

На правах рукописи

**АРСЕНЮК**  
**Валерий Васильевич**

УДК 621.791.4:669.2/8

**УДАРНАЯ СВАРКА В ВАКУУМЕ  
ЦИРКОНИЯ И ГАФНИЯ С МЕДЬЮ  
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К СОЗДАНИЮ  
ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ ПЛАЗМОТРОНОВ**

05.03.06 —

технология и машины сварочного производства

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Киев 1994



021.491



00360288 (R)

Диссертация является рукописью.

Работа выполнена в Институте электросварки, им. Е.О. Патона НАН Украины

Научный руководитель: старший научный сотрудник, кандидат технических наук Игнатенко А.И.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Лещинский Л.К., доктор технических наук, профессор Григоренко Г.М.

Ведущее предприятие — Украинский институт сварочного производства.

Направляем Вам для ознакомления автореферат диссертации инженера Арсенюка В.В. Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения принять участие в заседании специализированного совета или прислать свои отзывы (1 экз., заверенный печатью) по адресу: 341000, Мариуполь, пер. Республики, 7, ученому секретарю специализированного ученого совета.

Защита состоится 28 декабря 1994 г. на заседании специализированного ученого совета (К14.01.02) при Приазовском государственном техническом университете.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Приазовского государственного технического университета.

Автореферат разослан 28 ноября 1994 г.

Ученый секретарь специализированного совета д-р техн. наук, проф.

*В.Я. Зусин* В.Я. ЗУСИН

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

В различных отраслях техники широкое применение нашли плазменная резка, сварка и напыление металлов. Эксплуатационные возможности любого плазменнодугового устройства в значительной степени определяются ресурсом электродного узла, зависящего от его конструкции и технологии изготовления.

Наиболее распространенным методом изготовления электродов для плазмотрона при плазменной резке является способ холодной или горячей запрессовки циркониевой или гафниевой вставки в медную державку. Однако низкая тепло- и электропроводность пары активная вставка-медная державка в основном определяют стойкость электрода в условиях эксплуатации.

Поэтому возникла необходимость в создании электродного узла плазмотрона, обладающего высоким ресурсом за счет совершенствования конструкции и технологии изготовления.

### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение физико-химических основ взаимодействия циркония и гафния с медью при ударной сварке в вакууме и разработка на этой основе технологии и оборудования для получения сварных электродов плазмотронов с повышенными служебными свойствами.

Для достижения этой цели необходимо было решить следующие задачи:

— исследовать влияние температурно-временных условий взаимодействия контактирующих металлов на процессы формирования зоны объемного взаимодействия;

— изучить влияние термического цикла сварки на характер изменения его напряженно-деформированного состояния;

— изучить влияние пластической деформации соединяемых металлов на процессы массопереноса в приконтактных объемах;

— разработать технологию сварки циркония и гафния с медью и создать специализированное оборудование ударной сварки в вакууме электродов для плазмотрона.

### НАУЧНАЯ НОВИЗНА

1. Изучена кинетика образования и роста интерметаллидов в зонах контакта циркония и гафния с медью при нагреве до  $880^{\circ}\text{C}$ , на основании которой выбраны основные условия получения соединения без интерметаллидов.

2. Установлено, что развитие сдвиговых деформаций за счет направленного перемещения микрообъемов металлов обуславливает образо-

вание металлических связей между ними и проявление эффекта ускоренного перемещения атомов через границу раздела.

3. Разработан новый способ ударной сварки в вакууме, совмещающий процессы сварки и формовки изделия.

На защиту выносятся следующие положения работы.

1. Результаты изучения кинетики формирования зоны объемного взаимодействия между цирконием, гафнием и медью при сварке давлением с подогревом в вакууме.

2. Расчетные оценки распределения напряжений в электроде, позволяющие прогнозировать термический цикл сварки.

3. Критерии выбора температурно-временных условий сварки, способствующих образованию качественных соединений без интерметаллидов и эвтектик.

4. Способ ударной сварки в вакууме разнородных металлов, совмещающий процессы сварки и формовки изделия.

5. Технологический процесс ударной сварки в вакууме циркония и гафния с медью применительно к изготовлению электродов для плазмотронов, обеспечивающий высокое качество электродов. Новое специализированное сварочное оборудование.

#### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе использованы современные методы и методики оптической и растровой микроскопии, рентгеноструктурного и микрорентгеноспектрального анализов, новые методики изучения диффузионной подвижности атомов в сварных соединениях и исследовательская аппаратура для стендовых испытаний электродов плазмотрона.

#### ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ И РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

На основании проведенных исследований температурно-временных условий формирования медно-циркониевых и медно-гафниевых соединений обосновано применение способа ударной сварки в вакууме с одновременной формовкой изделия. Полученные результаты использованы при разработке технологии сварки электродов для плазмотронов. Для серийного выпуска электродов плазмотрона разработана и изготовлена специализированная аппаратура нескольких типов.

Разработанная технология изготовления электродов позволяет получить их надежное соединение без слоя интерметаллидов с ресурсом работы в 1,5–2,0 раза выше, чем у электродов, полученных методом механической запрессовки. По этой технологии изготовления партия термокато-дов нескольких модификаций, которые по своим эксплуатационным характеристикам превосходят производящиеся в настоящее время в Украине и за ее рубежом. Результаты работы реализованы на ряде предприятий Украины и России, а специализированное оборудование внедрено на предприятиях Минатомэнерго.

#### АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на международных научно-технических конференциях «Высокие техноло-

гии в машино- и приборостроении» (Саратов, 1993), «Современные проблемы сварочной науки и техники» (Ростов-на-Дону, 1993), «Электронно-лучевая технология» (Москва, 1993), а также на семинарах в Институте электросварки им. Е.О. Патона НАНУ (Киев, 1994).

Диссертационная работа в целом обсуждалась на технологическом семинаре ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ (Киев, 1994).

*Публикации.* По материалам диссертации опубликовано 4 печатных работы.

*Структура и объем работы.* Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов и списка использованной литературы. Работа содержит 148 страниц, в том числе 103 страниц машинописного текста, 61 рисунок, 14 таблиц и библиография из 53 наименований.

*Во введении* обоснована актуальность выполненной работы, сформулированы цель и задачи, которые решались в процессе исследований, научная новизна полученных результатов, а также практическая ценность; приведены положения, выносимые на защиту.

*В первой главе* произведен анализ известных способов изготовления электродов плазмотрона, проанализированы технологические трудности при изготовлении изделий из разнородных металлов, критически рассмотрены процессы, ответственные за качество соединений, полученных сваркой давлением, определены направления в решении поставленных задач.

*Во второй главе* представлена характеристика использованного оборудования и исследуемых металлов, а также методик, применяемых в процессе выполнения работы.

*В третьей главе* изложены результаты расчетно-экспериментальной оценки условий формирования соединения при ударной сварке в вакууме применительно к разработке технологии изготовления медно-циркониевых и медно-гафниевого электродов плазмотрона.

*В четвертой главе* представлены особенности технологии изготовления электродов плазмотрона, разработана специализированная оснастка и изложены результаты лабораторных и промышленных испытаний электродов. Показаны возможности практического применения разработанной технологии.

*В общих выводах* сформулированы основные результаты работы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Плазменная резка металлов находит широкое применение в различных отраслях техники. Интерес промышленности к этому технологическому процессу можно проиллюстрировать тем, что за период 1975–1990 гг. различными предприятиями СССР было выпущено более 10 тыс. установок плазменной резки, а количество электродов, потребляемых ими в качестве сменного инструмента, составляло в 2,5...2,75 млн.шт. в год. На долю их производства в Украине приходилось примерно 25...30 %.

Электроды плазмотронов для воздушно-плазменной резки, сварки и напыления представляют собой активную вставку из циркония или гафния, помещенную в теплоотводящую медную державку. В настоящее время электроды изготавливают методом совместного горячего или холодного прессования активной вставки с медной державкой. Стойкость электродов в процессе работы плазмотрона в значительной мере определяется интенсивностью теплоотвода от вставки в державку и эрозийной стойкостью. На основании анализа особенностей работы электродов можно заключить, что с целью обеспечения максимального ресурса работы катодов необходимо применить такую технологию их изготовления, которая обеспечивает гарантированный тепловой и электрический контакт между медной державкой и вставкой из циркония или гафния по их боковой поверхности в течение всего времени работы катода.

