



# ТЕХНОЛОГИЯ И НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ РЕЛЬСОВ СОВРЕМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И РЕКОНСТРУКЦИИ СКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МАГИСТРАЛЕЙ

Академик НАН Украины С. И. КУЧУК-ЯЦЕНКО, В. Г. КРИВЕНКО, канд. техн. наук,  
А. В. ДИДКОВСКИЙ, Ю. В. ШВЕЦ, А. К. ХАРЧЕНКО, А. Н. ЛЕВЧУК, инженеры  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Представлена технология и новое поколение оборудования для контактной стыковой сварки высокопрочных рельсов при строительстве и реконструкции скоростных железнодорожных магистралей, которые базируются на процессе контактной сварки пульсирующим оплавлением.

*Ключевые слова:* контактная стыковая сварка, пульсирующее оплавление, компьютеризированная система управления, технология и оборудование, рельсовая плеть, бесстыковой путь

В последнее десятилетие в большинстве развитых стран мира наблюдается интенсивная реконструкция железных дорог, что обусловлено увеличением их грузонапряженности и скорости движения. При этом используются рельсы повышенной прочности с более высокой износостойкостью. Значительно возросли нормативные требования к точности рельсовой колеи, определяемой допустимыми отклонениями от заданных ее размеров. Выполнение этих требований в значительной степени определило разработки, направленные на совершенствование технологии сварки рельсов, которые проводятся в ведущих странах мира.

Сварка рельсов, укладываемых в главных путях, преимущественно выполняется контактной сваркой при изготовлении длиномерных рельсовых плетей (200...800 м) оплавлением в стационарных условиях, а также в полевых условиях при их укладке и ремонте бесстыковых путей.

В Институте электросварки им. Е. О. Патона в течение более 50 лет проводятся разработки технологии и оборудования для контактной сварки рельсов в стационарных и полевых условиях. В мировой практике первые мобильные машины типа К155 для контактной сварки рельсов были разработаны ИЭС им. Е. О. Патона и успешно внедрены на железных дорогах СССР еще в начале 1960-х годов. Промышленное производство этих машин по разработкам института освоил Каховский завод электросварочного оборудования

(КЗЭСО). Это сотрудничество успешно продолжается и поныне. До 2000 г. КЗЭСО освоил выпуск нескольких поколений мобильных рельсоварочных машин типа К255Л, К355А-1, К900, а также стационарных рельсоварочных машин К190, К190ПА. В основу конструкции этих машин положено использование технологии сварки непрерывным оплавлением с программным регулированием основных параметров [1].

Разработанная в институте технология базируется на новых принципах управления процессом оплавления при контактной сварке, которые позволили в 2...3 раза снизить мощность, потребляемую при сварке, уменьшить время сварки в 1,5...2 раза по сравнению с процессом сварки с подогревом сопротивлением, а также обеспечить стабильный и равномерный нагрев рельсов по всему сечению. Несколько сотен таких машин, изготовленных КЗЭСО, успешно эксплуатируются до настоящего времени не только в СНГ, но и во многих странах мира.

По мере использования на железных дорогах высокопрочных рельсов КФ (комбинат «Азовсталь», Украина), Э76Ф, К76Т (ОАО «Нижнетагильский (НТМК) и Новокузнецкий металлургический (НКМК) комбинаты», РФ), U75V (компания «PIETC», КНР), BS113A («Corus British Steel», Великобритания) возникла необходимость существенного совершенствования технологии сварки и оборудования для ее осуществления. Прочностные показатели металла возросли в 1,3...1,5 раза (рис. 1, 2), а требования к пластичным свойствам в соответствии с нормативными показателями сохранились на прежнем уровне.

