

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРЕССОВОЙ СВАРКИ МАГНИТОУПРАВЛЯЕМОЙ ДУГОЙ НЕПОВОРОТНЫХ СТЫКОВ ТРУБ МАЛОГО ДИАМЕТРА В МОНТАЖНЫХ И СТАЦИОНАРНЫХ УСЛОВИЯХ

В. С. КАЧИНСКИЙ, С. И. КУЧУК-ЯЦЕНКО, М. П. КОВАЛЬ, Е. И. ГОНЧАРЕНКО

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Повышение качества сварки неповоротных стыков труб в монтажных условиях является актуальной задачей. Цель работы — разработка адаптированной к условиям монтажной сварки неповоротных стыков при ремонте трубопроводов технологии и оборудования для прессовой сварки магнитоуправляемой дугой (ПСМД) неповоротных стыков труб диаметром 18...64 мм с толщиной стенки до 5 мм для стыковой сварки труб воздухопроводов железнодорожных вагонов, сварке трубопроводов при ремонте и строительстве тепличных комбинатов и других целей промышленного использования. Разработана адаптивная система автоматического управления процессом энерговложения при ПСМД и на ее основе технология сварки труб в условиях, обеспечивающих стабильное качество соединений. Разработана технология ПСМД труб диаметром 18...64 мм в полевых условиях, базирующаяся на использовании способа автоматического управления величины зазора между торцами свариваемых труб, обеспечивающего стабильное энерговложение при сварке. Разработано, изготовлено и прошло промышленные испытания новое поколение оборудования для ПСМД труб диаметром 18...64 мм в полевых условиях с использованием систем автоматического управления основными параметрами процесса. Библиогр. 8, табл. 3, рис. 12.

Ключевые слова: прессовая сварка магнитоуправляемой дугой, индукция управляющего магнитного поля, трубопроводы

Сварка неповоротных кольцевых швов труб диаметром 18...64 мм из углеродистых и низколегированных сталей применяется в различных отраслях промышленности, строительства, энергетики, тепличном хозяйстве. При этом преимущественно используются различные технологии ручной, автоматической орбитальной газозлектрической и газовой сварки. В предыдущие годы в Институте электросварки им. Е. О. Патона разработана технология сварки труб малого диаметра с использованием прессовой сварки магнитоуправляемой дугой (ПСМД). Технология, а также оборудование успешно внедрены и используются при изготовлении различных деталей трубчатого круглого сечения автомобильной промышленности [1]. Разработаны и изготовлены установки для ПСМД деталей трубчатого сечения (рис. 1, 2). ПСМД [2–5] отличается от существующих дуговых способов высокой производительностью, стабильностью качества сварных соединений, высокой степенью механизации и автоматизации технологического процесса. Сварка выполняется в автоматическом режиме, что значительно снижает влияние оператора-сварщика на качество сварных соединений. При ПСМД стальных труб не требуются сварочные материалы и защитный газ.

Эта технология и оборудование используется при сварке неповоротных стыков труб в стационарных условиях. При этом основные параметры

процесса сварки задаются программами, воспроизведение которых возможно при строго заданной величине дугового зазора между торцами свариваемых труб. При ПСМД в полевых условиях и ремонтных работах выполнение этого условия не всегда возможно. Накопленный в ИЭС опыт ПСМД различных труб показывает, что стабилизировать величину зазора можно путем разработки систем автоматического управления его величиной в процессе сварки.

Целью работы была разработка адаптированной к условиям монтажной сварки неповоротных стыков при ремонте трубопроводов технологии и оборудования для ПСМД неповоротных стыков



Рис. 1. Установка МД101: 1 — сварочная машина; 2 — шкаф управления; 3 — пульт управления

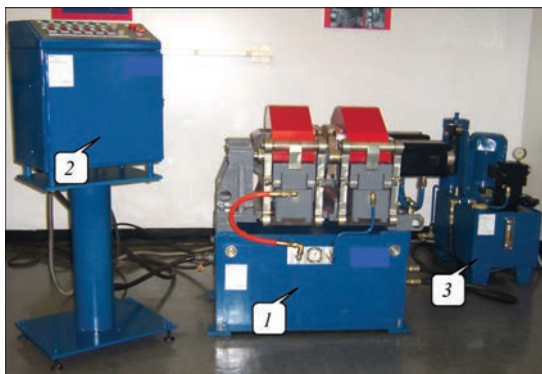


Рис. 2. Установка МД103: 1 — сварочная машина; 2 — шкаф управления; 3 — насосная станция