Технология изготовления электродов должна гарантировать невозможность проникновения воздуха или кислородсодержащих сред в зону контакта активной вставки с медной обоймой, т.к. в противном случае будет происходить образование оксидов Zr или Hf, что приведет к появлению пор и трещин. Можно утверждать, что только образование соединения в твердой фазе между материалом активной вставки и медной державкой позволит обеспечить надежный тепловой и электрический контакт.

Температурно-временные условия образования соединения, условия возникновения и роста интерметаллидов в зоне контакта активной вставки с державкой, уровень термонапряжений, обусловленный существенным различием значений коэффициентов линейного расширения соединяемых металлов, являются своеобразной прогностической характеристикой, определяющей жизненный цикл электрода.

Изучение кинетики образования и роста интерметаллидов в зоне контакта циркония и гафния с медью позволило определить необходимые условия для получения качественного сварного соединения.

Экспериментально установлено, что скорость образования толщины слоя интерметаллидов в температурном интервале до  $880^{\circ}\text{C}$  в соединении гафния с медью значительно выше, чем у соединения циркония с медью.

Предотвратить или ограничить образование интерметаллических фаз можно путем снижения температуры и сокращения продолжительности протекания процесса соединения металлов.

Требованиям, предъявляемым к условиям сварки давлением, в максимальной степени соответствует способ ударной сварки в вакууме (УСВ), разработанный в ИЭС им. Е.О. Патона.

Для изготовления качественных электродов ударной сваркой в вакууме предложен способ совмещающий процессы сварки и формовки изделия в специализированных устройствах при скорости деформирования выше  $10^4 \text{ с}^{-1}$ . На рис.1 представлена циклограмма процесса ударной сварки в вакууме.

Определено, что основными параметрами УСВ являются температура нагрева и энергия удара. Общее время сварочного цикла состоит из подготовительного периода  $t_1+t_2$ , времени сварки и формовки изделия  $t_3=10^{-2}$ , а также времени охлаждения  $t_4$ . Температура и время предварительного нагрева выбираются исходя из условий очистки поверхности от оксидов, необходимости уменьшить различия в характеристиках пластичности соединяемых металлов. Время охлаждения  $t_4$  лимитируется конструкцией сварного изделия и температурно-временными условиями обра-

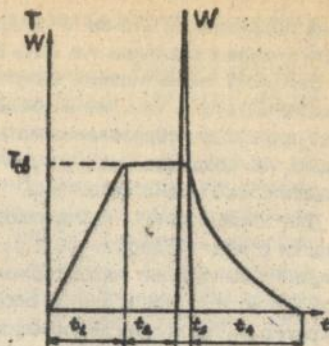


Рис. 1. Циклограмма процесса сварки ударом

образования интерметаллидов, если речь идет о сварке разнородных металлов, обладающих ограниченной взаимной растворимостью. Длительность деформации в  $10^3 \dots 10^5$  раз меньше продолжительности охлаждения.

В процессе совместной деформации происходит образование физического контакта, активация поверхностей соединения с установлением межатомных связей. Условия скоростной деформации в специализированных устройствах создают не только направленную деформацию металлов в зоне контакта, но также обеспечивают определенную форму активной вставки в медной державке.

Известно, что при ударной сварке (скорость деформации  $10^2 \text{ с}^{-1}$ ) наблюдается аномально высокая подвижность атомов в твердой фазе, превосходящая скорость диффузии в металлах без деформации, а также на 3-4 порядка выше, чем в жидком металле.

Применительно к решению нашей задачи аномально высокая подвижность атомов была исследована на натуральных образцах, для чего перед сваркой на поверхность активной вставки из циркония наносили тонкий (приблизительно 1 мкм) слой радиоактивного никеля  $^{63}$ . Сварку проводили при температуре  $800^\circ\text{C}$ . Выбор радиоактивного изотопа никеля при изучении процесса массопереноса в зоне контакта меди с цирконием обусловлен, во-первых, отсутствием изотопа меди, а во-вторых, атомные радиусы для никеля и меди составляют 0,124 и 0,128 соответственно.