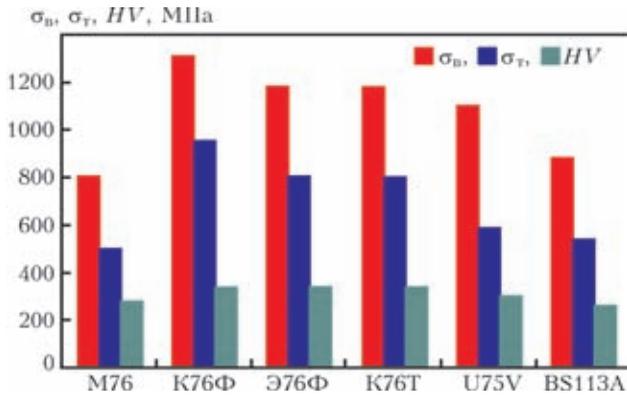


Рис. 1. Прочностные показатели новых рельсов

В ходе проведенных в Институте исследований установлено [2], что требуемое качество сварных соединений высокопрочных рельсов можно обеспечить при условии использования высококонцентрированного нагрева при сварке и строго дозированном энерговложении (рис. 3). При этом сравнительно небольшие отклонения при нагреве от оптимального распределения температуры приводят к снижению показателей при механических испытаниях.

Уменьшение энерговложения и соответственно температуры в приконтактных участках шва (рис. 3, фрагмент 1) приводит к появлению тонких оксидных структур по линии сварки. При увеличенном энерговложении (рис. 3, фрагмент 2) происходит укрупнение зерна и образование сплошной ферритной сетки по его границам.

Для получения оптимальных термических циклов в институте разработана технология сварки, получившая название пульсирующего оплавления, которая запатентована в Украине [3] и ведущих странах мира, в частности, РФ, США, Великобритании и Китае. За счет многофакторного регулирования искрового зазора, существующего между контактирующими деталями в процессе оплавления, а также мгновенных значений напряжения обеспечивается интенсификация контактного нагрева, при котором сокращаются потери металла на оплавление и повышается КПД по сравнению с каноническими процессами непрерывного оплавления или прерывистого подогрева сопротивлением. Длительность нагрева и припуски на оплавление сокращаются в 1,5...2 раза. Получение качественных соединений обеспечивается при меньшей ширине металла ЗТВ (рис. 4).

Разработана автоматическая система и определены алгоритмы многофакторного регулирования основных параметров процесса оплавления, позволяющего поддерживать заданный уровень энерговложения при сварке практически независимо от изменения условий эксплуатации машин (качества подготовки рельсов перед сваркой, колебания напряжения сети, температуры окружающей среды и др.). При этом заданная программа

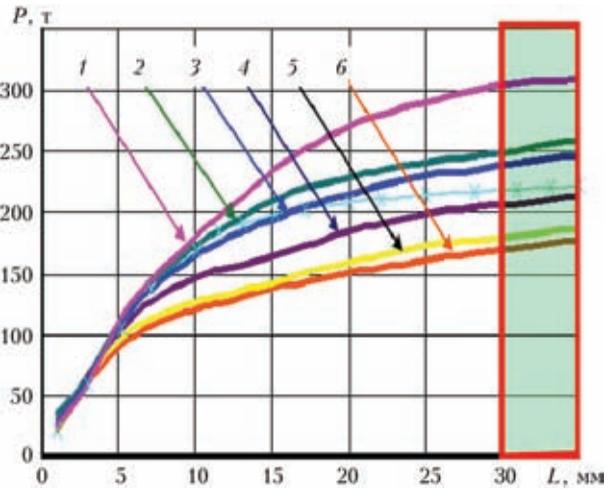


Рис. 2. Зависимость нагрузки при испытаниях на статический изгиб от прогиба рельса (минимальное допустимое значение стрелы прогиба — 30 мм): 1 — НКМК, НТМК Э78ХСФ (РФ, 2006–2012); 2 — НКМК, НТМК Э76Ф, К76Ф (РФ, 2006–2012); 3 — НКМК, НТМК Э76Ф, К76Ф (РФ, 2003); 4 — Азовсталь КФ 2011–2012 (Украина); 5 — U75 V (КНР, 2003–2012); 6 — Азовсталь М76 (Украина, 1985)

регулирования параметров автоматически корректируется (адаптируется) при изменении условий работы машины. Как видно из рис. 5, на оптимальном режиме (рис. 5, I) и автоматически откорректированном режиме (рис. 5, II) при изменении напряжения сети обеспечивается получение заданного температурного поля и требуемое качество сварных соединений.

