

рівномірність може викликати в подальшому небажану деформацію ствола при термообробці та в процесі його експлуатації. Більш рівномірний розподіл в даному випадку забезпечує матриця з двох західною гвинтовою кромкою.

Висновки. Запропонований новий спосіб внутрішнього профілювання товстостінних труб має фундаментальну відмінність від уже існуючих, оскільки виконання робочої поверхні матриці у вигляді гвинтової лінії викликає зсуви в трьох взаємно перпендикулярних площинах і призводить до збільшення дотичних напружень в осередку деформації, а отже, згідно умови пластичності, зменшення нормальних розтягуючих.

Проведене комп'ютерне моделювання процесів з різною геометрією робочої кромки матриці з одного боку підтвердило зроблені припущення, з іншого боку показало, що для досягнення суттєвого ефекту по зменшенню розтягуючих напружень в небезпечному перетині та збільшенню рівномірності деформацій по товщині стінки заміни циліндричної робочої кромки на гвинтову недостатньо. Тому в подальших дослідженнях для збільшення дотичних напружень та деформацій зсуву в осередку деформації доцільно матриці надавати не тільки поступальний рух, а й обертальний навколо осі заготовки.

Список літератури: **1.** *Бабах Ф.К.* Основы стрелкового оружия. – СПб.: ООО «Издательство «Полигон», 2003. – 253 с. **2.** *Туктанов А.Г.*, Технология производства стрелково – пушечного и артиллерийского оружия: учебник для студентов вузов. – М.: Машиностроение, 2007. - 375 с. **3.** *Стеблюк В. І., Шкарлута Д. Б., Лагно Ю. В., Розов Ю. Г.* Сучасні технології виготовлення стволів стрілецької зброї// Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2007. – № 4. – с. 18 – 22.

УДК 621.791.76: 621.7.044.2

ЗАГОРЯНСКИЙ В.Г., канд., техн., наук, доц.,

ПУЗЫРЬ Р.Г., канд., техн., наук, доц.,

КНУ имени Михаила Остроградского, Кременчуг

ПОЛУЧЕНИЕ СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ МЕДНО-АЛЮМИНИЕВЫХ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ

Статья посвящена созданию технологии сварки взрывом медно-алюминиевой композиции. Исследования механических и электрофизических свойств полученных композиций показали приемлемые с качественной и количественной точки зрения значения этих свойств, таких как угол изгиба, прочность на отрыв слоев, сопротивление биметалла срезу, переходное электрическое сопротивление. Результаты механических и электрофизических испытаний позволяют использовать разработанную технологию в промышленном масштабе.

Стаття присвячена створенню технології зварювання вибухом мідно-алюмінієвої композиції. Дослідження механічних і електрофізичних властивостей отриманих композицій показали прийнятні з якісної і кількісної точки зору значення цих властивостей, таких як кут вигину, міцність на відрив шарів, опір біметала зрізу, перехідний електричний опір. Результати механічних і електрофізичних випробувань дозволяють використовувати розроблену технологію в промисловому масштабі.

Article is devoted creating of technology of explosion welding of copper-aluminium composition. Researches of mechanical and electrophysics properties of the got compositions which rotined the acceptable from the high-quality and quantitative point of view values of these properties are conducted, such as a corner of bend, durability on tearing away of layers, resistance of bimetal to the cut, transitional electric resistance. The results of mechanical and electrophysics tests allow to use the developed technology in an industrial scale.

При производстве электротехнического оборудования на предприятиях Украины, в частности на предприятии "АМВ Ампер" (г. Кременчуг), выпускающем высоковольтную аппаратуру, в качестве токоподводящих шин используются медные листы. В связи с дороговизной листовой меди (цена листового проката меди М1 составляет около 100 грн/кг) возникла необходимость в замене медных листов аналогичным или близким по проводящим свойствам материалом.

Наиболее рациональным решением таких задач как экономия дорогостоящей меди и снижение потерь электроэнергии в контактных узлах силовых электрических цепей является применение получаемых сваркой взрывом качественных медно-алюминиевых или сталемедных композиционных деталей электрических цепей.