труб диаметром 18...64 мм с толщиной стенки до 5 мм для стыковой сварки труб воздухопроводов железнодорожных вагонов, сварке трубопроводов при ремонте и строительстве тепличных комбинатов и других целей промышленного использования. Для решения поставленной задачи были выполнены следующие исследования:

- разработка адаптивной системы автоматического управления процессом нагрева металла и формирования соединений при ПСМД труб указанных размеров;

- исследования деформационных процессов при ПСМД с целью достижения необходимой величины усиления сварного шва путем определения основных параметров привода машины;

- исследования влияния термических циклов при сварке труб указанных размеров на структуру и механические свойства соединений и разработка технологии сварки;

- разработка мобильного оборудования для ПСМД сварки труб малого диаметра.

Для проведения исследований по сварке использовали стальные трубы диаметром 32...51 мм с толщиной стенки 2,5...5 мм из стали 20, 09Г2С. Исследования выполняли на лабораторных машинах МД101 и МД103 (рис. 1, 2). Установка МД101 с ручным рычажным зажатием и пневматическим приводом осадки предназначена для сварки труб диаметром от 12 до 51 мм с максимальной площадью поперечного сечения до 460 мм² и максимальным наружным диаметром 51 мм и толщиной стенки 3 мм. Мощность установки не более 40 кВ·А. Масса установки 250 кг. Установка МД103 с гидравлическим приводом зажатия и осадки предназначена для сварки труб диаметром от 40 до 120 мм с максимальной площадью поперечного сечения до 2000 мм² и наружным диаметром до 120 мм с толщиной стенки 5 мм.

Таблица 1. Химический состав стали, мас. %

| Марка стали | C | Si | Mn | P | S | Cu | Ni | Cr | Mo | Al |
|-------------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|---------|
| 20 | 0,20 | 0,24 | 0,47 | 0,015 | 0,016 | 0,05 | 0,05 | 0,25 | 0,05 | 0,01 |
| 09Г2С | 0,11 | 0,75 | 1,38 | 0,035 | 0,037 | 0,28 | 0,29 | 0,29 | 0,09 | Не опр. |

Мощность установки не более 70 кВ·А. Масса установки 940 кг. Значительная масса установок МД101 и МД103 не позволяет использовать их при сварке в монтажных условиях.

Металлографические исследования выполнялись на микроскопах «Neophot-32» и «Versomet» при разных увеличениях. Величину микротвердости измеряли при нагрузке 100 г, на микротвердомере М-400 фирмы «Лесо». Размер зерна определяли по шкалам ГОСТ 5639–82. Химический состав стали приведен в табл. 1.

Одним из основных технологических параметров, влияющих на устойчивое передвижение дуги в магнитном поле, является величина магнитной индукции. Как показали исследования, при малых значениях магнитной индукции дуга горит неустойчиво, с короткими замыканиями. С энергетической точки зрения желательно обеспечить в зазоре оптимальную индукцию для устойчивого передвижения дуги. Оптимальными принимались такие параметры поля, которые затем могли быть реализованы для использования в производственных условиях.

Устойчивое перемещение дуги зависит также и от величины зазора, параллельности торцов и угла скоса кромок свариваемых труб. Величина дугового зазора, в котором присутствует индукция управляющего магнитного поля и перемещается дуга в значительной степени определяет качество сварных соединений. Этот параметр определяется из требования устойчивого возбуждения дуги, стабильного ее перемещения с максимально возможным временем горения, достижения наибольшей частоты вращения. В исследуемом диапазоне труб величина зазора, как установили эксперименты, находится в пределах 1,2...1,8 мм. Для труб с небольшой толщиной стенки (до 2 мм) этот зазор составляет 1,2...1,5 мм, для труб с толщиной стенки до 5 мм – в пределах 1,6...1,8 мм. На основании проведенных исследований разработана система автоматического управления величиной дугового зазора при нагреве высокоскоростной магнитоуправляемой дугой, которая позволяет поддерживать оптимальное его значение в течение всего периода нагрева, независимо от начальной величины зазора. Система позволяет начинать устойчивый процесс горения дуги даже в случае возбуждения с короткого замыкания, что значительно упрощает центровку кромок труб при монтажной сборке стыков, а также снижает требования к точности обрезки торцов труб перед



Рис. 3. Блок-схема регулятора дугового зазора

сваркой. Система автоматического управления процессом нагрева труб при ПСМД запатентована в ведущих странах и существенно расширяет возможности использования этой технологии при сварке в полевых условиях [6, 7].