При разработке систем автоматического управления процессом пульсирующего оплавления была решена также задача автоматизации некоторых вспомогательных операций, сопровождающих сварку бесстыковых путей. При ремонте бесстыковых путей часто необходимо сваривать две закрепленные плети неограниченной длины. При этом возникает необходимость сварки рельсовой вставки между плетями. В соответствии с при-

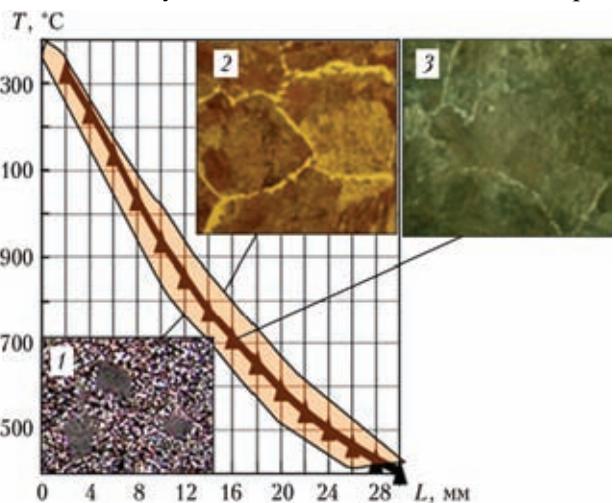


Рис. 3. Распределение температуры при сварке рельсов Р65: 1 — зона формирования оксидных включений по линии сварки; 2 — зона перегрева (крупное зерно с выделениями феррита по его границам); 3 — оптимальная структура

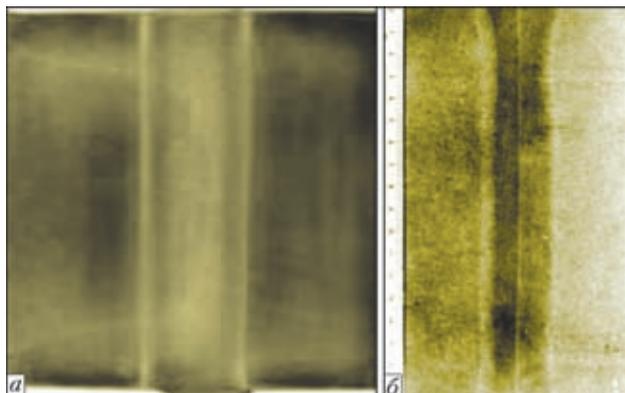


Рис. 4. Макроструктура сварных соединений рельсов Э76Ф: а — непрерывное; б — пульсирующее оплавление

нятой технологией вставку достаточно большой длины (не менее 6 м) приваривали к плетям с предварительным изгибом, необходимым для компенсации укорочения при сварке. Эта операция достаточно трудоемкая, после нее требуется восстановление заданного температурного напряженного состояния плети и геометрических размеров колеи. В большинстве регионов мира при строительстве бесстыковых путей принят расчетный диапазон изменения температуры окружающей среды (60...90°C) на период эксплуатации путей. Соответственно в жесткозакрепленных рельсовых плетях возникают внутренние напряжения (растяжения или сжатия в зависимости от периода эксплуатации). Многолетний опыт свидетельствует о том, что наибольшую опасность представляют напряжения сжатия, вызывающие нарушение геометрических размеров рельсовой колеи или ее повреждение.

С участием института была апробирована новая технология сварки вставки без ее изгиба. Необходимое укорочение при сварке обеспечивается за счет натяжения привариваемой плети, освобожденной от шпал на ограниченном участке (не более 50 м). После сварки в плети создаются напряжения растяжения. Варьируя значения предварительного зазора между концами свариваемых плетей перед сваркой, можно точно задавать значение этих напряжений. Сварка с натяжением длинномерных плетей бесстыкового пути позволяет установить наиболее оптимальный режим их работы при изменении температуры окружающей среды в процессе эксплуатации рельсов. Если при ремонте или строительстве бесстыковых путей задать уровень растягивающих напряжений после сварки на уровне, превышающем уровень возможных сжимающих напряжений, то в рельсах в течение всего интервала их службы не будут возникать сжимающие напряжения. Аналогичная задача возникает и при сварке плетей бесконечной длины в процессе строительства новых бесстыковых путей. Решение этих задач стало возможным благодаря разработке системы автоматичес-

