ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕДНОГО ТОЛСТОСТЕННОГО ИЗДЕЛИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Семашко В.В., Судник Л.В., Смирнов Г.В., Конопляник В.А.,
Демидов Д.В, Микулич Д.А., Силин В.В.

ОХП «Научно-исследовательский институт импульсных процессов с опытным производством» Государственное научное учреждение «Институт порошковой металлургии»
Минск, Республика Беларусь

В работе представлена разработка конструкции сегментов медного толстостенного изделия (МТИ) для их соединения плакировкой медными пластинами, расчет параметров сварки и штамповки взрывом, отработка технологических режимов сварки взрывом, термической обработки и штамповки взрывом. Установлено, что комбинирование интенсивной пластической деформации при сварке взрывом и термической обработки позволяет получать в конечном итоге изделие с высоким качеством сварного соединения, соответствующее требованиям по прочности связи и допускам формы.

Ключевые слова: сварка и штамповка взрывом, медные толстостенные изделия, плакирование, композиционные материалы, метание пластин, волновые явления

PRINCIPLES OF HIGH ENERGY IMPULSE TECHNOLOGIES FOR MANUFACTURE OF COPPER THICK-WALLED ELECTROTECHNICAL APPARATUS

Semashko V.V., Sudnik L.V., Smirnov G.V., Konoplyanik V.A.,
Demidov D.V., Mikulich D.A., Silin V.V.

Research Institute of Pulse Processes with Pilot Production
Minsk, Republic of Belarus

The paper presents the development of the design of segments of a copper thick-walled product for their connection by plating copper plates, calculation of welding parameters and explosion stamping, testing of technological modes of explosion welding, heat treatment and explosion punching. It has been found that the combination of intensive plastic deformation during explosion welding and heat treatment makes it possible to ultimately obtain a product with a high quality of welded joints that meets the requirements for bond strength and shape tolerances.

Keywords: welding and stamping by explosion, copper toothene products, placting, composite materials, floatting plates, wave phenomena

E-mail: lab414@mail.ru

Введение

Медные толстостенные изделия (МТИ) электротехнического назначения предназначены для снятия токов Фуко возникающих в электромагнитном поле между вращающимися элементами. При изготовлении к МТИ предъявляются общие повышенные требования в отношении механической прочности и электропроводности. Наряду с повышенными механическими и физическими свойствами следует иметь в виду технологичность, которая включает свойства, обеспечивающие возможность придания изделию конечной формы и состояния, включая способность к деформации и сварке.

Основной проблемой при изготовлении крупногабаритных МТИ методом ручной дуговой сварки отдельных секторов в единое кольцо является большая трудоемкость технологического процесса, наличие пор в зоне сварного соединения, низкие адгезионные свойства наплавляемого материала с основой, коробление заготовок, наличие в рабочей зоне сварочных аэрозолей и токсичных веществ.

В этом случае широкие возможности при создании такого рода изделий открывает технология сварки и штамповки взрывом [1,2]. Комбинирование интенсивной пластической деформации и термомеханической обработки позволяет получать в конечном итоге изделие с высоким качеством сварного соединения, соответствующее требованиям допуска формы и расположения.

Целью настоящей работы являлась разработка конструкции сегментов медного толстостенного изделия (МТИ) для их соединения плакировкой медными пластинами, расчет параметров сварки и штамповки взрывом, отработка технологических режимов сварки взрывом, термической обработки и штамповки взрывом.

Для достижения цели решались следующие задачи:

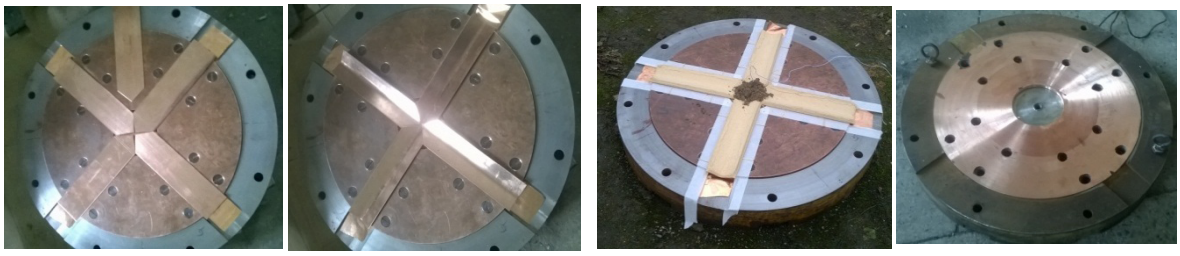
– выполнялись теоретические расчеты параметров сварки и штамповки взрывом;

