



**Національна академія наук України  
Південний науковий центр  
Інститут імпульсних процесів і технологій  
Національний університет кораблебудування  
імені адмірала Макарова  
Українське матеріалознавче товариство  
Херсонська державна морська академія**

**100-річчю  
Національної академії наук України  
присвячується**



**МАТЕРІАЛИ  
Всеукраїнської наукової конференції  
«Сучасні технології обробки матеріалів»**

**1-2 листопада 2018 року**

**м. Миколаїв**

УДК 620.22      С91

Затверджено до друку вченою радою Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України 06.09.2018 протокол №8.

Редакційна колегія:

д-р техн. наук Кускова Н.І. - відпов. ред.

д-р техн. наук Сизоненко О.М.

канд. техн. наук Петриченко С.В.

канд. техн. наук Зайченко А.Д.

канд. ф.-м. наук Цуркін В.М.

канд. техн. наук Сінчук А.В.

С91    **Сучасні технології обробки матеріалів:** Матеріали - Всеукраїнської наукової конференції, 1-2 листопада 2018. – Миколаїв; КП „Миколаївська обласна друкарня”, 2018. - 76 с.

У збірнику наведені матеріали Всеукраїнської наукової конференції «Сучасні технології обробки матеріалів» за напрямками роботи конференції: новітні технології та обладнання для обробки і синтезу матеріалів; процеси отримання матеріалів та утилізації відходів; системи діагностики і контролю процесів обробки матеріалів.

© Інститут імпульсних процесів  
і технологій НАН України, 2018

УДК 620.22

## 100-РІЧЧЮ НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ ПРИСВЯЧУЄТЬСЯ

27 листопада 2018 року виповнюється 100 років від дня заснування Національної академії наук України, що стало закономірним результатом поступального розвитку українських наукових традицій XV– початку XX століть. Сьогодні Національна академія наук України є вищим державним об'єднанням науковців, яке здійснює дослідження в різних галузях знань, створює наукові основи технологічного, соціально-економічного та культурного розвитку нашої країни. За цей довгий час вчені НАН України принесли на вітвар науково-технічного прогресу безліч результатів фундаментальних і прикладних досліджень світового рівня. На їх рахунок чимало відкриттів і розробок, що знайшли широке використання в промисловості, сільському господарстві і культурі. Це і штучна ядерна реакція перетворення ядер літію в ядра гелію, і перший прискорювач заряджених частинок, це унікальні технології отримання важкої води, передові технології електрозварювання, отримання надтвердих матеріалів, синтетичних алмазів тощо.

Лише за останні роки попри досить складні умови роботи вчені Академії додали до свого добробку вагомому низку здобутків на сучасних наукових напрямках, а саме: виявлення досі не відомих особливостей руху швидких частинок із власним обертовим моментом довкола чорної діри; новий метод побудови нейронних мереж, що враховує особливості кільцевої організації нейронів; модель народження віртуальних фотонів, що генерують неізотропне випромінювання, кутова залежність якого може бути ознакою утворення кварк-глюонної плазми; експериментальне підтвердження того, що карликові галактики з високим темпом утворення зірок можуть бути відповідальними за вторинну іонізацію Всесвіту; відкриття нового способу транспортування лікарських препаратів у крові людини; отримання молекулярно-генетичних доказів еволюційної консервативності мітотичного апарату поділу клітин; з'ясування рівня і чинників зростання соціальної напруженості в українському суспільстві. Принципово нових наукових результатів досягнуто, здебільшого, на перетині різних галузей наук, що засвідчує необхідність подальшого посилення уваги до організації міждисциплінарних досліджень. Високий рівень отриманих результатів значною мірою забезпечується співпрацею вчених НАН України з провідними зарубіжними науковими центрами, участю у великих міжнародних програмах і проектах.

Сьогодні НАН України здійснює науковий супровід реалізації пріоритетів економічного розвитку держави, посилює зв'язки з виробничою сферою, налагоджує співпрацю з об'єднаннями роботодавців, промисловців і підприємців. Укладено угоду про співпрацю з Міністерством економічного розвитку і торгівлі України, яка передбачає ефективне використання потенціалу НАН України для забезпечення інноваційного розвитку, для підвищення конкурентоспроможності вітчизняного виробництва. Так, українські вчені розробили та реалізували на практиці перехідний паливний цикл, завдяки чому стало можливим використання ядерного палива компанії Westinghouse на вітчизняних АЕС. Промислова технологія модифікування рідких каучуків дала змогу повністю вирішити проблему імпортозаміщення при створенні вітчизняного виробництва твердого ракетного палива. На 2018 рік заплановано широке використання підприємствами Укроборонпрому нових композитних і шаруватих матеріалів для захисту легкоброньованої техніки. Планується впровадження технології контактного стикового зварювання пульсуючим оплавленням високоміцних рейкових стиків на рейкозварювальних підприємствах Укрзалізниця. Розпочато процедуру державної сертифікації та підготовку до серійного виробництва медичних пов'язок із радіаційно зшитих гідрогелів для лікування ран і опіків. Вперше в Україні впроваджено створені на основі ДНК-маркерів молекулярно-генетичні системи для генотипування та селекції цінних рослин. Розроблено інформаційно-аналітичну систему для прогнозування розвитку енергетики.

