , МПа	σ_B , МПа	ψ , %
Испытания сталемедных образцов (зона сплавления) на статическое растяжение	$\frac{112,6...127,2}{118,1^*}$	$\frac{281,2...282,9}{282,4^*}$	$\frac{71,1...73,8}{72,1^*}$
Медь деформированная и отожженная (стандартные значения)	74,0	216,0	75,0

* Среднее значение по результатам испытаний шести образцов.



Рис. 8. Темплет сталемедной плиты (толщина медного слоя 40 мм)



Рис. 9. Образец после испытания на статическое растяжение ваний. На микрошлифах образцов с меньшим временем выдержки в медном слое имеются мелкодисперсные включения. Сталь состоит из массива феррита, в котором равномерно располагаются зерна перлита небольшого размера. На изломах образцов этой серии разрушение меди и стали носит вязкий характер (рис. 6).

Ступеньки скола параллельны друг другу. Это свидетельствует о том, что фронт разрушения продвигался равномерно. У образцов с большим временем выдержки медь насыщена как мелкодисперсными, так и крупными включениями (рис. 7).

Со стороны стали вдоль линии сплавления располагается непрерывная цепочка крупных зерен перлита. Разрушение меди носит вязкий характер. В то же время разрушение стали хрупкое, внутризеренное. Направление ручьев свидетельствует о том, что разрушение начиналось от структурных составляющих, расположенных на линии сплавления. Можно с достаточной уверенностью предположить, что источником разрушения послужили зерна перлита. Такой характер разрушения может отрицательно повлиять на работоспособность соединения и поэтому время контакта жидкой меди со сталью должно быть, по возможности, сокращено.

На основании проведенных исследований были выбраны оптимальные параметры технологического процесса и выполнена автовакуумная напайка плиты из стали 20 размером 400×500×50 мм медью М1. Толщина слоя меди составила 40 мм (рис. 8).

Из плиты изготовлены образцы для испытания на статическое растяжение длиной 40 мм таким образом, чтобы линия сплавления меди со сталью располагалась в середине рабочей части образца. При испытаниях разрушение проходило по меди (рис. 9).

Это свидетельствует о том, что прочность контакта медь–сталь выше, чем прочность меди на растяжение. Результаты механических испытаний приведены в табл. 2.

Таким образом, механические свойства испытанных образцов выше, чем у деформированной и отожженной меди по справочным данным.

Выводы

В результате проведенной работы опытным путем установлено, что метод напайки в автономном вакууме обеспечивает высококачественное соединение меди со сталями с различным содержанием углерода и может быть рекомендован для производства сталемедных изделий и биметаллических заготовок.

Список литературы

1. Атрошенко М. Г., Поleshchuk М. А., Шевцов А. В. и др. (2015) Физико-механические свойства переходной зоны биметалла, полученного автономной вакуумной напайкой меди на сталь. *Автоматическая сварка*, **11**, 61–65.
2. Вайнерман А. Е. (1981) Механизм межкристаллитного проникновения при наплавке медных сплавов на сталь. *Там же*, **6**, 22–26.
3. Аснис А. Е., Прохоренко В. М., Швиндлерман Л. С. (1965) О механизме образования трещин при сварке и наплавке меди на сталь. *Сварочное производство*, **11**, 8–9.
4. Гринь А. Г., Жариков С. В., Залесный Д. И. (2016) Совершенствование самозащитной порошковой проволоки для сварки меди со сталью. *Вестник государственной машиностроительной академии*, **2**(16), 90–95.
5. Magnabosco I., Ferro P., Bonollo F., Arnberg L. (2006) An investigation of fusion zone microstructures in electron beam welding of copper – stainless steel. *Materials Science and Engineering*, A 424, 163–173.
6. (2013) ГОСТ 1050-2013. *Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия*.
7. (1985) ГОСТ 10885-85. *Сталь листовая горячекатаная двухслойная коррозионноустойчивая. Технические условия*.