– разрабатывались технологические схемы и конструкторские решения по реализации плакирования и штамповки взрывом;

– оптимизировались технологические параметры изготовления изделия.

Основная часть

Основные этапы подготовительных работ для выполнения операции сварки взрывом отображены на рис. 1.



а *б* *в* *г*

Рис. 1. Подготовительные работы перед сваркой взрывом секторов МТИ:
а – сборка секторов с подложкой на стальной матрице; *б* – профилирование метаемых медных пластин в пазах секторов; *в* – установка над плакируемыми секторами медных пластин с зарядами и средством инициирования;
г – заготовка МТИ после предварительной механической обработки

Плакировка медных секторов пластинами проходила многостадийно. Включала сварку тонколистовой заготовки по рассчитанным режимам (рис. 2), обработку статическим давлением, механическую обработку и обезжиривание плакируемой поверхности. После каждого перехода осуществлялся ультразвуковой контроль зоны сварного шва на выявление непроваров и расслоений.

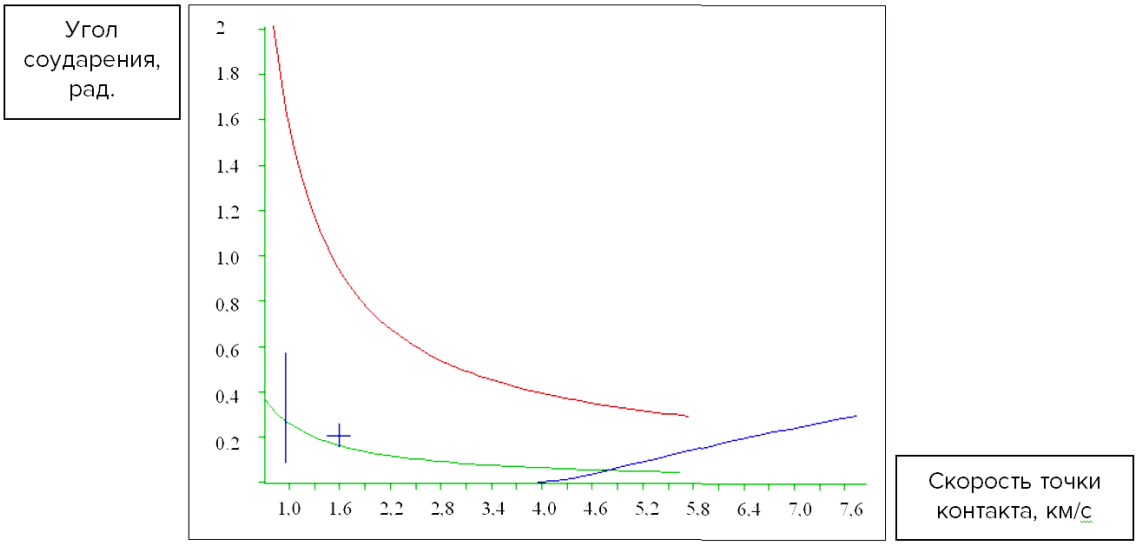


Рис. 2. Расчетная область параметров сварки взрывом медного листа толщиной 2 мм с медной плитой толщиной 16 мм в координатах угол соударения (рад.) скорость точки контакта (км/с)

На рис. 3 представлена зависимость максимальной и минимальной величины заряда от толщины метаемого листа меди. На рис. 4 представлена зависимость величины тепловыделения в зоне сварки от толщины метаемого листа меди. В табл. 1 представлены расчетные значения технологических параметров сварки взрывом медных листов с различными толщинами.