Принцип регулирования дугового зазора основан на методе обработки сигнала обратной связи между падением напряжения на сварочной дуге и последующим управляющим воздействием на устройство перемещения подвижной части сварочной машины. Блок-схема регулятора приведена на рис. 3.

Регулирование дуговым зазором осуществляется следующим образом. Перед началом процесса сварки свариваемые трубы, торцами впритык, зажимают в подвижную и неподвижную части сварочной машины. Перед началом цикла сварки включается источник питания сварочной дуги. Напряжение на подвижном и неподвижном корпусах сварочной машины равно нулю (режим короткого замыкания). При нулевом сигнале входного напряжения происходит разведение подвижной части машины до установленного значения дугового напряжения. Происходит возбуждение сварочной дуги и начинается процесс нагрева торцов труб. Сигнал, соответствующий падению напряжения на сварочной дуге, поступает на вход нормирующего усилителя. В процессе нагрева труб сигнал с выхода нормирующего усилителя поступает на вход аналого-цифрового преобразователя и преобразуется в последовательность пакетных данных, соответствующих изменениям величины напряжения на сварочной дуге, перемещающейся в зазоре между торцами труб. В программно-аппаратном комплексе на базе персонального компьютера пакет данных обрабатывается программой регистрации падения напряжения на дуге. Проводя непрерывный анализ этих данных, система воздействует на подвижную часть сварочной установки, поддерживая напряжение на дуге в установленных пределах с целью обеспечения устойчивого перемещения сварочной дуги по торцам свариваемых труб. Использование системы

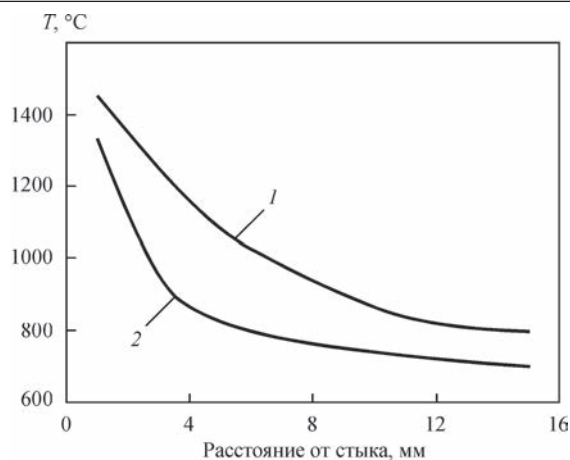


Рис. 4. Распределение температуры при сварке труб диаметром 42 мм с толщиной стенки 3 мм (1 — КССО; 2 — ПСМД)

позволило выполнять качественные соединения при меньшем энергозатрате и соответственно нагреве и деформации торцов труб, так как стабилизация нагрева позволила сузить избыточный запас энергозатраты, предусмотренный на случай его снижения при отклонениях параметров.

На рис. 4 приведена диаграмма распределения температуры при сварке труб диаметром 42×3 мм методом контактной стыковой сварки оплавлением (КССО) и прессовой сварки магнитоуправляемой дугой (ПСМД), характеризующая распределение температуры в металле ЗТВ и по линии соединения структуры.

Исследование термических циклов в период нагрева труб с помощью термопар и испытания соединений показали, что определяющим фактором, влияющим на качество соединений, является температура нагрева торцов труб перед их сжатием, позволяющая получать достаточную деформацию при осадке. Оптимальной температурой является нагрев до 1000...1100 °С зоны, расположенной на расстоянии 1 мм от торца трубы. Продолжительность нагрева при соблюдении постоянными других параметров находится в узком диапазоне. Его величина зависит от тока дуги. Перегрев торцов труб перемещающейся дугой приводит к появлению жидких перемычек в зазоре и снижению скорости стабильного перемещения дуги. Сварочная дуга под действием магнитного поля перемещается в зазоре между торцами свариваемых труб. Высокая скорость дуги, до 140 м/с, на трубах малого диаметра, позволяет получать равномерный нагрев торцов труб по всей свариваемой поверхности. Для выполнения сварки машины были оборудованы приводом, позволяющим изменять величину дугового промежутка между торцами труб, а также регулировать величину деформации при осадке.