Безумовним пріоритетом інноваційної діяльності НАН України були і надалі мають залишатися роботи, спрямовані на зміцнення безпеки й обороноздатності держави. В останні роки Академія спільно з Генеральним штабом Збройних сил України, Укроборонпромом, іншими відомствами здійснила заходи з актуалізації своєї «оборонної тематики» й використання результатів, отриманих за цільовою програмою НАН України «Дослідження і розробки з проблем підвищення обороноздатності і безпеки держави». Хоча за цією програмою досі виконувалися виключно прикладні проекти, узгоджені з конкретними замовниками, на думку президента Академії академіка Б.С. Патона, вже настав час переходити до створення й фундаментального добробку, який в подальшому стане основою нових технологій як спеціального, так і подвійного призначення. Національна академія наук сподівається на державну підтримку своїх наукових колективів, котрі проводять оборонні дослідження в рамках нового фонду, який зараз створюється, а саме – державного фонду розвитку ключових технологій та підтримки інновацій в оборонно-промисловому комплексі.

За 100-річчя свого існування наукова академічна школа виховала сотні й тисячі талановитих учених та інженерів, які демонстрували і зараз демонструють яскравий приклад наполегливої кропіткої праці в ім'я науково-технічного прогресу, палкої відданості науці, безкорисного служіння українському народові і державі.

Серед наукових установ Академії посів чинне місце і наш Інститут імпульсних процесів і технологій. 46 років тому наша установа увійшла до складу Академії, стала її невід'ємною частиною, а зараз є єдиною академічною установою в Миколаївському регіоні та єдиною спеціалізованою установою на пострадянському просторі, яка займається розробкою теорії імпульсних процесів перетворення енергії, створенням імпульсних джерел енергії високої густини та систем керування ними, дослідженнями

імпульсної дії високоінтенсивних потоків енергії на багатофазні середовища, різноманітні матеріали та конструкції і створенням на цій основі нових технологій.

На сьогодні стараннями вчених нашого інституту стала цілісною теорія підводного електровибуху. За минулі роки було досконало вивчено вплив різноманітних випадкових стохастичних чинників на процеси перетворення енергії на його різних стадіях, визначено кореляційні зв'язки між ними і виявлено найбільш істотні чинники, що впливають на ефективність перетворення енергії.

На основі електровибуху графітових провідників і електророзрядної обробки органічних рідин, газів і аерозолів, що містять вуглець, розвивається унікальний електророзрядний метод синтезу наноструктурних матеріалів різного функціонального призначення: сорбентів водню, інтелектуальних антифрикційних і протизносних присадок, нановуглецю з феромагнітними властивостями тощо.

В інституті розроблено і успішно розвивається новий метод синтезу ультрадисперсних композиційних порошків, що здійснюється шляхом електророзрядної обробки вихідних порошкових металів та різноманітних порошкових сумішей в гасі. Синтезовані таким чином продукти є високодисперсною і однорідною шихтою для отримання карбідосталей з високими фізико-механічними властивостями.

Вченими інституту визначено фундаментальні фізичні принципи підвищення фільтраційних властивостей пористих матеріалів природного походження за рахунок електророзрядного впливу на їх структуру, на основі чого успішно розвивається технологія електророзрядної обробки призабійної зони нафтових і водозабірних свердловин.

Обґрунтовано технологічні прийоми імпульсного штампування, що підвищують граничний ступінь деформації високоміцних алюмінієвих і залізовуглецевих сплавів порівняно зі статичною обробкою. Створено технологічний процес імпульсно-статичного калібрування.

Вперше у світовій практиці вчені інституту використали імпульсний коронний розряд для очищення підводних морських об'єктів від біологічного обростання, що продемонстрував високу продуктивність та безпеку для морської флори-фауни.

Інститутом реалізовано електророзрядний технологічний процес виготовлення водно-вугільного палива, яке має 99% повноту згоряння і меншу вартість гікалорії порівняно з традиційними видами палива.

Створено та перевірено на підприємствах України спосіб електророзрядної дезінтеграції кремнію. Для гірничорудних підприємств розроблено електророзрядний спосіб збагачення хвостів поліметалічних руд, що забезпечує приріст виходу таких металів, як мідь, золото і срібло.

На основі ґрунтового вивчення фізичних закономірностей електрохімічного вибуху інститут успішно розвиває один із найбільш економічно і екологічно перспективних способів руйнування габаритних бетонних і залізобетонних конструкцій та локального знеміцнення донних ґрунтів, скельних порід, природних монолітів тощо.

Вченими інституту розроблено фізико-технологічні основи електрофільтрації та деструкції екологічно небезпечних газових викидів на основі комбінованої дії штатних джерел електростатичних полів та додаткових джерел багаторівневих імпульсних напруг, які забезпечують генерацію стримерних розрядів для підвищення ефективності газоочищення.

Створено нові імпульсні високовольтні конденсатори, які, порівняно з попередниками, мають у 2 рази вище питомі енергетичні характеристики і можуть експлуатуватися з підвищеною частотою проходження зарядів-розрядів в умовах імпульсно-вібраційних навантажень за температур до 100°C і тиску до  $3 \cdot 10^5$  Па при незмінному ресурсі та надійності.

На базі аналізу електромагнітних процесів методом ЛАЧХ і багатофакторної оптимізації характеристик зарядних пристроїв, питомі масогабаритні показники високовольтних генераторів імпульсних струмів доведено до рівня 10 кг/кВт. Створено нове покоління високочастотних високовольтних імпульсних джерел живлення з частотою до 10 кГц, потужністю до 10 кВт, напругою від 10 до 150 кВ і наносекундними фронтами імпульсів, здатні реалізувати стримерні, коронні та об'ємні розряди в значних обсягах (більше 100 л плазми).