Идентичность расположения концентрационных кривых распределения изотопа  $^{63}\text{Ni}$ , полученных методом автордиографии после исследований образцов, изготовленных ударной сваркой в вакууме макета электрода и плоских пластин, деформированных в формирующих устройствах, свидетельствуют о том, что при УСВ в формирующих устрой-

ствах подвижность атомов в твердом теле может превышать подвижность атомов в расплаве, т.е. быть более чем  $10 \cdot 5 \text{ см}^2/\text{с}$ .

Сам факт перемещения меченных атомов через границу раздела свидетельствует о том, что в процессе формирования электрода в матрице происходит образование металлической связи между цирконием и медью, т.е. создаются условия для надежного теплоотвода от активной вставки в тело медной державки.

Для определения термодформационного соединения активной вставки с медной державкой в различных условиях деформации и охлаждения был принят макет термокатода в виде медного кольца с радиусом  $r$ , по оси которого плотно посажена активная вставка из циркония. Нагретую до  $T_{\text{св}}$  сборку деформировали в стальной матрице при скорости деформации  $10^{-2} \text{ с}^{-1}$  с последующим остыванием в матрице, на воздухе и в термосе.

Поскольку радиус сборки соизмерим с толщиной, то для решения задачи были приняты условия плоской деформации. Рассматривали средние по толщине радиальные  $\sigma_{rr}$ , окружные  $\sigma_{\theta\theta}$  и осевые  $\sigma_{zz}$  напряжения. Температурное поле определяли решением уравнения теплопроводности.

Анализ полученных результатов распределения напряжений в макете электрода после полного охлаждения показывает, что активная вставка находится в сжатом состоянии, о чем свидетельствуют высокие осевые напряжения ( $\sigma_{zz} = 470 \dots 490 \text{ МПа}$ ), а также окружные и радиальные напряжения ( $\sigma_{\theta\theta} = \sigma_{rr} = 120 \text{ МПа}$ ) при деформации по радиусу  $\Delta U = 0,1 \text{ мм}$ . Если радиальные  $\sigma_{rr}$  напряжения свой характер не меняют, то окружные  $\sigma_{\theta\theta}$  и осевые  $\sigma_{zz}$  ближе к периферии медного кольца меняют характер напряжения сжатия на растяжение.

Из модели напряженного состояния макета электрода следует, что скоростное остывание в матрице создает сжимающее напряженное состояние в медной державке и активной вставке. Уровень напряжений незначительно изменяется в зависимости от условий охлаждения макета электрода, поэтому при разработке технологии и оборудования для изготовления электродов температура и среда остывания не окажут существенного влияния на качество соединения.

Разработка технологии, аппаратуры и оснастки для осуществления процесса ударной сварки в вакууме электродов плазмотронов проводилась исходя из следующих соображений:

— конструкция электрода не должна претерпевать серьезных изменений по сравнению с серийно выпускаемыми изделиями;

— проектирование и изготовление оснастки целесообразно проводить для оптимального (с точки зрения работоспособности) типа соединения;

— оборудование для ударной сварки в вакууме должно быть максимально автоматизировано для получения надежного соединения пары разнородных металлов.

Для изготовления электродов, серийно выпускаемых Опытным заводом ИЭС им.Е.О.Патона, разработана оснастка и принципиальная

технология ударной сварки в вакууме в условиях совмещения сварки с формовкой изделий.

В качестве материала державки применяется медь М1 ГОСТ 859-78, а вставка изготовлена из проволоки циркония (сплав 110 ТУ.001.150-80) или проволоки гафния диаметром 2,2...2,3 мм.

Учитывая, что в условиях скоростной деформации происходит дополнительный разогрев металла за счет выделения энергии при пластической деформации, температура предварительного нагрева для пары цирконий-медь должна превышать 750...780 °С, а для пары медь-гафний — 800...850 °С, т.е. ориентировочно быть на 100 °С меньше температуры образования эвтектики. При возрастании температуры предварительного нагрева последующая деформация медной державки обуславливает образование очагов эвтектики.

Экспериментально определена удельная энергия удара для трех типов электродов.

Процесс изготовления электрода происходит в следующей последовательности. На нагретую электронно-лучевым нагревателем заготовку (сборку), размещенную над матрицей, прикладывают одиночный импульс силы, который посредством пуансона подает сборку в канал матрицы, где происходит мгновенная пластическая деформация, завершающая одновременно сварку и формовку изделия с утолщением на торцах активной вставки (рис.2).