Разработка технологии сварки. На рис. 5 представлены различные типы сварных соединений труб



Рис. 5. Сварные соединения труб диаметром 38×3 мм: а — трубы с трубой; б — трубы с заглушкой

диаметром 38×3 мм, выполняемые в монтажных условиях. Применение системы стабилизировало величину зазора и энергозатраты в течение всего периода нагрева, что позволило получать стабильное распределение температуры при нагреве труб с толщиной стенки от 3 до 5 мм (рис. 4).

При прессовой сварке труб на внутренней и наружной поверхности труб образуется усиление сварного шва. В зависимости от условий эксплуатации сварных соединений и трубчатых конструкций усиление удаляют механической обработкой или оставляют в конструкции. При сварке неповоротных стыков труб наружный грат при необходимости удаляют, а внутренний допускается при условии, если его величина не превышает установленную величину. Это требование создает дополнительные задачи при разработке и изысканиях оптимальных термомеханических циклов при сварке. Управляя энергозатратами в нагреваемые торцы труб и величиной припуска на осадку, удалось добиться уменьшения величины внутреннего усиления сварного шва (рис. 6).

В процессе сварки на ход процесса влияют различные факторы, что вызывает необходимость проведения контроля качества сварных соединений. Основным условием формирования сварного соединения является процесс совместной пластической деформации свариваемых деталей. На процесс формирования соединений влияют следующие факторы:

- состояние торцов труб (температура поверхности, наличие микронеровностей, оксидных пленок и других загрязнений);

Таблица 2. Основные технологические параметры сварки труб

| Марка стали, мм | Диаметр, мм | Время сварки, с | Усилие осадки, кН | Укорочение труб, мм |
|-----------------|-------------|-----------------|-------------------|---------------------|
| 20 | 38×3 | 9 | 24 | 3,8 |
| 20 | 42×5 | 14 | 40 | 4,7 |
| 09Г2С | 42×4 | 12 | 37 | 3,7 |
| 09Г2С | 48×3,5 | 13 | 35 | 3,4 |



Рис. 6. Макрошлиф сварного соединения трубы диаметром 42×3,5 мм

- распределение температуры в свариваемых торцах труб;
- величина и характер деформации торцов при осадке.

По результатам проведенных исследований была разработана технология ПСМД труб малого диаметра до 64 мм. Основные параметры режимов сварки представлены в табл. 2.

На рис. 7 приведена микроструктура по линии соединения труб диаметром 42×4 мм, сваренных способом ПСМД. Полоска соединения достаточно четко выражена по всей высоте шва, ее ширина составляет 40...60 мкм.

Микроструктура металла ЗТВ на участке крупного зерна ферритно-перлитная. Перлит выделяется в виде отдельных зерен и в составе ферритно-перлитной смеси. Балл зерна на участке крупного зерна соответствует 6-5. Твердость составляет $HV1 - 1930...2210$ МПа. На участке нормализации (рис. 8) структура мелкозернистая (балл 9-10 по ГОСТ 5639-82) ферритно-перлитная с преобладанием ферритной составляющей, ширина участка 1400 мкм, твердость $HV1 - 1640...1870$ МПа. Основной металл (рис. 9) представляет собой ферритно-перлитную смесь с явными следами проката, балл зерна основного металла 8 по ГОСТ 5639-82. Твердость основного металла $HV1 - 1510...1710$ МПа. Ширина ЗТВ сварного соединения 6800 мкм.

Твердость сварного соединения измеряли по линии ОМ-ЗТВ-линия соединения-ЗТВ-ОМ с нагрузкой 100 г и шагом 500, 300, 200 и 100 мкм.