Табл. 1

Технологические параметры сварки взрывом

Толщина медного листа, мм	Высота заряда в вершине угла, мм	Высота заряда в конце заготовки, мм	Величина зазора в вершине, мм	Угол установки, рад	Тепловыделение при сварке, МДж/м^2
1,0	8,03	6,37	1,02	0,057	0,44707
1,5	10,51	8,02	1,18	0,075	0,65142
2,0	12,94	9,62	1,34	0,084	0,84446
3,0	17,73	12,76	1,67	0,096	1,2000
4,0	22,46	15,83	2,00	0,101	1,5200
5,0	27,15	18,86	2,33	0,106	1,8095
6,0	31,80	21,86	2,65	0,109	2,0728
8,0	41,05	27,79	3,29	0,113	2,5333
10,0	50,24	33,66	3,92	0,115	2,9232

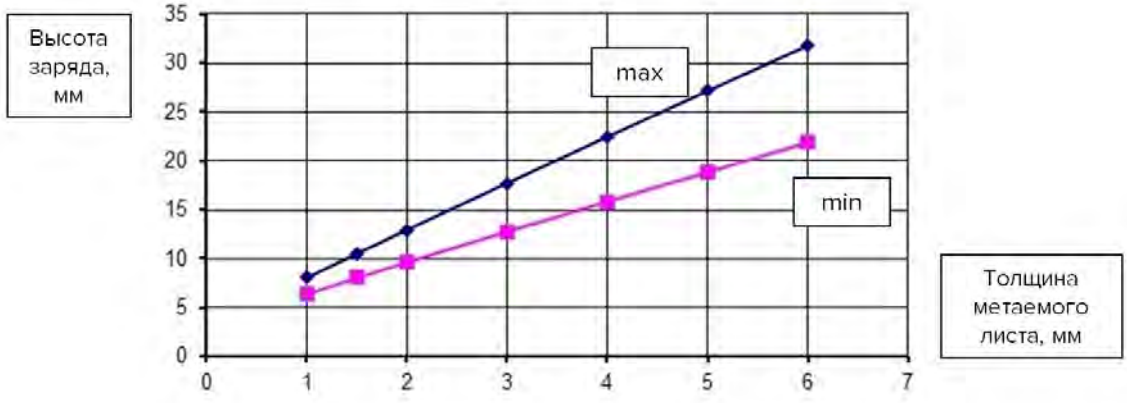


Рис. 3. Зависимость максимальной и минимальной величины заряда от толщины метаемого листа меди

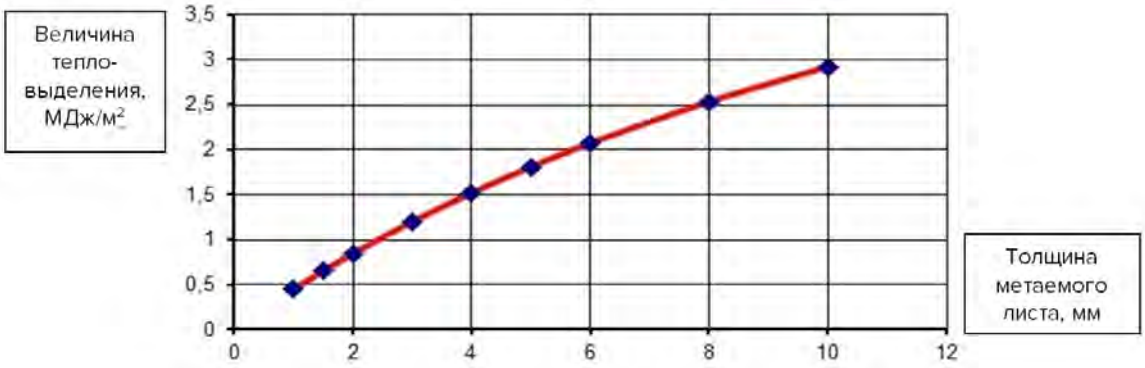
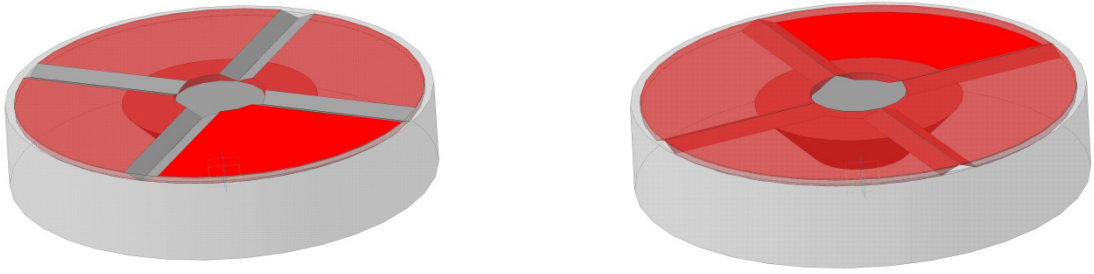