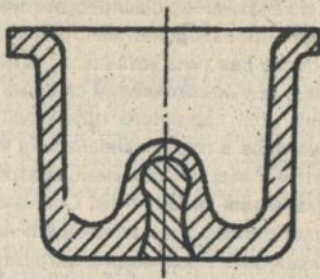


Рис.2. Электрод плазмотрона

Металлографические исследования зоны соединения активной вставки и медной державки, полученной при сварке на оптимальных

режимах, а также результаты микрорентгеноспектрального анализа и вид сканиограмм свидетельствуют о том, что между вставкой и державкой существует межатоменная связь, т.е. осуществлен процесс сварки давлением в вакууме, а дефекты в виде эвтектик или сплошного слоя интерметаллидов отсутствуют.

Методами рентгеновского, спектрального, электроннографического и микрорентгеноспектрального анализа установлено, что зона контакта в соединении активной вставки с медной державкой состоит из твердых растворов медь-цирконий или медь-гафний.

Испытания электродов плазмотронов проводили на специализированном стенде при следующих параметрах:

- ток дуги 250...300 А;
- напряжение дуги 150...170 В;
- продолжительность включений 60 с;
- продолжительность паузы 5 с.

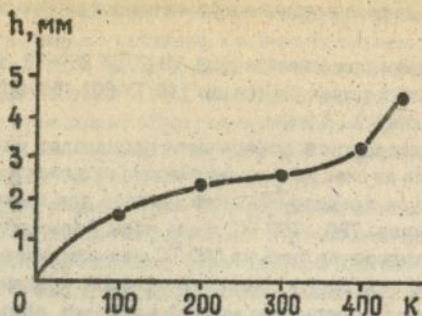


Рис. 3. Зависимость глубины эрозии  $h$  от количества включений  $K$

2,0...2,3 мм и высотой 4,5...5,0 мм происходит за 450...500 включений, причем результаты испытаний показывают, что ресурс работы сварных электродов стабилен и в 1,5–2,0 раза выше для всех испытанных образцов по сравнению с запрессованными вставками из циркония и гафния.

Для производства электродов плазмотрона в настоящее время разработано два типа установок. Установка типа У-860 может быть использована при изготовлении сварных электродов в количестве до 60 шт. в смену. Для серийного производства с объемом выпуска до 500 тыс. электродов в год предназначена установка УЛ-225. Установка работает в автоматическом режиме с контролем и записью параметров процесса образования соединения. Система автоматического управления, конструкция приемного и подающего наполнителей оснащены шлюзами, позволяющими производить загрузку заготовки и выгрузку готовых электродов на воздухе без разгерметизации рабочей камеры.

Комплекс выполненных исследований позволяет сократить годовую потребность в электродах для плазмотронов на 20 % за счет увеличения ресурса их работы, существенно уменьшить расход дефицитных материалов: меди, гафния и циркония, а также обеспечить повышение надежности и ресурса работы плазменных установок.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. На основе результатов аналитических исследований работы электрода плазмотрона, особенностей взаимодействия соединяемых металлов и существующих способов соединения циркония и гафния с медью показана целесообразность применения способа ударной сварки в вакууме.

2. Изучение кинетики образования и роста интерметаллидов в зоне контакта циркония и гафния с медью при нагреве до  $880^{\circ}\text{C}$  позволило выбрать основные условия получения соединения без интерметаллидов.

3. Экспериментально определено, что темпы роста толщины слоя интерметаллидов в температурном интервале до  $880^{\circ}\text{C}$  в соединении гафния с медью значительно выше, чем у соединения циркония с медью.

4. Расчетным методом определен уровень напряжений, обусловленный различием значений коэффициентов линейного расширения соединяемых металлов. Показано, что охлаждение электрода от температуры  $800^{\circ}\text{C}$  на воздухе, в матрице или термосе не приводит к существенным изменениям уровня напряжений.

5. Разработан способ ударной сварки в вакууме, совмещающий процессы сварки и формовки изделия.

6. Определены оптимальные параметры процесса (энергия удара и температура предварительного нагрева) для трех типов электродов с циркониевой или гафниевой вставкой. Показано, что с учетом экспериментально установленного факта теплового эффекта деформации температура предварительного нагрева для пары цирконий-медь должна составлять  $750\text{--}800^{\circ}\text{C}$ , для пары гафний-медь —  $870\text{--}920^{\circ}\text{C}$ .