Результати фундаментальних і прикладних досліджень за цими та багатьма іншими напрямками втілені в передові розрядноімпульсні технології різного призначення, що впроваджені більш ніж на 1000 підприємствах світу. Розробки нашого інституту відзначені державними преміями, медалями та грамотами. За час перебування у складі НАН України співробітниками нашого інституту захищено 88 кандидатських дисертацій та 11 докторських, отримано 1835 охоронних документів на винаходи та корисні моделі, з них 405 патентів України, опубліковано десятки монографій, збірників праць, сотні журнальних статей.

Гідний вклад нашого інституту в зміцнення науково-технічного потенціалу України став можливим за умови плідної праці всього колективу інституту. Перш за все, ветеранів, під чиїм проводом проводились наукові дослідження і розробки, а також молоді, що продовжує славні традиції нашого колективу і є надійним оплотом подальшого розвитку і процвітання академічної науки в Україні та світі.

# МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОЙ ОЧИСТКИ ВОДЫ

С. А. Хайнацкий, А. И. Христо, Л. П. Шведов  
Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев

Непрерывный рост водопотребления наряду с устаревшими системами водоподготовки и очистки сточных вод приводит к возникновению острого дефицита пресной воды в Украине. В целом по запасам водных ресурсов из расчета на единицу площади и на одного жителя Украина занимает одно из последних мест в Европе. Поэтому проблема водоподготовки и очистки и обеззараживания сточных вод, и предотвращение дальнейшего загрязнения водоемов становится чрезвычайно актуальной в настоящее время.

В работе рассмотрены современные методы очистки воды от биологических и химических загрязнений, связанные с различными типами электрических разрядов и режимов работы. Обсуждаются достоинства и недостатки различных электроразрядных методов очистки применительно к конкретным видам загрязнений, их энергоэффективность и перспективы промышленного применения.

В настоящее время среди новых технологий по очистке и обеззараживанию воды наиболее перспективными являются окислительные фотохимические технологии, объединенные термином Advanced Oxidation Processes (AOP), включающие методы одновременного воздействия УФ-излучения и естественных для природной среды окислителей. К технологиям AOP относятся и технологии, использующие электрический разряд, в процессе которого может одновременно комплексно реализоваться воздействие на среду процессов Фентона, озонирования, формирования пероксида водорода и активных радикалов, ультрафиолетового облучения, микроволновой обработки, субкритического окисления влажного воздуха, электрохимического окисления, гомогенного и гетерогенного каталитического окисления.

В работе приведен краткий ретроспективный обзор научных работ, посвященных исследованиям процессов очистки воды импульсными электрогидравлическими разрядами в толще воды (искровым в жидкости и гетерогенных средах, коронным), и разрядами, в которых один из электродов перемещен в воздушную или воздушно-капельную среду (искровым, коронным, дуговым, скользящим, барьерным и др.). Показано, что акцент исследований в настоящее время постепенно смещается в сторону применения разряда в водо-воздушной, воздушно-капельной и пузырьковой средах. При этом все чаще применяется сильно неравновесная плазма, часто называемая нетермической плазмой, имеющая дополнительное преимущество, поскольку обеспечивает высокую энергетическую эффективность при очистке и обеззараживании воды из-за отсутствия затрат энергии на джоулев нагрев. Фактически, в настоящее время очистка воды – это технология, которая широко изучалась для многих видов нетепловой плазмы, таких как диэлектрические барьерные разряды (DBD), плазменная коронная струя, плавающие скользящие дуги и т. п. Исследования слишком многочисленны, чтобы перечислить их в одной работе. Это показывает, что тема активно исследуется, но также и то, что для всех приложений не найдено окончательного решения или оптимальной технологии. Одна из основных причин заключается в том, что не каждое приложение для очистки воды приносит одно и то же состояние плазмы.

Исследования ряда авторов микроразрядов над поверхностью воды и в ее толще показали, что в зависимости от целого ряда параметров – как электротехнических, так и геометрических, в одном и том же разрядном реакторе могут быть реализованы различные виды разряда – искровой, коронный, дуговой, скользящий и т.п., что в свою очередь, влияет на особенности протекания окислительно-восстановительных реакций в жидкости. В работе показано, что эффективность очистки воды от различных загрязнителей может зависеть от целого ряда факторов: вида разряда, полярности электродов, параметров приложенного напряжения, электропроводности и уровня pH жидкости, толщины слоя воды, скорости ее протока или перемешивания, высоты электрода над поверхностью и т.п. Например, импульс положительной полярности будет иметь высокую эффективность в электрогидравлическом или пузырьковом реакторе, в то же время импульс отрицательной полярности дает лучшую производительность в разрядных реакторах с газовой средой. Электрический разряд в газовой среде является более эффективным для разложения органики, чем разряд в жидкости.

В реакторах электрогидравлического разряда, а также в гетерогенных средах, где плазма производится непосредственно в жидкости, материал электродов или металлозагрузки имеет значительное влияние на разложение органических соединений и окисление других примесей из-за контакта плазмы с поверхностью электродов и формирования эродирующих частиц в воде. По сути, для каждого практического применения плазмы разряда необходимо разрабатывать и приспособлять специальные плазменные источники для того, чтобы получить оптимальные плазменные свойства. Определение связи между плазменными свойствами и наблюдаемыми эффектами является существенным для дальнейшей оптимизации метода.

Оптимизация плазменных реакторов для очистки воды с точки зрения затрат энергии и токсичности сточных вод – сложная задача, которая требует еще больших исследовательских усилий и понимания. Положительным фактором является то, что обработка воды на основе плазмы уже показала себя как универсальная технология, которая может найти применение при очистке биологического, органического и неорганического загрязнения после достаточной оптимизации. Дополнительным преимуществом может служить то, что гибкая конструкция электроразрядных методов позволяет им легко сочетаться с другими современными методами обработки. Такие комбинации могут привести к интересным синергетическим эффектам и дальнейшей оптимизации методов водоподготовки и очистки и обеззараживания сточных вод.

# ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА ПРОВОДНИКОВ В ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМАХ. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

С. А. Хайнацкий

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев

Развитие нанотехнологий, в частности, технологии получения наноразмерных порошков чистых металлов и их соединений, возобновило интерес исследователей к особенностям разрушения проводников при их электрическом взрыве (ЭВП) в разных средах. Для большинства электровзрывных технологий очень важным является вопрос определения «тонких настроек инструмента», т.е. нахождение необходимых для реализации наиболее подходящих условий воздействия на окружающую среду или материал взрывающегося проводника параметров разрядного контура, среды и самого проводника. К примеру, при электровзрывном получении нанопорошка, одними из самых важных параметров являются количество энергии, выделяющейся в проводнике к моменту взрыва, и скорость ее выделения.

Наибольшие значения удельной энергии выделяются в материале проводника в так называемых «одиночных» режимах взрыва, когда вся энергия, запасенная в конденсаторе, вводится в проводник в течение первого полупериода разряда (применяется также термин «согласованный» режим и «оптимальный» режим). В ряде работ основными предпосылками при построении методик эксперимента считается возможность свободно контролировать соотношение между введенной в проводник энергией и энергией сублимации металла проводника в процессе оптимального взрыва. Несмотря на то, что вся доказательная база построена безотносительно к свойствам среды, окружающей проводник, можно показать, что, по крайней мере, для оптимального взрыва проводника в жидкости это не так.

В настоящей работе определены условия реализации оптимального режима электрического взрыва проводников в жидкости и газе атмосферного давления. Показано, что удельная энергия, вводимая в проводник в оптимальном режиме, зависит только от свойств металла проводника. Получено соотношение, показывающее, какое количество энергии может быть введено в проводник в процессе его взрыва в оптимальном режиме. Сравнение экспериментальных данных для оптимального взрыва проводников с одинаковыми размерами в воде и атмосфере показало некоторые различия в доле энергии, выделяющейся в проводнике к моменту взрыва в том и другом случае. Из условий максимума мощности, вводимой в проводник к моменту оптимального взрыва в атмосфере, получены аналитические выражения для длины и диаметра проводника, аналогичные полученным ранее для взрыва в жидкости, и, соответственно, для удельной энергии, вводимой в проводник. В работе показано, что два важных энергетических параметра взрыва – удельная запасенная энергия и отношение энергии сублимации металла проводника к запасенной энергии для оптимальных режимов ЭВП в воздухе так же не зависят от внешних регулируемых параметров, как и для взрыва в воде. Установлены условия, обеспечивающие максимальную скорость выделения энергии в разрядном промежутке при ЭВП в воздухе. Полученные зависимости оптимальных параметров проводников близки по своему виду к тем, которые были разработаны для ЭВП в воде и отличаются только на постоянные множители. Следствием полученных соотношений является вывод о том, что разрушение металлических проводников при ЭВ в оптимальном режиме в воздухе так же, как и в воде, происходит в основном за счет тепловых процессов.

Установлено, что в определенной области значений параметров взрыва проводников достаточно точным критерием подобия электрических характеристик может выступать отношение запасенной энергии к массе проводника. Эта область расположена в некоторой окрестности оптимальных параметров ЭВП. Для ЭВП в оптимальных режимах в работе получен ряд соотношений, являющихся инвариантами по отношению к изменению электротехнических параметров энергоисточника и размеров проводника. Показано, что отношение запасенной энергии к массе проводника, к его объему (при одинаковой запасенной энергии), к энергии, необходимой для его полного испарения, а также отношение волнового сопротивления к омическому начальному сопротивлению проводника зависят только от параметров, характеризующих свойства металла. При этом значения критериев подобия П2 и П3 одинаковы для всех оптимальных режимов ЭВП вне зависимости от материала проводников. Используя эти соотношения, в работе получены некоторые граничные значения отношений напряжения к длине проводника и длины к диаметру, в рамках которых при ЭВП в оптимальных режимах проводник разрушается однородно за счет тепловых процессов, происходящих в его объеме. Применение всех рассмотренных в работе подходов для классификации видов электровзрыва проводников примерно равнозначно и правомерно. Применение подхода с использованием критериев подобия для предсказания характера взрыва, на наш взгляд, более «технологично», поскольку они записаны в явном аналитическом виде. Наши оценки показали, что повсеместно использовавшийся ранее подход к классификации с использованием удельной энергии также оправдан. Нами получено подтверждение, что отношение запасенной энергии к массе проводника также является критерием подобия, записанном в размерном виде. При этом применение рассмотренных подходов к предсказанию газодинамических характеристик взрыва носит ограниченный характер. В частных случаях, при фиксации всех остальных параметров влияние на газодинамические характеристики ЭВП оказывают те параметры, изменение которых приводит к существенным изменениям электрических характеристик.

# ЕЛЕКТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РОЗРЯДНИХ ІМПУЛЬСІВ ПРИ ДИСПЕРГУВАННІ ШАРУ ГРАНУЛ В РІДКИХ ГРАНИЧНИХ ВУГЛЕВОДНЯХ ТА ЗА ПРИСУТНОСТІ В РІДИНІ ЕРОЗІЙНО-ГЕНЕРОВАНОГО ПОРОШКУ

С.В. Петриченко

Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв

Об'ємне електроіскрове диспергування (ОЕІД) струмопровідних гранул у рідині (інші назви – електроімпульсна комплексна переробка матеріалів, іскроерозійне диспергування, електроімпульсна очистка рідини із застосуванням металозавантаження тощо) є відомим багатofункціональним методом обробки/переробки гетерогенних (твердо-рідкофазних) середовищ. Його широко застосовують для вирішення різних технологічних завдань: синтезу якісних мікронних і субмікронних порошкових матеріалів з можливістю змінення хімічного складу і структурних характеристик твердої фази; очистки поверхневих вод, гальваностоків від іонів важких металів, інших технічних рідин; отримання водню, горючих газів тощо. Реалізація методу полягає у комутації зарядженого конденсатора на міжелектродний проміжок заповнений гранулами і рідиною (зазвичай утворюють протік), коли впродовж одного імпульсу між гранулами формуються чисельні іскроерозійні розрядні канали. В якості рідини для синтезу порошкових матеріалів часто застосовують воду і вуглеводневі суміші (перспективні – граничні вуглеводні), найпоширеніші матеріали гранул – алюміній, залізо і графіт (застосовуються, також для очистки води). Обробка/переробка середовищ здійснюється із частотами слідування імпульсів до декількох кГц, тому в рідині, навіть за умови організації потоку, постійно міститься порошок у суспендованому стані. Важливим для стабілізації режимних характеристик електрообладнання установок ОЕІД є визначення відмінностей і загальних закономірностей в електричних характеристиках розрядних імпульсів при застосуванні таких різних щодо механізму і умов електричного пробую рідин як вода (чиста, 36 кВ/см) і граничні вуглеводні (циклогексан, 7 МВ/см), а також ролі часток порошку в цьому аспекті.

Складність організації пробую коротких (декілька мм) рідинних проміжків циклогексану відома з власного досвіду. Наразі також вважається доведеним (Коробейников С.М., 2010 рік) і те, що на відміну від води (взагалі, всіх інших рідин), пробій зріджених благородних газів і деяких граничних вуглеводнів (пентан, декан і циклогексан) може відбуватися за ударно-іонізаційним механізмом. Тим не менш встановлено, що для одного і того ж матеріалу гранул при відсутності в рідині ерозійно-генерованого порошку, формування ланцюжків іскроерозійних каналів на контактах між гранулами від електрода до електрода відбувається за тих самих початкових умов (мінімально необхідних) як у воді так і в циклогексані (значення зарядної напруги  $U_0$  із розрахунку найкоротшого ланцюжку пар контактів між електродами для кожної ємності діапазону). Не спостерігається суттєвих відмінностей електричних характеристик іскрового процесу і на активній стадії протікання розрядного струму, принаймні в традиційному для методу ОЕІД діапазоні робочих параметрів (наприклад,  $U_0$  від 300 до 600 В при характеристиках шару – 10x10 гранул в вертикальній міжелектродній площині). Інша ситуація спостерігається при порівнянні електричних характеристик розрядів в чистій рідині і в рідині, що містить ерозійно-генерований порошок (у концентраціях масштабованих до певного співвідношення частоти імпульсів зі швидкістю потоку рідини) за інших однакових умов. Так, наприклад для води, наявність порошку призводить до підвищення амплітуд розрядних струмів. При малих  $U_0$  відносна величина підвищення амплітуди може досягати 40-50 % і зменшуватися до нуля по мірі росту  $U_0$ . Відносне енерговиділення в міжелектродному проміжку (до запасеної в конденсаторі енергії) навпаки, при розряді у воді, що містить порошок значно нижче, різниця може досягати 20 % (наприклад 0,9 і 0,7) круто збільшуючись по мірі росту  $U_0$  від нуля до певного порогу насичення. Пояснюється це співвідношенням імпедансу міжелектродного проміжку на стадії протікання розрядного струму (який природно і відповідно до експериментальних даних нижчий при розряді у рідині з порошком) і опорів інших елементів розрядного контуру, цілеспрямоване регулювання яких має відомі технічні обмеження. Аналогічна ситуація щодо розрядних струмів спостерігається і для розрядів в циклогексані, який містить ерозійно-генерований порошок, однак є і відмінності. Відносне енерговиділення при змінненні  $U_0$  може лишатися на одному рівні і бути більшим від тієї ж величини при розряді між гранулами у воді з порошком і меншим ніж у чистій воді після досягнення порогу насичення. Отже певний вплив діелектричних властивостей такої рідини на електричні характеристики розряду все ж присутній і ймовірно він більше проявляється за умови накопичення кількості змочених контактних поверхонь на шляху формування і розвитку ланцюжків розрядних каналів.

Таким чином, використання граничних вуглеводнів в якості рідини для синтезу порошків методом ОЕІД, що виключає окислення матеріалу і створює сприятливі умови карбідізації, не призводить до суттєвих ускладнень умов формування розряду та необхідності змінення принципів стабілізації режимних характеристик електрообладнання установок ОЕІД. Розрядний струм може застосовуватись в якості виділеного каналу регулювання концентрації ерозійно-генерованого порошку в рідині для процесів обробки/переробки методом ОЕІД, але в обмеженому діапазоні робочих параметрів і концентрацій. Присутність порошку в рідині призводить до збільшення непродуктивних втрат енергії в елементах розрядного кола до певної межі по мірі підвищення зарядної напруги конденсаторного накопичувача установок ОЕІД. Граничні концентрації порошку щодо означеного ефекту потребують уточнення.