Рис. 4. Зависимость величины тепловыделения в зоне сварки от толщины метаемого листа меди

Исходя из расчетов и опыта работы было принято решение на первом этапе использовать режимы сварки взрывом внахлест с использованием сравнительно узких тонколистовых метаемых заготовок меди, последовательно навариваемых на стык толстолистовых заготовок, с набором необходимой толщины многослойного шва.



а *б*

Рис. 5. Матрица для сварки и штамповки взрывом в сборе с сегментами в состоянии перед сваркой взрывом по схеме пазом вверх (*а*) и по схеме пазом на матрицу (*б*)

Для предотвращения чрезмерной деформации свариваемых сегментов экрана и для последующей штамповки заготовки медного экрана была спроектирована и из-

готовлена специальная оснастка для сварки и штамповки взрывом, представленная на рис. 5 в сборе с сегментами и центральной вставкой, которая извлекается затем перед операцией штамповки конусной части, после выполнения всех операций сварки сегментов в кольцо.

Образцы, представленные для проведения испытаний: на испытания был передан девятислойный образец композиционного материала электротехнического назначения «медь М1Е – медь М1Е». Видимых дефектов – расслоений и трещин – не наблюдалось.

Результаты испытаний физико-механических свойств экспериментальных образцов композиционного материала электротехнического назначения «медь М1Е – медь М1Е» (рис. 1), вырезанных из зоны стыка сегментов в поперечном направлении к линии стыка после выполнения всех операций сварки внахлест, приведены в табл. 2.

Табл. 2

Результаты испытаний физико-механических свойств экспериментальных образцов композиционного материала электротехнического назначения «медь М1Е – медь М1Е»

Номер образца	Модуль, МПа	Нагр. при пред.тек. 0,2% Н	Усл. пред тек.при 0,2% , МПа	Макс. нагр., Н	Врем, сопр., МПа	Относит. удлинение, %	Относит. сужение, %
1.0	20800	3340	92.3	10100	278	2.25	100
2.0	32000	2330	51.6	17800	395	6.50	100
3.0	16500	3240	72.6	17500	392	4,0	100

Растяжению подвергались как собственно стык, так и слои на срез слоя. Результаты подобных испытаний свидетельствуют об удовлетворительном качестве сварки с прочностью на уровне прочности исходного материала. Разброс в значениях прочности связан с человеческим фактором, поскольку подготовка под сварку слоев проводилась вручную и была чрезвычайно трудоемка. Пониженная прочность наблюдалась главным образом вблизи внутреннего края кольца на разгонном участке движения метаемой пластины, которую невозможно было выполнить с достаточным запасом по длине по причине малого диаметра внутреннего круга, где должны были уместиться все четыре пластины с генератором волны детонации. Эти трудности отсутствуют при сварке полномасштабного варианта кольца.

При испытании образцов N° 1–3 видно, что при прохождении траверсы происходило плавное повышения нагрузки при растяжении до значения порядка 17 кН – образцы N° 1 – 2, 9 кН – образец N° 3, после чего происходит резкий спад нагрузки, свидетельствующий о нарушении геометрии и пластическом деформировании образцов. Временное сопротивление (предел прочности) материала при растяжении составляет:

– 278 МПа – образец N° 1;

– 395 МПа – образец N° 2;

– 392 МПа – образец N° 3.