7. Впервые получено сварное соединение вставки гафния и циркония с медной державкой, которое характеризуется отсутствием слоя интерметаллидов, эвтектик, но имеет металлическую связь в зоне контакта.

8. С помощью радиоактивных изотопов, микрорентгеновского анализа, метода оптической спектроскопии подтвержден эффект ускорения перемещения атомов в зоне объемного взаимодействия соединяемых металлов. Установлено, что эффект аномального массопереноса проявляется в большей степени в тех участках взаимодействия циркония с медью, где интенсивнее идут сдвиговые деформации.

9. Результаты научных исследований позволили разработать технологию и аппаратуру для изготовления сварных электродов нового поколения.

10. Разработанные технология и оборудование дают возможность сократить годовую потребность в электродах для плазмотронов на 20 % за счет увеличения ресурса их работы, существенно уменьшить расход дефицитных материалов (меди, гафния, циркония) и обеспечить повышение надежности и ресурса работы плазменных установок.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах.

1. Исследование качества термокатодов, изготовленных ударной сваркой в вакууме / А.И.Игнатенко, В.В.Арсенюк, Г.К.Харченко, В.И.Мозговой // Высокие технологии в машино- и приборостроении: Материалы конф. (Саратов, май 1993 г.). — Саратов: СГУ, 1993. — С. 141–143.

2. Особенности массопереноса в различных условиях сварки давлением / Л.И.Маркашова, В.В.Стаценко, А.И.Игнатенко, В.В.Арсенюк // Там же. — С. 114–116.

3. Особенности образования соединения при сварке давлением / В.В.Арсенюк, В.В.Данильченко, А.И.Игнатенко, Г.К.Харченко // Современные проблемы сварочной науки и техники: Материалы междунауч.-техн. конф. (Ростов-на-Дону, 27–30 сент. 1993). — Ростов-на-Дону: ДГТУ, 1993. — С. 4–6.

**ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА.** В [1, 2, 4] представлена технология изготовления сварных электродов плазматрона и исследованы особенности формирования сварного соединения в условиях совмещения сварки и формовки изделий в специализированных устройствах.

В [3] изложены результаты исследований влияния скорости деформации на интенсификацию процесса, ответственных за образование высококачественных сварных соединений, полученных ударной сваркой в вакууме.

## АНОТАЦІЯ

**Арсенюк В.В.** Ударне зварювання в вакуумі цирконія і гафнія з міддю стосовно до створення електродів для плазматронів, рукопис, дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 «Технологія і машини зварювального виробництва», Приазовський державний технічний університет, Маріуполь 1994 р. Теоретичні і практичні дослідження формування зварних з'єднань в умовах швидкісної пластичної деформації. Розроблено новий спосіб ударного зварювання в вакуумі, який поєднує процеси зварювання та формування виробів. Визначено оптимальні параметри ударного зварювання для виготовлення електродів трьох типорозмірів із міді з цирконієм або гафнієм.

На основі наукових досліджень розроблено технологію і апаратуру для одержання електродів нового покоління, які мають ресурс роботи, що у 1,5-2,0 рази перевищує ресурс серійно виготовлюваних виробів.

Ключові слова : зварні електроди, ударне зварювання в вакуумі, ерозія, ресурс роботи.