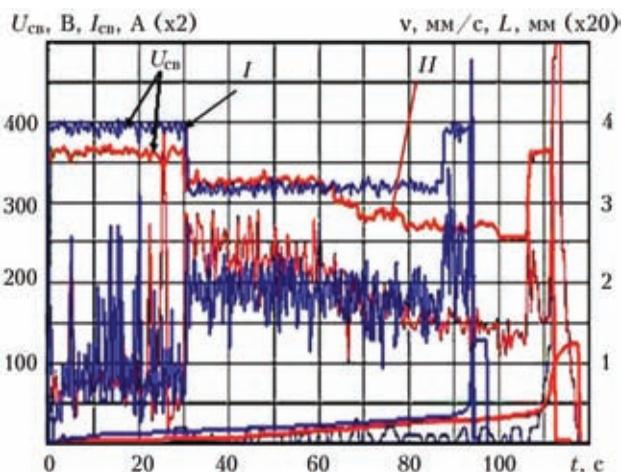


Рис. 5. Запись основных параметров сварки при пульсирующем оплавлении: I — оптимальный режим (синий); II — адаптивный режим (красный)

кого многофакторного регулирования всех параметров процесса пульсирующего оплавления с учетом выполнения вспомогательной операции по натяжению свариваемых рельсовых плетей. При сварке, кроме параметров, определяющих режим сварки, в компьютер вводят данные о температуре окружающей среды и необходимом уровне задаваемых растягивающих напряжений в свариваемой плети.

Применение новой технологии сварки высокопрочных рельсов, совмещенной с их натяжением, потребовало создания новых поколений рельсосварочных машин, отличающихся значительно большими усилиями осадки, оснащенными встроенными механизмами для удаления усиления сварного шва в горячем состоянии. Все упомянутые выше инновации новой технологии сварки высокопрочных рельсов и систем многофакторного регулирования были положены в основу создания нового поколения мобильных и стационарных рельсосварочных машин. При этом использованы современные системы вычислительной техники, быстродействующие гидроприводы и мощные системы электронного управления параметрами сварки.

Мобильные машины новых поколений имеют привод осадки, развивающий усилия в 2...2,5 раза больше, чем машины предыдущих поколений (типа К900) (таблица) и оборудованы устройствами автоматической срезки грата в горячем состоянии. При этом свариваемые рельсы удерживаются после сварки в зажатом состоянии, что предотвращает возможность повреждения сварного шва от воздействия растягивающих напряжений, создаваемых в плети после сварки в зоне нагретого металла. Несмотря на значительное увеличение мощности гидроприводов зажатия и осадки масса новых машин и габариты увеличились незначительно, что позволило их использовать в имею-

Технические характеристики стационарных и мобильных рельсосварочных машин ОАО «КЗЭСО»

Параметр	K900	K920	K921	K922-1	K922-2	K930	K1000	K1100
Номинальное напряжение питающей сети, В	380	380	380	380	380	380	380	380
Наибольший вторичный ток, не менее кА	18	67	67	67	67	67	84	84
Номинальная мощность (ПВ 50 %), кВ·А	150	211	236	210	210	210	300	300
Рабочее давление в гидросистеме, МПа	100	125	210	210	210	210	160	160
Усилие осадки, кН	450	1000	1500	1200	1200	1200	900	900
Усилие зажатия, кН	1350	2500	2900	2900	2900	2900	2000	2000
Ход подвижной колонны машины, мм	70	100	150	100	150	200	100	115
Масса машины, кг	2700	3000	4100	3100	3100	3450	8800	8800
Время сварки рельсов непрерывным оплавлением Р65, с	180...220	—	180...220	—	180...220	180...220	180...220	180...220
Время сварки рельсов пульсирующим оплавлением Р65, с	60...120	60...100	60...120	60...120	60...120	60...120	60...120	60...120

щихся передвижных рельсосварочных комплексах без существенной реконструкции.