Металлографические исследования образцов в продольном (рис. 7) и поперечном (рис. 8) направлениях проводились на световом микроскопе “MeF-3” фирмы “Reichert” (Австрия) на шлифах при увеличении × 50.

Металлографическим исследованием установлено, что зона сварного шва «медь М1Е – медь М1Е» имеет волнообразный вид, характерный для сварки взрывом, без видимых непроваров и других дефектов. В зоне сварки наблюдается повышение микротвёрдости металла, связанное с его деформационным упрочнением.

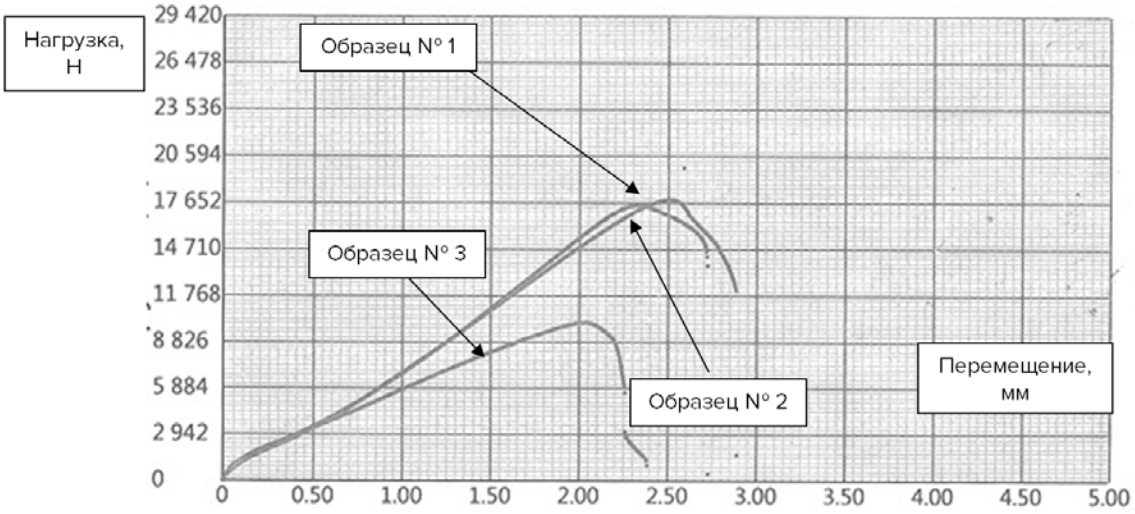
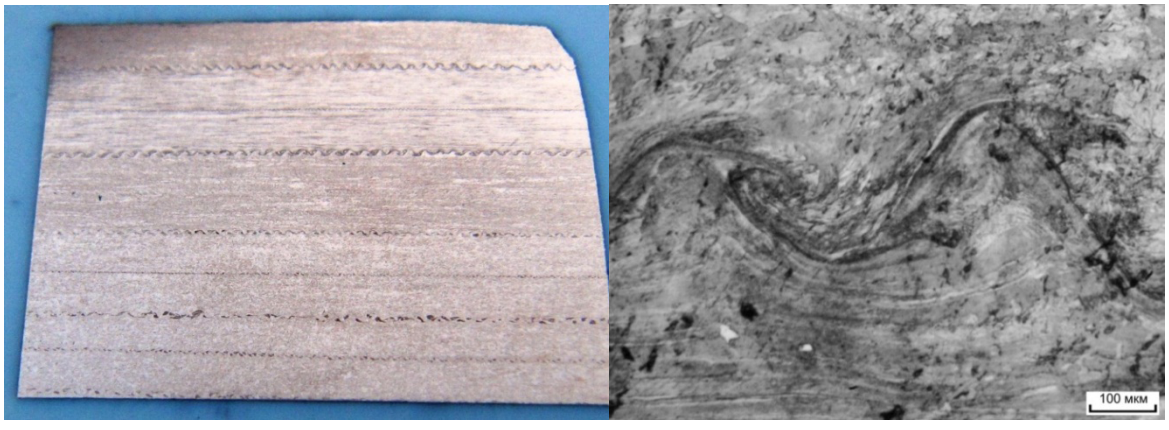
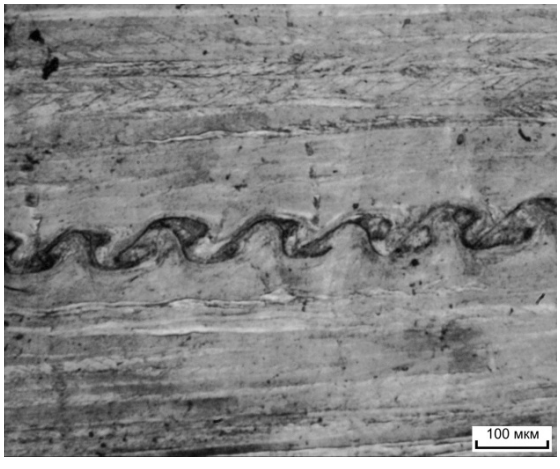
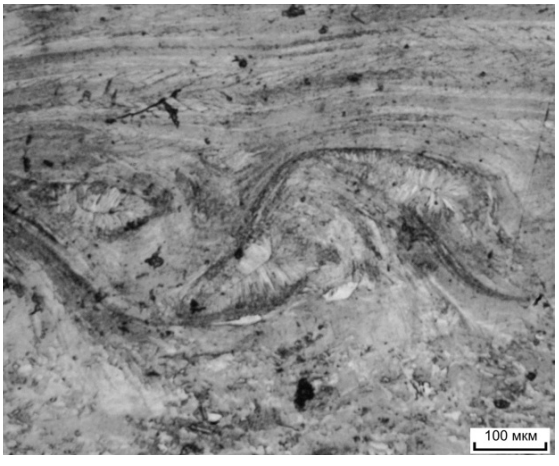