Опыт использования в энергетике, электрометаллургии и других отраслях биметаллических медно-алюминиевых токоподводящих элементов [1-5] позволяет считать перспективным использование биметалла алюминий-медь при производстве электротехнического оборудования.

При изготовлении токоведущих шин и проводов взамен меди все чаще применяется алюминий или медно-алюминиевая композиция.

Технологические особенности сваркой взрывом позволяют обеспечить высокие электрофизические характеристики, а также надежные механические свойства композиционных элементов. Кроме того, биметаллические проводники имеют, как правило, меньшую массу и более высокую коррозионную стойкость.

Основу технологического процесса составляет сварка взрывом биметаллических заготовок толщиной 8...10 мм с последующей их холодной прокаткой до требуемой толщины. Из полученных листов с высокой чистотой поверхности вырезаются либо штампуются готовые изделия нужных типоразмеров и форм.

Цель работы – обосновать технологию сварки взрывом требуемой слоистой медно-алюминиевой композиции, используя материалы предыдущих исследований и известные методики; исследовать механические и электрофизические свойства полученных композиций для оценки приемлемости и эффективности использованной технологии.

Задача состояла в том, чтобы сваркой взрывом получить медно-алюминиевую композицию при таких требованиях: материал основы (неподвижной пластины) - алюминиевый лист из алюминия АД0 толщиной 8 мм, материал плакирующего слоя (метаемой пластины) - медный лист из меди М1 толщиной 2 мм.

В качестве основного слоя использовались пластины из листового проката алюминия (межгосударственный стандарт ГОСТ 21631-76. Листы из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия) марки АД0 (межгосударственный стандарт ГОСТ 4784-97. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки) толщиной 8 мм, размеры в плане - 400×100 мм.

В качестве плакирующего слоя использовались пластины из листового проката меди (межгосударственный стандарт ГОСТ 495-92. Листы и полосы медные. Технические условия) марки М1 (ГОСТ 859-2001. Медь. Марки; также химический состав указан в ГОСТ 1535-2006. Прутки медные. Технические условия) толщиной 2 мм, размеры в плане - 400×100 мм.

Технологический процесс подготовки к сварке взрывом и непосредственно сварки взрывом сравнительно небольших по размерам заготовок можно представить последовательностью следующих основных операций [6,7 и др.]:

- 1) выбор схемы сварки и расчет режимов сварки;
- 2) анализ физико-механических свойств исходных составляющих;
- 3) подготовка контактных поверхностей к плакированию;
- 4) подготовка основания;
- 5) установка свариваемых заготовок;
- 6) подготовка заряда взрывчатого вещества (ВВ) и его установка (засыпка) на метаемую пластину;
- 7) монтаж электровзрывной цепи;
- 8) непосредственная сварка пакета.

При сварке медно-алюминиевой композиции была применена прямая схема с параллельным расположением пластин без бокового нависания.

Величина зазора определяется в основном толщиной метаемой пластины, обычно ее принимают равной $h = (1 \dots 1,5)\delta_1$ [6,7].

Зазор между свариваемыми пластинами составлял 2 мм, принятый равным толщине метаемой медной пластины.

Чтобы обеспечить высокую и стабильную прочность соединения, необходимо выдержать равномерную по всей поверхности свариваемых листов оптимальную для данного сочетания металлов величину начального зазора h [6].

Неравномерность начального зазора приводит к изменению параметров соударения на отдельных участках, что вызывает неоднородность структуры и свойств сварного соединения по площади биметаллического листа. В нем также появляются непривары, пузыри, иногда даже разрушение плакирующего слоя. Требуемый зазор между листами обеспечивают установкой каких-либо опор (проставок) по всей поверхности с определенным интервалом. Опоры не должны деформироваться под действием массы плакирующего листа с зарядом взрывчатого вещества, смещаться при установке листов или транспортировке пакета, ухудшать качество сварки.

В качестве опор применялись спички без головок.

Практика сварки взрывом показала, что прогиб исходных листовых заготовок не должен превышать 5...10 мм на погонный метр [8]. Несоблюдение этого требования приводит к недопустимому колебанию сварочного зазора и, как

следствие, к нестабильности свойств биметаллических заготовок по площади вплоть до отсутствия прочности или появления непроваров.