# ОСОБЛИВОСТІ ОБ'ЄМНОГО ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ДИСПЕРГУВАННЯ МЕТАЛЕВИХ І ГРАФІТОВИХ ГРАНУЛ В РІДИНІ

С.В. Петриченко

Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв

Застосування об'ємної електроіскрової обробки (ОЕІО) шару гранул в рідині дозволяє отримувати електроерозійні мікро- і нанопорошки з унікальними властивостями і реалізовувати продуктивність електротехнологічного обладнання на рівні 1 – 10 кг/год за питомих енерговитрат 2 – 12 кВт·год/кг.

Зазвичай використовують такі діапазони параметрів генератора імпульсний струмів: ємність конденсаторної батареї (С) – від 20 до 100 мкФ; зарядна напруга ( $U_0$ ) – від 200 до 600 В; частота слідування імпульсів – від 0,2 до 4 кГц. Означені величини, насамперед зарядна напруга, пов'язані із співвідношенням довжини шару (міжелектродної відстані) до середнього розміру гранули і обмежують діапазон цього співвідношення. Застосовують гранули розміром від 2 до 6 мм, ширина і висота шару – того ж порядку що і його довжина. Залежність продуктивності диспергування від висоти має екстремум. Як правило, для зарядних напруг обирають міжелектродну відстань, яка дорівнює 10 – 20 розмірам гранули, а об'ємну швидкість потоку рідини – від 15 до 30  $\text{дм}^3/\text{год}$ .

Такі умови (до 60 В на один контакт між гранулами при максимальній ємності діапазону) дозволяють отримувати порошки в режимах, коли на стадії протікання розрядного струму в міжелектродному проміжку виділяється до 0,6 (у в.о.) енергії, запасеної конденсатором ( $\eta_w$ ), після чого відбувається непродуктивне стікання заряду, або ж він залишається в конденсаторній батареї, якщо застосовують додаткові схемотехнічні засоби. І перший і другий варіант не є оптимальними.

Експериментальні результати, отримані на простих двохконтактних моделях шару дають підставу вважати, що насичення залежності  $\eta_w(U_0)|_{C=\text{invar}}$ , не є асимптотичним навіть для ємностей, що виходять за межі традиційних діапазонів. Тому доцільно розглянути характер  $\eta_w(U_0)|_{C=\text{invar}}$  при збільшення  $U_0$  принаймні до величин, що відповідають 15-20 класу тиристорних комутаторів. Встановлено що залежність  $\eta_w(U_0)$  має дві послідовні ділянки різкого зростання з наступним насиченням (з 0,6 до 0,87-0,9 і з 0,87-0,9 до 0,97-0,98, відповідно) і такі ж дві ділянки різкого спаду з наступним насиченням. Тобто, при певних значеннях спостерігається екстремум залежності  $\eta_w(U_0)|_{C=\text{invar}}$  по максимуму і відповідно оптимізація параметрів розрядного контуру по цьому критерію, а ділянки насичення є перспективним інструментом регулювання (по  $U_0$ ) самого іскрового процесу в шарі гранул без втрати енергоефективності електротехнологічної системи диспергування.

Вказані положення підтверджені експериментально для сталених гранул, 10x10 у вертикальній міжелектродній площині, при  $C=50; 100$  мкФ,  $U_0$  від 150 до 1600 В. Під енергією, що виділилася в міжелектродному проміжку слід розуміти чисельний інтеграл добутку осцилографічних сигналів розрядного струму і напруги на міжелектродному проміжку. Закономірність  $\max(\eta_w) \approx f(C, U_0)|_{L=\text{const}}$  було формалізовано з урахуванням матеріалу гранул.

Наразі затребуваними є порошкові вуглецеві наноматеріали, карбіди і вуглецевмісні композити. Існує позитивний досвід застосування ОЕІО графітових гранул (Золотаренко А.Д. і ін., 2009), близького за умовами реалізації до описаного вище, для формування вуглецевих наноструктур і вуглецевих порошкових композитів.

Однак, результати експериментів показали, що застосування звичайних діапазонів параметрів ( $U_0$  до 600 В, 10x10x10 гранул) і умов ОЕІО не дозволяють на графітових гранулах досягти навіть відтворення форми і амплітуди електричних характеристик послідовних розрядних імпульсів. Амплітуди розрядних струмів на порядок нижчі ніж за таких же умов при застосуванні металевих гранул. Ситуація змінюється при збільшення  $U_0$  до 1200 В – відбувається стабілізація електричних характеристик, а при  $U_0$  до 1600 амплітуди розрядних струмів в шарі графітових гранул лише в 3 рази менші за аналогічну характеристику, наприклад, в шарі сталених гранул.

Вочевидь, можливість використання напівпровідникових комутаторів (інших варіантів для забезпечення необхідних для промислового застосування ОЕІО частот слідування імпульсів наразі немає) суттєво обмежує допустимий діапазон параметрів шару гранул щодо співвідношення довжина міжелектродного проміжку / розмір гранули, а таке обмеження є досить критичним. Залежність  $\eta_w(U_0)|_{C=\text{invar}}$  для розрядів в шарі графітових гранул, як і для металевих, має екстремум по максимуму що досягає значень 0,95 – 0,97, отже для установок ОЕІО графітових гранул присутня можливість оптимізації параметрів розрядного контуру по  $\eta_w$ , однак є суттєва особливість – відсутні ділянки насичення, що вірогідно пояснюється специфічними теплофізичними властивостями такої форми вуглецю. На поверхні графітових гранул (були виготовлені із стрижнів, що застосовуються в спектрографії), як і на поверхні металевих, утворюються кратери, але їх розміри (в тому числі глибина) значно менші. Вірогідно, при диспергуванні графіту роль рідини в процесах плазмотворення вища, тому перспективним може бути застосування граничних вуглеводнів, зокрема циклічних, що може сприяти вирішенню проблеми однорідності фазового складу синтезованих наноматеріалів в продуктах обробки, яка наразі є актуальною.

# ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИРОДНОГО И ИСКУССТВЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Т.Д. Денисюк, А.Н. Рачков

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев

Процесс дезинтеграции играет важную роль в обогащении минералов, энергетике, промышленности строительных материалов, переработке вторичного сырья и других отраслях хозяйства. Он относится к высокоэнергетическим технологическим процессам. Около 5 % объема производства электроэнергии, производимой в мире, расходуется на дробление и измельчение твердых материалов в различных отраслях промышленности. Новым техническим направлением, позволяющим существенно снизить энергоёмкость процесса дробления и измельчения минерально-рудных материалов, является селективная дезинтеграция. Для осуществления принципа селективности дезинтеграции необходимы следующие условия:

- в процессе селективного дробления и измельчения напряжения, создаваемые в материале, должны иметь высокий градиент и при этом достигать максимума в зоне поверхностей раздела минеральных фаз. В результате быстрого убывания напряжений с расстоянием от указанных зон целостность фазовых объектов не будет нарушена, а будет обеспечена геометрическая селективность измельчения;

- значения и распределение напряжений в частице измельчаемого материала должны оптимально сочетаться со скоростью деформирования и продолжительностью нагружения для минимизации потерь энергии в процессах, сопровождающих разрушение частицы измельчаемого материала.

Перечисленные выше требования к процессу селективного измельчения реализованы в электрогидродинамических системах. Импульсный высоковольтный разряд в конденсированной среде, как инструмент быстрого преобразования энергии электрического поля в механическую, характеризуется большой концентрацией энергии, достаточно высоким давлением и температурой. Электроразрядная импульсная энергия имеет направленное действие, легко управляется, дозируется в заданном количестве. Динамика электроразрядной дезинтеграции минерально-рудных материалов такова, что разрушение матриц исходного материала происходит по менее прочным границам раздела зерен за счет растяжения и сжатия матриц импульсными нагрузками прямых и отраженных волн, генерируемых электроразрядом, что позволяет обеспечить дезинтеграцию материалов с заданными свойствами и характеристиками. Такая универсальность позволила применить электроразрядные технологии в различных отраслях промышленности и строительства.

Разрядно-импульсная дезинтеграция угля, в том числе каменного любой марки, отходов коксохимического производства, пыли или бурого угля, под действием высококонцентрированной энергии канала разряда, обеспечивает раскрытие сросшихся частиц минералов и углей, и позволяет достичь измельчения угля до тонкодисперсного состояния фракций от 0,2 мм и меньше. Электроразрядная дезинтеграция угля происходит в комплексе с процессами его десульфуризации и удаления суммы зольных микроэлементов. Высоковольтный разрядно-импульсный метод обработки угля в воде, как с добавками, так и без них, позволяет получить устойчивую водно-угольную суспензию, а также одновременно ее активизацию, и на порядок снизить удельные энергозатраты.

При обогащении полезных ископаемых основная роль дезинтеграции заключается в полном раскрытии минеральных сростков с образованием свободных зерен компонентов для последующего их разделения по физико-химическим характеристикам. Электроразрядный технологический процесс селективной дезинтеграции и реакционной активации полиметаллических руд и хвостов их обогащения за счет сжимающих и растягивающих усилий волн, генерируемых разрядами в воде, обеспечивает раскрытие тонковкрапленных минеральных компонентов, и за счет деструкции воды – образование необходимого количества газовых пузырей для качественной флотации, и за счет этого повышается качество обогащения полиметаллических рудных материалов. А кроме того, позволяет упростить процесс обогащения, снизить затраты и обеспечить экологическую чистоту процесса.

Электроразрядная технология селективной дезинтеграции позволяет за счет действия импульсных высоковольтных разрядов, как источника энергий высокой плотности, обеспечить с повышенным уровнем экологической безопасности малоотходную дезинтеграцию металлургического, поли- и монокристаллического кремния до заданной фракции с минимальным переизмельчением и с обеспечением необходимой его чистоты.

Применение разрядно-импульсной дезинтеграции при обработке ильменитовых концентратов и шламов в технологиях титанового производства позволит снизить содержание вредных элементов (серы и других) в диоксиде титана до уровня, удовлетворяющего производству титана и его соединений.

Технологии разрядно-импульсной селективной дезинтеграции разработаны на основе экспериментальных данных, не подкреплены фундаментальными теоретическими разработками. Обобщение результатов исследований позволяет углубить знание о процессах электроразрядного преобразования энергии, как основной составляющей электроразрядных процессов селективной дезинтеграции, обозначить допустимый диапазон вариаций параметров импульсного источника энергии, обеспечивающих необходимую интенсивность и конфигурацию гидродинамических нагрузок.

# ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ РАЗРЯДНОИМПУЛЬСНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ РАЗРУШЕНИЯ И ФОРМООБРАЗОВАНИЯ

А.И. Вовченко, Л.Ю. Демиденко, И.Н. Старков  
Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев

Электрогидроимпульсные системы (ЭГИС) широко применяются в различных технологиях импульсной обработки материалов и сред. Их основой является процесс трансформации энергии электрического поля в механическую работу посредством импульсного ввода энергии в разрядный канал, расширяющийся в плотной конденсированной среде (чаще всего в воде) и использующийся как источник импульсных давлений. В настоящее время наибольшее распространение получили следующие способы формирования импульсных давлений с использованием высоковольтного электрического разряда (ВЭР): подводный искровой разряд (ПИР), электрический взрыв проводников (ЭВП) и высоковольтный электрохимический взрыв (ВЭХВ). Для оптимизации разрядноимпульсных технологий (РИТ) на основе указанных способов необходим соответствующий выбор режимов, параметров и схем ЭГИС, реализующих тот или иной способ.