Рис. 6. График зависимости нагрузки от перемещения траверсы при испытании экспериментальных образцов композиционного материала электротехнического назначения «медь М1Е – медь М1Е»



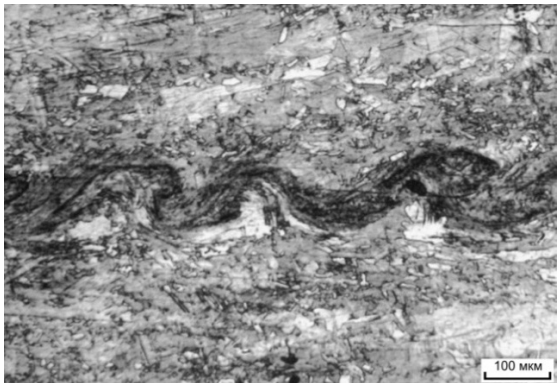
а ×7 *б* ×50

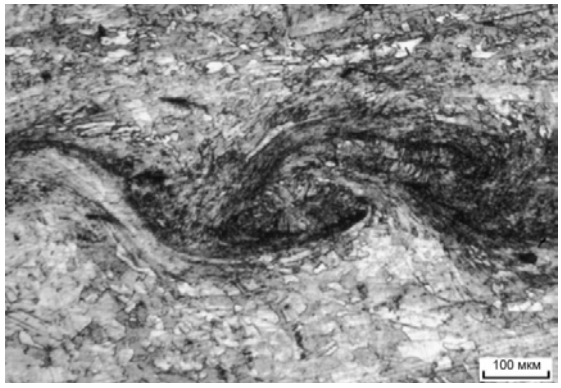




в ×50 *г* ×50

Образец № 1



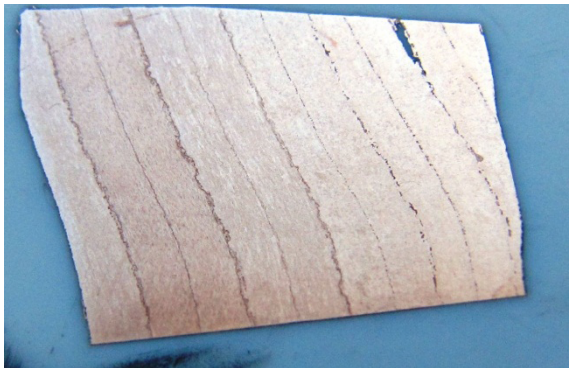


д ×50 *е* ×50

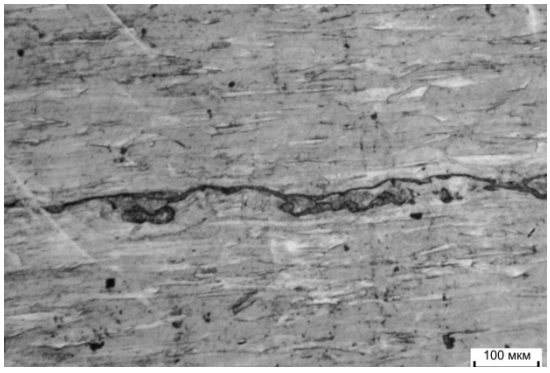
Рис. 7. Металлографические исследования образцов в продольном направлении: *а* – исследуемый шлиф (сечение в продольном направлении); *б* – зона сварки 1–2 слоев; *в, г, д, е* – зоны сварки 2–3 слоев, 3–4 слоев, 4–5 слоев, 5–6 слоев

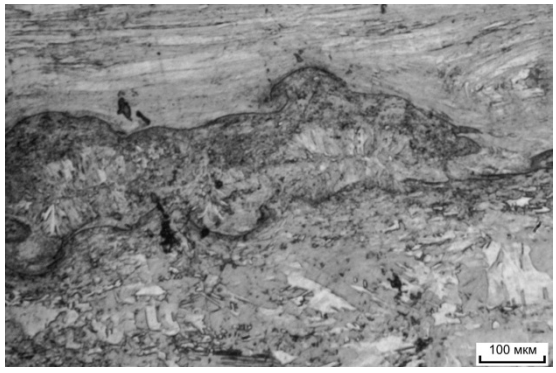
Параметры волн определяются режимами сварки. В данном случае сварка выполнялась метанием двух пластин. Верхняя пластина имела больший разгонный участок, по отношению к нижнему, следовательно, и волна имеет более выраженный характер. На границе раздела образовалась зона вихревых волн. Имеются оплавления. Присутствуют дендриты при