Рис. 7. Микроструктура (×100) стали 20 по линии соединения сварного соединения



Рис. 8. Микроструктура (×100) участка полной перекристаллизации



Рис. 9. Микроструктура (×100) основного металла
HV, МПа

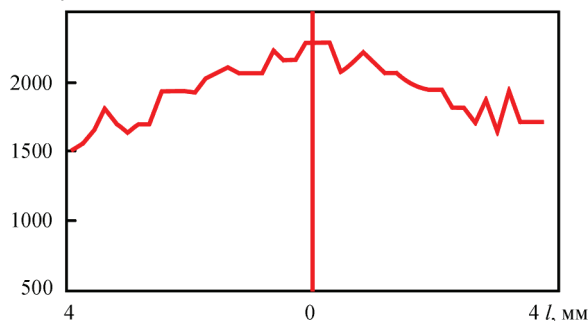


Рис. 10. Твердость сварного соединения по линии ОМ–ЗТВ–ЛС–ЗТВ–ОМ

Значение твердости приведены на рис.10. Твердость полосы соединения HV1-2150, 1990, 2280, 2060, 2280, 2060 МПа. Термический цикл при ПСМД характеризуется скоростным нагревом и охлаждением. В целом структура металла отличается более мелким зерном и шириной ЗТВ, чем при сварке подобных изделий при других видах сварки давлением. Скорость охлаждения при ПСМД значи-

тельно выше, чем при КССО, что приводит к увеличению твердости по линии сварного соединения при ПСМД. Микроструктура полосы соединения состоит, в основном, из пластинчатого феррита с неупорядоченной второй фазой, которая имеет более высокую твердость, чем свободный феррит. Это обуславливает повышенную твердость полосы соединения по сравнению с КСС, где структура полосы соединения представляет собой, в основном, полидрический феррит.

Механические свойства основного металла (ОМ) и сварных соединений (СС) приведены в табл. 3. Анализ результатов испытаний, выполненных при температуре 20 и –20 °С показал, что механические свойства сварных соединений находятся на уровне механических свойств основного металла.

По результатам выполненных исследований разработана мобильная машина для прессовой сварки магнитоуправляемой дугой труб диаметром до 51 мм [8]. Для работы в условиях производства и монтажных условиях была изготовлена мобильная машина для прессовой сварки труб малого диаметра.

Основные технические характеристики установки

| | |
|--|-------------|
| Максимальная площадь поперечного сечения труб, мм ² | 450 |
| Максимальный диаметр трубы, мм..... | 57 |
| Усилие осадки максимальное, кН (кГс)..... | 30 (3000) |
| Усилие зажатия максимальное, кН (кГс)..... | 60 (6000) |
| Напряжение питания, В..... | 380 |
| Потребляемая мощность, кВт·А..... | 50 |
| Масса машины, кг..... | 90 |
| Габаритные размеры машины, мм..... | 800×600×400 |

Процесс ПСМД сварки на установке МД1, которая состоит из машины, сварочного выпрямителя и шкафа управления, выполняется следующим образом. Свариваемые трубы устанавливаются в зажимные устройства машины (рис. 11). Трубы прочно зажимаются приводами машины.

Дуга горит в узком зазоре между торцами труб (рис. 12). Процесс сварки выполняется нагреванием торцов труб до состояния пластической деформации. После нагрева выполняется осадка.

Разработанная сварочная установка МД1 обеспечивает сварку труб диаметром до 57 мм как в полевых, так и в стационарных условиях в диапазоне температуры окружающей среды от –40 до

Таблица 3. Механические свойства сварных соединений труб

| Марка стали | Диаметр труб, мм (толщина стенки, мм) | σ_b , МПа (ОМ) | σ_b , МПа (СС) | KCV_{20° Дж/см ² (ОМ) | KCV_{20° Дж/см ² (СС) | KCV_{20° Дж/см ² (ОМ) | KCV_{20° Дж/см ² (СС) |
|-------------|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|--|--|--|--|
| 20 | 38 (3) | 508...525 516,5 | 512...545 528,5 | 56...58 57 | 54...58 56 | 56...59 57,5 | 54...62 58 |
| 09Г2С | 42 (5) | 460...478 469 | 453...484 465 | 57,7...58,1 57,9 | 59...78,1 68,5 | 57,8...58 57,9 | 64...74,5 69,3 |

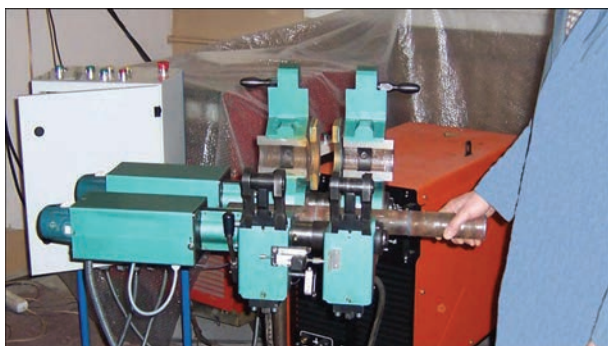


Рис. 11. Установка труб в зажимные устройства сварочной машины

40 °С. Возможно изготовление сварочных мобильных комплексов на базе данной установки.