Исходные материалы не должны иметь внутренних дефектов (включений, пор, трещин), в противном случае возможно разрушение.

Поверхности подготавливаемых к сварке заготовок в исходном состоянии почти всегда покрыты загрязнениями (окалиной, ржавчиной; влагой, пылью, оксидными пленками, маслом, консервационным материалом и др.)

В связи с тем, что листы основного и плакирующего слоя являются в холоднокатаным материалом, изначально имеющим удовлетворительные геометрические свойства поверхности и низкую шероховатость, их поверхность подвергалась шлифовке до необходимой шероховатости $Ra \leq 6,3$ мкм, при этом одновременно поверхность освобождалась от имеющихся окисных пленок.

Важным этапом подготовки контактных поверхностей к плакированию является обезжиривание. Обычно за ним следуют или ему предшествуют другие способы обработки поверхности. Наибольшее распространение при сварке взрывом получили органические растворители [9].

Обезжиривание выполнялось акриловым растворителем.

В качестве основания использовалась стальная плита толщиной 30 мм с размерами в плане 1000×500 мм.

На подготовленное основание укладывалась нижняя (неподвижная) пластина, а затем с определенным зазором параллельно устанавливалась метаемая пластина.

Для проведения сварки взрывом необходимо, чтобы свариваемые пластины располагались на определенном расстоянии друг от друга, высота заряда над всей метаемой пластиной сохранялась одинаковой [9].

Высота заряда сохраняется одинаковой над всей пластиной благодаря применению специальных контейнеров под взрывчатое вещество. После установки метаемой пластины на ней располагают контейнер (коробку) под заряд взрывчатого вещества, высота бортов которого равна требуемой толщине слоя заряда. Обычно контейнер изготавливают из плотного картона, фанеры или досок. Контейнер представляет собой открытую сверху коробку с дном, в котором вырезано отверстие по размеру неподвижной пластины. Дно вырезают для того, чтобы взрывчатое вещество непосредственно прилегало к поверхности пластины, иначе прослойка воздуха между картоном и пластиной разрушает поверхность последней. Высота контейнера рассчитывается по зависимости [9]:

$$H = \frac{27}{8} \delta_1 \frac{\rho_1 v_{\max}}{\rho_e D} \left(1 - \frac{v_{\max}}{D} \right)^{-2}, \quad (1)$$

где v_{\max} на 20-40% превышает скорость метания.

Для взрывчатого вещества был изготовлен из картона контейнер по контуру свариваемых пластин высотой 30 мм (по расчету получено 27 мм).

Подбор взрывчатого вещества представляет собой сложную задачу. Дополнительные трудности возникают вследствие того, что свойства взрывчатого вещества зависят от окружающей среды – ее влажности, температуры, времени пребывания взрывчатого вещества на воздухе и т.п. причин. Также проблемным

является то обстоятельство, что промышленные взрывчатые вещества в большинстве случаев не пригодны для сварки из-за высокой скорости детонации.

Для сварки взрывом наиболее применимы взрывчатые вещества на основе аммиачной селитры – аммониты, аммотолы. В подавляющем большинстве случаев для решения практических задач в мировой практике используют свежеприготовленные смеси аммонита № 6ЖВ (или его аналогов) с аммиачной селитрой, кварцевым песком, поваренной солью, тальком и др. инертными наполнителями. Эти смеси хорошо изучены, а их детонационные характеристики представлены в виде таблиц, графиков или эмпирических зависимостей, используя которые и предварительно задавшись составом смеси, определяют высоту заряда H , обеспечивающую необходимую скорость детонации $D = v_k$.

Использовалось широко применяемое при сварке взрывом взрывчатое вещество – смесь аммонита № 6ЖВ и гранулированной аммиачной селитры в соотношении 1:1.

Свойства аммонита № 6ЖВ регламентирует межгосударственный стандарт ГОСТ 21984-76. Вещества взрывчатые промышленные. Аммонит № 6ЖВ и аммонал водоустойчивые. Технические условия.

Аммонит № 6ЖВ – сыпное взрывчатое вещество (тротил – 79%, аммиачная селитра – остальное). Удельная теплота взрыва – 4,3 МДж/кг. Насыпная плотность – 0,8...0,85 г/см³. Скорость детонации – 3,6...4,8 км/с. Критический диаметр детонации открытого заряда – 10...13 мм.