кристаллизации меди. У границы соединения наблюдается характерное для сварки взрывом повышение микротвердости металла, связанное с его деформационным упрочнением.

В поперечном сечении (рис. 8) в зоне сварки также зафиксированы оплавления с дендритами.



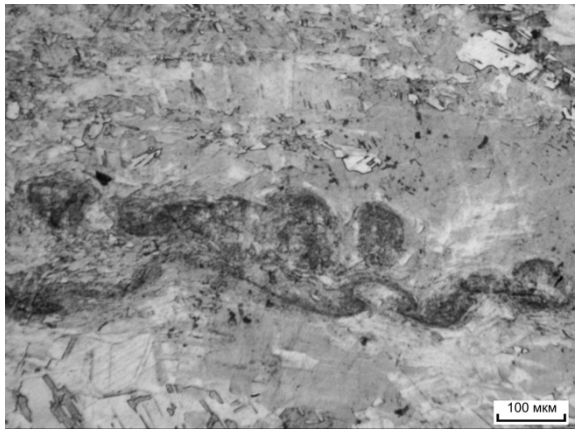
а ×7 *б* ×50





в ×50 *г* ×50

Рис. 8. Образец № 1



д ×50 *е* ×50

Рис. 8. Металлографические исследования образцов в поперечном направлении: *а* – исследуемый шлиф (сечение в поперечном направлении); *б, в, г, д, е* – зоны сварки 1–2 слоев, 2–3 слоев, 3–4 слоев, 4–5 слоев, 5–6 слоев

Штамповка медного толстостенного изделия

Штамповка производилась кольцевым накладным зарядом через слой демпфирующей резины как без вакуумирования объема конической полости под кольцевой заготовкой, так и с вакуумированием полости. Величина заряда взрывчатого вещества рассчитывалась из условия достижения текучести по всему сечению отожженной кольцевой заготовки при соударении ее формуемой области с конической частью матрицы.