Первая машина K921 для сварки рельсов пульсирующим оплавлением с натяжением разработана в ИЭС им. Е. О. Патона в 2001 г. и изготовлена КЗЭСО в кооперации с фирмой «Norfolk Southern» (США). Ее внедрение и доводку технологии сварки рельсов выполняли с участием ИЭС на железных дорогах, принадлежащих этой фирме. Технология была успешно внедрена и апробированы различные варианты осуществления сварки с натяжением. В настоящее время работают и эффективно используются более десяти таких машин. Впервые в мировой практике была выполнена контактная сварка рельсовых плетей бесконечной длины, протяженностью до нескольких сотен километров, без болтовых соединений. По имеющимся данным общая протяженность сваренных фирмой бесстыковых путей бесконечной длины превышает 10 тыс. км.

Последнее десятилетие в институте продолжают разработки, направленные на совершенствование оборудования для сварки рельсов в полевых и стационарных условиях применительно к использованию их в различных регионах мира.

В 2001–2005 гг. разработаны машины типа K920 (рис. 6) и K922 двух модификаций (рис. 7) для сварки рельсов в условиях стран СНГ. Показатели этих машин (усилия осадки, зажатия, габариты машины) оптимизированы с учетом применяемых технологий ремонта и строительства, а также имеющихся передвижных рельсосварочных комплексов. В частности, удалось значительно (в 1,5 раза) снизить массу и габариты машин по сравнению с первым опытно-промышленным образцом K921. Они нашли широкое применение при ремонте и реконструкции железнодорожных путей в Украине и России. Нормативными документами железных дорог Украины и России технология сварки пульсирующим оплавлением принята как базовая при сварке высокопрочных рельсов. В Украине работает 18 машин K922-1, а также 12 машин K1000. В Россию поставлено более 50 машин K922. Достаточно эффективно используются машины K922, поставленные в Китай (15 шт.), которые главным образом применяли при строительстве скоростных железнодорожных линий. За последнее пятилетие область применения этих машин значительно расширилась. Специалисты института оказывают необходимую консультационную помощь при отработке техно-



Рис. 6. Машина K920



Рис. 7. Машина K922-1



Рис. 8. Машина K930 для сварки рельсов с натяжением бесконечной длины



Рис. 9. Комплекс KPC5

логии сварки различных рельсов и наладке оборудования. При этом используются различные схемы организации работ при сварке рельсов в монтажных условиях. Для более полной стабилизации температурно-напряженного состояния в рельсовых участках бесконечной длины разработана машина K930 (рис. 8), обеспечивающая большую длину натяжения плетей.

Современные мобильные рельсосварочные комплексы, выпускаемые КЗЭСО, представляют собой самоходные установки, которые могут передвигаться на рельсовом ходу KPC5 (рис. 9) или на комбинированном KCM 005 (рис. 10), позволяющим перемещаться как по рельсам, так и по шоссе и грунтовым дорогам.

На передвижных комплексах, кроме рельсосварочных машин, установлены дизель-генераторные установки мощностью 200...300 кВт, гидроподъемники, вспомогательное оборудование для подготовки рельсов для сварки, система неразрушающего контроля. Подобного типа мобильные комплексы, где используются машины K920, K922, применяют на железных дорогах Европы, фирмой «Holland» в США, фирмой «Network Rail» в Великобритании, а также Китае, Австралии, Бразилии, Тайване, Малайзии, Индии, Турции, Саудовской Аравии, Таиланде.

Для повышения производительности труда при реконструкции и строительстве железнодорожных путей рельсы предварительно сваривают в



Рис. 10. Комплекс KCM 005



Рис. 11. Машина K1100

длинномерные плети длиной от 200 до 800 м, которые затем транспортируют к месту укладки. Сварку проводят в стационарных или полустационарных цехах с использованием стационарных сварочных машин. В последнее десятилетие в институте разработано новое поколение стационарных машин K1000, K1100, предназначенных для сварки высокопрочных рельсов (рис. 11), в которых используется технология сварки пульсирующим оплавлением. Машины отличаются высокой производительностью (время сварки рельсов максимального сечения не превышает 70...120 с) при мощности 250 кВт, что почти вдвое меньше мощности известных зарубежных стационарных рельсосварочных машин. Машины обеспечивают высокую точность центровки свариваемых рельсов, особенно необходимую для рельсовых плетей, которые укладываются в скоростные пути. Машина производит автоматическую срезку усиления шва в месте сварки, а гидропривод машины обеспечивает повышенные усилия осадки, необходимые при сварке высокопрочных рельсов.