References

1. Atroshenko, M.G., Poleshchuk, M.A., Shevtsov, A.V. et al. (2015) Physical and mechanical properties of transition zone of bimetal produced by autonomous vacuum brazing of copper on steel. *The Paton Welding J.*, **11**, 52-56.
2. Vajnerman, A.E. (1981) Mechanism of intercrystalline penetration in surfacing of copper alloys on steel. *Avtomatich. Svarka*, **6**, 22-26 [in Russian].
3. Asnis, A.E., Prokhorenko, V.M., Shvindlerman, L.S. (1965) About mechanism of crack formation in welding and surfacing of copper on steel. *Svaroch. Proizvodstvo*, **11**, 8-9 [in Russian].
4. Grin, A.G., Zharikov, S.V., Zalesny, D.I. (2016) Improvement of self-shielding flux-cored wire for welding of copper with steel. *Vestnik Gos. Mashinostroit. Akademii*, **2**(16), 90-95 [in Russian].
5. Magnabosco, I., Ferro, P., Bonollo, F., Arnberg, L. (2006) An investigation of fusion zone microstructures in electron beam welding of copper-stainless steel. *Mater. Sci. & Engin.*, A 424, 163-173.
6. GOST 1050-2013: *Metal products from non-alloy structural quality and special steels. General specification* [in Russian].
7. GOST 10885-85: *Sheet hot rolled two-layered corrosion-resistant steel. Specification* [in Russian].

І. П. Серебряник, М. Г. Атрошенко,
М. А. Полешук, О. Л. Пузрін, О. В. Шевцов

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.
03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

ВЛАСТИВОСТІ СТАЛЕМІДНОГО БІМЕТАЛУ,
ОТРИМАНОГО НАПАЙКОЮ
В АВТОНОМНОМУ ВАКУУМІ

Визначено, що при напайці міді на сталь в умовах автономного вакууму в зоні контакту утворюється ділянка підвищеної мікротвердості, яка усувається стандартною для сталі термічною обробкою. Показано, що вміст вуглецю в сталі не робить істотного впливу на властивості перехідної зони мідь-сталь. Встановлено, що в умовах напайки в автономному вакуумі взаємодія рідкої міді зі сталлю не призводить до утворення тріщин в зоні з'єднання. Визначено, що збільшення часу контакту рідкої міді зі сталлю призводить до утворення крихких структур, що знижує ударну в'язкість з'єднання. При випробуваннях на статичний розтяг руйнування сталемідного з'єднання відбувається по мідній частині. При цьому властивості міцності напаяного шару перевищують довідкові дані для деформованої і відпаленої міді. Бібліогр. 7, табл. 2, рис. 9.

Ключові слова: напайка міді на сталь в автономному вакуумі, сталемідний біметал, структура і властивості перехідної зони

I. P. Serebryanik, M. G. Atroshenko, M. A. Poleshchuk,
A. L. Puzrin and A. V. Shevtsov

E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: office@paton.kiev.ua

PROPERTIES OF STEEL-COPPER BIMETAL PRODUCED
BY BRAZING IN AUTONOMOUS VACUUM

It is determined that brazing of copper on steel under conditions of autonomous vacuum in contact zone promotes formation of an area of increased microhardness, which is eliminated by standard for steel heat treatment. It is shown that content of carbon in steel does not promote significant effect on properties of copper-steel transition zone. It is stated that interaction of liquid copper with steel does not result in formation of cracks in the joint zone under conditions of brazing in autonomous vacuum. It is determined that increase of time of contact of liquid copper with steel results in formation brittle structures that decrease joint impact toughness. Fracture of steel-copper joint takes place along copper in static tensile tests. At that strength properties of brazed layer exceed reference data for deformed and annealed copper. 7 Ref., 2 Tabl., 9 Fig.

Keywords: brazing of copper on steel in autonomous vacuum, steel-copper bimetal, structure and properties of transition zone.

Поступила в редакцію 27.03.2018

Международная научно-техническая конференция НОВЫЕ И НЕТРАДИЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В РЕСУРСО- И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИИ

(к 100-летию Одесского национального политехнического университета)

26-29 сентября 2018 г.

Одесса

ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ



Перспективные технологии и производственные процессы будущего.
Пути экономии материальных ресурсов и энергоресурсов при изготовлении машин.
Микро- и нанотехнологии в машиностроении.
Высокоэффективные технологии комбинированной обработки.
Высокопроизводительные инструменты в металлообработке.
Современные ресурсосберегающие технологии.
Пути автоматизации технологических процессов в машиностроении.
Эколого-энергетические нетрадиционные технологии и их продвижение в технику.
Методические вопросы высшего образования в области новых технологий.

04074, г. Киев, ул. Автозаводская, 2. АТМ України
Тел. /Факс +38-044-430-85-00, www.atmu.net.ua