Рис. 9. Отпечатки на тыльной стороне отожженного перед штамповкой медного экрана от отверстий в матрице. Отсутствие симметрии по периметру кольцевой части связано с локальным продавливанием тела матрицы после многократных ударов метаемой взрывом заготовки

Последовательность операций штамповки ясна из рисунков представленных ниже (рис. 10). Наличие плотного контакта медного экрана с поверхностью нажимного кольца проконтролировать щупом удалось лишь в зонах паза окантовки матрицы и затем оценить визуально линейкой после извлечения МТИ.

Заготовка медного экрана толщиной 14 мм у матрицы

Нанесение герметика по периметру заготовки

Вакуумирование объема конической выемки

Установка заряда на поверхности резинового пуансона

Установка детонатора

Заготовка после штамповки, вид сверху

Заготовка после штамповки, вид снизу

Заготовка после формовки, вид сбоку

Рис. 10. Последовательность операций взрывной штамповки МТИ

О том, что материал при сжатии находился в состоянии пластического течения свидетельствуют продавленные в крепежные отверстия матрицы участки кольца, а также отпечатки на тыльной стороне экрана от силиконового герметика, который сознательно был нанесен не по периметру заготовки, а ближе к центру заготовки, где не было отверстий, чтобы надежно вакуумировать коническую полость.

Как показало сравнение двух макетов штамповка, выполненная в вакууме полностью повторяла форму конуса, в отличие от первой, где воздух, сжатый в закрытом объеме полости, препятствовал движению заготовки до полного контакта с конической частью матрицы.

Заключение

Выполненный анализ волновых явлений при контактном взаимодействии тел при ударе в широком диапазоне скоростей нагружения позволил оценить реальные возможности применения взрывных технологий для решения задачи сварки и формовки крупногабаритных медных листов. Предложенная математическая модель и методика численного исследования быстропротекающего процесса, основанная на принципах механики деформируемого твердого тела и физики взрыва позволяет промоделировать процессы и подобрать технологические режимы сварки и штамповки.

Разработана инженерная методика расчета технологических параметров сварки металлов взрывом, основанная на результатах экспериментального исследования и численного моделирования задач о метании, соударении и кумуляции энергии в процессе высокоскоростной деформации. Разработан пакет прикладных программ, позволяющий прогнозировать режимы сварки взрывом слоистых материалов. Методика и программное обеспечение прошли апробацию на опытном производстве ОХП «НИИ ИП с ОП».

Изготовлены экспериментальные образцы слоистых материалов. Выполнены металлографические исследования и механические испытания материала в зоне сварки, которые подтверждают наличие металлургической связи металла в зоне стыка с прочностью не ниже прочности основного металла. Установлено, что комбинирование интенсивной пластической деформации при сварке взрывом и термической обработки позволяет получать в конечном итоге изделие с высоким качеством сварного соединения, соответствующее требованиям по прочности связи и допускам формы. Очевидна перспектива получения полномасштабного МТИ электротехнического назначенияс одинаковыми электрическими и механическими свойствами сварных швов и основного металла.

Литература

1. Моделирование и применение высокоскоростных процессов сварки материалов взрывом [Текст] / Г.В. Смирнов [и др] - Киев. Автоматическая сварка 2009, N° 11. С. 16-22.

2. Физика взрыва [Текст]: в 2 т. Т.2/ Л.П. Орленко [и др.] // К.II. Станюкович, В.П. Челышев, Б.И. Шехтер. – Изд. 3-е, испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 656 с. – ISBN 5-9221-0220-6.

REFERENCES

1. Smirnov G.V. Moelirovanie i primenenie visokoskorostnih processov svarki materialov vzrivom [Modeling and application of high-speed processes of welding materials by explosion]. Automatic welding , No. 11, 2009, pp. 16–22. (in Russian)

2.Orlenko L.P. Fizika vzryva [Physics of explosion]. T.2, Fizika vzriva, T.2, FIZMATLIT, Moscow, 2004, 656 p. (in Russian)

Статья поступила в редакцию в окончательном варианте 17.05.18