Компьютеризированная система управления машиной обеспечивает стабильное воспроизведение заданных режимов сварки пульсирующим оп-

лавлением и выполняет операционный контроль качества соединений, она дает его оценку сразу же после выполнения сварки. По сравнению с известными машинами K1000 имеет меньшую массу, габариты, что позволяет ее использовать при организации полустационарных цехов для сварки рельсовых плетей.

1. Кучук-Яценко С. И. Контактная стыковая сварка оплавлением / Под ред. В. К. Лебедева. — Киев: Наук. думка, 1992. — 236 с.
2. Кучук-Яценко С. И. Влияние наследственности структуры низколегированных и углеродистых сталей на свариваемость в твердой фазе // Актуальные проблемы современного материаловедения: В 2 т. — Киев: ИД «Академперіодика», 2008. — Т. 1. — С. 148–165.
3. Пат. UA 46820, 6 В 23К 11/04, С2 Украина. Спосіб контактного стикового зварювання оплавленням / С. І. Кучук-Яценко, О. В. Дідковський, М. В. Богорський та ін. — Опубл. 17.06.2002.

Presented are the technology and a new generation of equipment for flash butt welding of high-strength rails for construction and re-construction of high-speed railway lines, based on the use of the pulsed-flash butt welding process

Поступила в редакцию 21.03.2011

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЕПЛОВЫХ, МАССООБМЕННЫХ, ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В СИСТЕМЕ «ЭЛЕКТРОДНАЯ ПРОВОЛОКА-КАПЛЯ-СТОЛБ ДУГИ» С ЦЕЛЬЮ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПРОЦЕССОВ И ПЕРЕНОСА КАПЕЛЬ ЭЛЕКТРОДНОГО МАТЕРИАЛА И ЕГО СВОЙСТВ ПРИ СВАРКЕ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ**

Научно-исследовательская работа по указанной теме была завершена в 2011 г. в Институте электросварки им. Е. О. Патона (руководитель темы — академик НАН Украины И. В. Кривцун).

Получены новые результаты теоретических и экспериментальных исследований взаимодействия тепловых, массообменных, электромагнитных и магнитогидродинамических явлений в системе «электродная проволока – капля – анодный слой – столб дуги» при дуговой сварке плавящимся электродом и распылении электродного металла. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса формирования капли электродного металла в зависимости от диаметра электродной проволоки, скорости ее подачи при дуговой сварке конструкционных материалов и алюминиевых сплавов на постоянном токе и в импульсном режиме. Экспериментально установлен и теоретически проанализирован эффект «взрыва» капли при плавлении AlMg проволоки. Впервые получены данные о термодинамических и транспортных свойствах многокомпонентной (Ar–Al, Ar–Fe, He–Al, He–Fe) плазмы столба дуги, а также дуги, которая горит в среде водяного пара (применительно к «мокрой» сварки на глубинах до 200 м). Описаны результаты исследований тепловых и газодинамических процессов при взаимодействии высокотемпературного плазменного потока с металлическими материалами, установлены закономерности изменения структуры, физико-механических и физико-химических свойств материалов при их обработке плазменными потоками, определены основные технологические факторы, обеспечивающие комплекс повышенных физико-механических характеристик нанесенных покрытий. Разработаны конструкции высокоресурсных плазмотронов для переработки отходов и резки металлов, созданы образцы плазменно-дуговых установок для реализации технологий обработки материалов. Научно-технические результаты: математические модели и программное обеспечение, технология и опытно-промышленные установки пароплазменной переработки твердых бытовых отходов, технология и испытательное оборудование для плазменного нанесения покрытий из жаропрочных материалов, технология и опытно-промышленные установки плазменной резки металлов повышенной толщины. Потребность отечественного рынка в таких установках составляет 30–40 комплектов в год, экономический эффект от внедрения одной установки составляет не менее 1 млн грн. в год. Прогнозируемые предположения о развитии объекта исследования — поиск новых технологических возможностей дуговых и плазменно-дуговых методов обработки, соединения и нанесения покрытий применительно к новым конструкционным материалам.