Масса взрывчатого вещества принимается равной массе метаемой пластины, откуда, зная плотность взрывчатого вещества, находится необходимая высота заряда взрывчатого вещества. Опытные данные показывают [9], что аммонит № 6ЖВ имеет плотность 0,8...0,9 г/см³, смеси аммонита с аммиачной селитрой – 0,9...1,0 г/см³.

Высота слоя взрывчатого вещества была принята равной 25 мм.

Для подрыва взрывчатого вещества применялся электродетонатор ЭД-8ПМ, установленный в центре засыпанного в картонный контейнер взрывчатого вещества.

Режимы сварки взрывом, принятые на основе экспериментального и производственного опыта, и проверенные экспериментально, обеспечили получение сварного шва требуемой геометрии и достаточной прочности.

Механические испытания полученных медно-алюминиевых композиций проводились в соответствии с методиками для биметаллов, приведенных в [7,11].

При испытании на изгиб с разгибом образцы загибают вокруг оправки диаметром, равным удвоенной толщине листа, на угол 45, 60, 90 и 120 ° (плакирующим слоем внутрь и наружу). Нарушения соединения при этом обычно не происходит. Затем образцы разгибают до появления расслоя. Напряжения, вызывающие расслоение образца при этом способе, выше, чем при обычном испытании на изгиб. Это позволяет выявлять разницу в прочности соединения партии образцов, прошедших испытания на обычный изгиб без расслоения.

Испытания на изгиб с помощью ударного штампа на оправке радиусом 5 мм медным слоем наружу четырех образцов размерами 10×15×200 мм (принято в

соответствии с [12]) показали, что угол предельный угол изгиба α_n во всех случаях превышает 25° .

Изменение прочности на отрыв слоев сваренного взрывом медно-алюминиевого композита показало, что $\sigma_{отр}$ для четырех образцов лежит в пределах 80...95 МПа.

Испытание на срез сварных соединений показало, что разрыв соединения происходит не по шву, а по наименее прочному материалу пары - алюминию, прочность на разрыв составила 88...65 МПа, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к биметаллу.

В результате проведенных опытов по измерению единичного переходного электросопротивления медно-алюминиевого биметалла с различным содержанием оплавленного металла в сварном шве установлено, что в соединении с практически «чистой» границей (относительное количество оплавов по длине не превышает 5%) $\rho L_{пер}$ составляет приблизительно 30...35 мкОм·мм².

ВЫВОДЫ. 1. Разработана технология сварки взрывом медно-алюминиевого композита М1+АД0 толщиной 2+8 мм. Для этого сочетания материалов и их толщин экспериментально опробована методика подготовки под сварку соединяемых материалов и заряда взрывчатых веществ, на основании экспериментального и производственного опыта определены параметры взрывчатого вещества и режимы сварки.

2. Проведены исследования механических и электрофизических свойств полученных сваркой взрывом композиций, которые показали приемлемые с качественной и количественной точки зрения значения этих свойств, таких как угол изгиба, прочность на отрыв слоев, сопротивление биметалла срезу, переходное электрическое сопротивление. Результаты механических и электрофизических испытаний позволяют использовать разработанную технологию в промышленном масштабе.