Выводы

Разработана адаптивная система автоматического управления процессом энерговложения при ПСМД и на ее основе технология сварки труб в условиях, обеспечивающих стабильное качество соединений.

Проведены всесторонние исследования качества соединений труб, свидетельствующие о равнопрочности с основным металлом по всем показателям, включая ударную вязкость.

Установлена возможность получения ограниченных размеров грата за счет оптимизации термического цикла.

Разработана технология ПСМД труб диаметром 18...64 мм в полевых условиях, базирующаяся на использовании предложенного авторами способа автоматического управления величины зазора между торцами свариваемых труб, обеспечивающего стабильное энерговложение при сварке.

Показана возможность получения качественных соединений при ПСМД с минимальными энерговложениями и деформацией при осадке с целью уменьшения величины грата.

Проведены всесторонние испытания сварных соединений труб диаметром 18...64 мм, выполненных при минимальном энерговложении и свидетельствующие о их практической равноценности с основным металлом, в том числе по показателям ударной вязкости.

Разработано, изготовлено и прошло промышленные испытания новое поколение оборудования для ПСМД труб диаметром 18...64 мм в полевых условиях с использованием систем автоматического управления основными параметрами процесса. Установлена возможность значитель-



Рис. 12. Процесс прессовой сварки труб диаметром 51×4 мм на машине МД1

ного упрощения операций центровки и сборки труб с использованием систем автоматического управления.

Металлографические исследования показали отсутствие пор по линии сварного соединения. Измерения твердости по линии основной металл–ЗТВ–линия соединения–ЗТВ–основной металл, показали повышение твердости на 10...15 % по линии сварного соединения, что допустимо по нормативным документам.

Разработана технология сварки труб для использования на вагоноремонтных предприятиях железной дороги, строительстве и ремонте тепличных комбинатов.

Разработана мобильная машина МД1 для выполнения прессовой сварки малого диаметра в стационарных и полевых условиях.

1. Magnetically-impelled arc butt welding of automobile parts / S. I. Kuchuk-Yatsenko, V. S. Kachinskiy, V. Yu. Ignatenko [et al.] // Australasion welding journal. – 2010. – Vol. 55, Second Quarter. – P. 40–48.
2. Ganovski F. J. The magnetarc welding process. – F. J. Ganovski // Welding Metal Fabrication. – 1974. – № 5. – P. 206–213.
3. Edson D. A. Magnetically Impelled Arc Butt Welding of Thick Wall Tubes / D. A. Edson // International Institute of Welding. – 1982. – III 726–82, July. – P. 726.
4. Takagi K. Magnetically Impelled Arc Butt Welding of gas pipeline / K. Takagi, F. Aracida // Metal Construction. – 1982. – № 10. – P. 542–548.
5. Magnetically-impelled arc butt welding of pipes of steel X70 / S. I. Kuchuk-Yatsenko, V. S. Kachinskiy, V. Yu. Ignatenko [et al.] // Australasion welding journal. – 2010. – Vol. 55, Second Quarter. – p. 20–22.
6. Pat. 6.211.489 B1 United States. Method of magnetically impelled arc butt welding / S. I. Kuchuk-Yatsenko, V. S. Kachinskiy, V. Yu. Ignatenko, M. P. Koval. Date of patent 03.04.2001.
7. Пат. 100278 Украина. Способ прессовой сварки / С. И. Кучук-Яценко, В. С. Качинский, М. П. Коваль. Зарегистрирован 10.12.2012 г.
8. Пат. 95360 Украина. Машина для прессовой сварки труб с нагревом дугой, управляемой магнитным полем / С. И. Кучук-Яценко, В. С. Качинский, М. В. Галахов, М. П. Коваль, В. И. Клименко. Зарегистрирован 25.12.2014 г.

Поступила в редакцию 23.02.2016