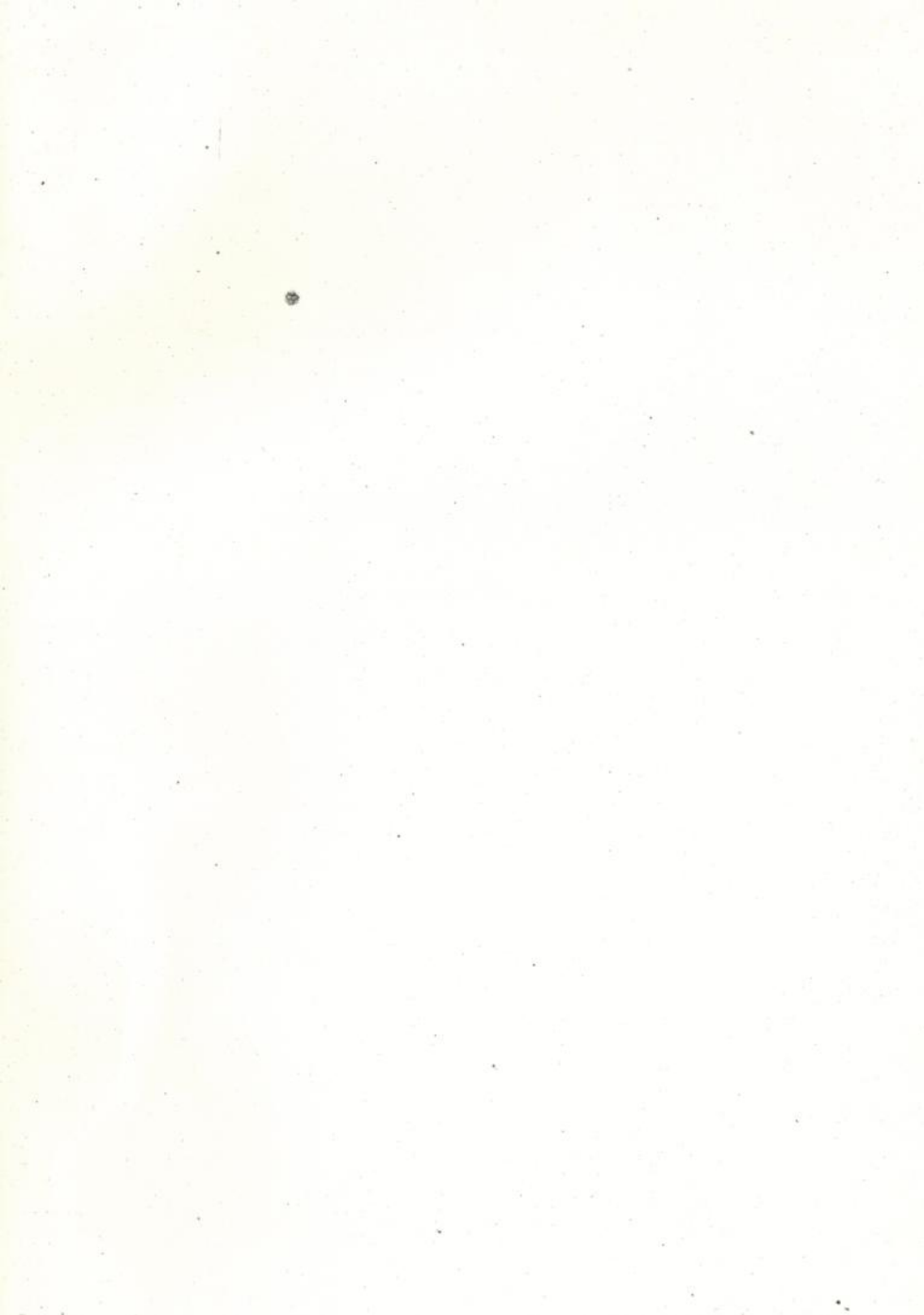
**Arsenyuk V.V.** Percussion welding of zirconium and hafnium to copper in vacuum as applied in fabrication of electrodes for plasmatrons, (manuscript). Thesis for the title of Candidate of Sciences (Eng.) in the speciality of «Technology and Machines for Welding Production», Near-Azov State Technical University, Mariupol, 1994. Theoretical and applied research of welded joint formation under the conditions of high-speed plastic deformation. A new process of percussion welding in vacuum has been developed, which combines the processes of product welding and forming. The optimum parameters of percussion welding have been determined for making three typesizes of electrodes of copper with zirconium and hafnium. The research was used to develop the technology and equipment for fabrication of a new generation of electrodes the service life of which is by 1.5 to 2.0 times longer than that of the mass-produced items.

Подл. в печ. 18.11.94. Формат 60x84/16. Бум. тип. № 1.  
Офс. печ. Усл. печ.л. 0,93. Усл. кр.-отт. 1,39. Уч.-изд. л. 0,87.  
Тираж 120 экз. Бесплатно. Зак. 308.

---

ПОПИЗС им. Е.О. Патона. 252650, Киев-5, ГСП, ул. Горького, 69.





AB 31.484

**AB 31.484**