Список литературы: 1. Слоистые композиты на основе алюминия и их свойства / Ю. П. Трыков, Л.М.Гуревич, В. Г. Шморгун. – М.: Металлургиздат, 2004. – 230 с. 2. Исследование электрофизических характеристик сваренных взрывом биметаллических соединений / В.С. Седых, В.Я. Смелянский, В.А. Хрипунов, О.Н. Еронов // Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Сб. науч. тр. ВПИ. – Волгоград: ВПИ, 1989. - С. 14-22. 3. Энергосберегающие композиционные элементы токоподводящих узлов силовых электрических цепей / Е.А. Чугунов, В.И. Лысак, С.В. Кузьмин, А.П. Пеев и др. // Энергетик. – 2001. - №9. – С. 13-15. 4. Исследование свариваемости взрывом, структуры и свойств медно-алюминиевого биметалла / С.В. Кузьмин, В.И. Лысак, А.П. Пеев // Изв. ВолгГТУ. Сер. Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2006. - Вып. 2, № 9. - С. 37-45. 5. Медно-алюминиевые композиционные материалы, полученные сваркой взрывом / И.С. Лось, Д.Б. Крюков, А.В. Хорин // Известия ВолгГТУ. Сер. Сварка взрывом и свойства сварных соединений. Волгоград. – 2010. - №5. – С. 88-92. 6. Биметаллы / Л.Н. Дмитриев, Е.В. Кузнецов, А.Г. Кобелев и др. - Пермское книжное изд., 1991. – 415 с. 7. Технология слоистых металлов: Учебн. пособие / А.Г. Кобелев, И.Н. Потапов, Е.В. Кузнецов. – М.: Металлургия, 1991. – 248 с. 8. Сварка и свариваемые материалы: В 3-х т. Т. II. Технология и оборудование. Справ. изд./Под ред. В.М. Ямпольского. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 1996. – 574 с. 9. Соннов А.П. Технология сварки и резки металлов взрывом. – Волгоград: Изд-во ВПИ, 1984. – 70 с. 10. Казак Н.Н. Свойства и области применения сварных соединений, полученных сваркой взрывом: учеб.

пособие. – Волгоград: ВПИ, 1984. – 77 с. **11.** Исследование свариваемости взрывом, структуры и свойств медно-алюминиевого биметалла / С.В. Кузьмин, В.И. Лысак, А.П. Пеев // Изв. ВолгГТУ. Сер. Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2006. – Вып.2, №9. - С. 37-45.

УДК 621.77

МИХАЛЕВИЧ В. М., докт. техн. наук, проф., ВНТУ, Вінниця
КРАЄВСЬКИЙ В. О., канд. техн. наук, доц., ВНТУ, Вінниця

ОПТИМІЗАЦІЯ ГАРЯЧОГО ЦИКЛІЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ІЗ ПАУЗАМИ

В работе сформулирована и решена задача определения параметров горячего циклического деформирования с паузами, при которых за заданное время материал получает наибольшую деформацию. Проведен сравнительный анализ результатов оптимизации с известными экспериментальными данными деформирования с постоянной скоростью.

У роботі сформульована та розв'язана задача визначення параметрів гарячого циклічного деформування із паузами, при яких за заданий час матеріал здобуває найбільшу деформацію. Проведений порівняльний аналіз результатів оптимізації із відомими експериментальними даними деформування із сталою швидкістю.

In the work the problem of definition of parameters of hot cyclic deformation with pauses at which the material receives the greatest deformation for set time is formulated and solved. The comparative analysis of optimisation results with known experimental data of deformation with constant speed is carried out.

У роботі [1] сформульована задача визначення оптимального режиму гарячого пластичного деформування, при якому за заданий час t_* матеріал здобуває без руйнування найбільшу деформацію ε_*

$$\varepsilon_* = \int_0^{t_*} \dot{\varepsilon}_u(\tau) \cdot d\tau \rightarrow \max, \quad (1)$$
$$\begin{cases} \int_0^{t_*} \varphi(t_* - \tau; I(\tau)) \cdot f(\dot{\varepsilon}_u(\tau)) \cdot d\tau = 1, \\ \int_0^t \varphi(t - \tau; I(\tau)) \cdot f(\dot{\varepsilon}_u(\tau)) \cdot d\tau \leq 1, \forall t \in (0, t_*), \end{cases}$$

де t, τ – час; $\varphi(t - \tau, I(\tau))$ – ядро спадковості; f – деяка функція; $\dot{\varepsilon}_u(\tau)$ – швидкість деформування.

При розв'язанні задачі (1) в області неперервних функцій виникли труднощі із врахуванням останньої умови [2]. Тому надалі розв'язок шукався в області кусково-сталих функцій. На основі існування розв'язку для двоетапної зміни швидкості деформування зроблено висновок, що шуканий розв'язок задачі (1) відноситься до класу деформування із змінною швидкістю [3]. У роботі [4] досліджено процес гарячого деформування із паузами і відмічено, що під час паузи відбувається відновлення пластичності матеріалу. Модель накопичення