Анализ имеющихся данных по разным РИТ на базе ВЭХВ показал, что его использование позволяет значительно расширить сферу применения технологий импульсной обработки материалов (например, электрогидроимпульсной запрессовки труб, штамповки, разрушения негабаритов и многих др.). Обусловлено это тем, что при идентичных характеристиках генератора импульсных токов (ГИТ) при использовании ВЭХВ возрастают амплитуда и длительность генерируемого импульса сжатия, а также интенсивность гидротоков жидкости. Кроме того, ВЭХВ предоставляет дополнительные возможности управления технологическими параметрами промышленных установок посредством выбора экзотермической среды (ЭС), варьирования ее ингредиентного состава и массы, вводимой в разрядный промежуток, при неизменных параметрах энергоисточника.

ВЭХВ наибольшее распространение получил в технологиях электроразрядного разрушения неметаллических материалов природного и искусственного происхождения, а также формообразования. Показано, что общим для этих РИТ является то, что ВЭХВ осуществляется в ограниченных замкнутых или даже малых объемах жидкости и основным силовым рабочим фактором при этом является давление, создаваемое расширяющейся послеразрядной полостью, при этом в основном применяются ЭС с 60-ти или 40 %-ным содержанием алюминия. Обусловлено это, прежде всего тем, что ЭС, содержащие более 40 % алюминия обеспечивают большее дополнительное энерговыделение за счет экзотермических превращений по сравнению с ЭС, содержащими меньший процент горючего металла. Кроме того, установлено, для ЭС, содержащих более 40% алюминия, внешнее давление, при котором протекает самоподдерживающаяся экзотермическая реакция, практически остается постоянным и равным примерно 23 МПа.

Проведенными ранее в ИИПТ НАН Украины экспериментальными исследованиями показано, что эффективность преобразования химической энергии водонаполненной ЭС при реализации ВЭХВ в неограниченных объемах определяется основными электродинамическими факторами: начальной напряженностью электрического поля в разрядном промежутке  $E_0$ , В/м и выделяемой в единице массы ЭС удельной электрической энергии  $\omega_э$ , кДж/кг.

Авторами работы установлено, что при ВЭХВ в ограниченном объеме удельная эффективность экзотермических превращений  $\mu$  зависит не только от основных электродинамических факторов  $E_0$  и  $\omega_э$ , но и безразмерного обобщенного параметра  $\gamma$ , который равен отношению ограниченного объема  $V_k$  к объему парогазовой полости (ППП)  $V_p$  при ее свободном развитии, и характеризующего влияние ограниченного объема на процесс преобразования энергии в этих условиях. Это позволило разработать алгоритм расчета параметров комбинированных электроразрядных источников энергии с использованием ВЭХВ (параметры ГИТ, длина разрядного промежутка и масса экзотермического состава), обеспечивающих заданные технологией энергетические характеристики при ВЭХВ в ограниченном объеме. На первом этапе по заданной интегральной энергии источника определяют необходимые для реализации соответствующего технологического процесса электрическую энергию и массу ЭС, обеспечивающие оптимальные энергетические и акустические характеристики ВЭХВ для неограниченного объема. На втором этапе, используя безразмерный обобщенный параметр  $\gamma$ , уточняют величину удельной энергетической эффективности  $\mu$  при ВЭХВ в ограниченном объеме. Далее при соблюдении условия равенства удельных электрических энергий для ВЭХВ, как в неограниченном, так и ограниченном объемах, уточняют величины массы ЭС и количества высвобождающейся химической энергии  $\Delta W_\gamma$  при ВЭХВ в ограниченном объеме. Зная величину  $\Delta W_\gamma$ , с учетом обеспечения необходимой интегральной энергии  $W_n$ , уточняют величину электрической энергии при ВЭХВ в ограниченных объемах и определяют параметры ГИТ и длину межэлектродного разрядного промежутка. Для исключения многовариантности решений по предложенному алгоритму рекомендуется использовать в качестве критерия оптимизации количество высвобождающейся химической энергии, отнесенное к единице вводимой в канал ВЭХВ электрической энергии.

Необходимые параметры комбинированного электроразрядного источника энергии при реализации для технологических целей ВЭХВ в ограниченных объемах, определены.

# НЕТРАДИЦИОННЫЕ РАЗРЯДНОИМПУЛЬСНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

А.И. Вовченко, Л.Ю. Демиденко, Н.А. Онацкая  
Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев

За более чем 50-летнюю историю работы Института импульсных процессов и технологий (ИИПТ) НАН Украины изучено и разработано более 300 различных разрядноимпульсных технологий (РИТ). Многие из них (очистка отливок, штамповка, запрессовка труб в теплообменных аппаратах, разрушение неметаллических материалов, воздействие на структуру металлов в жидком состоянии и др.) используются более чем на 1000 предприятиях, в том числе и дальнего зарубежья. Кроме того имеется ряд РИТ, не нашедших такого широкого применения, но они являются конкурентоспособными на мировом рынке. Условно эти РИТ называются нетрадиционными. К таким технологиям в полной мере могут быть отнесены технологии по воздействию различных мощных импульсных нагрузок (давления, тока, высокоскоростных струй жидкости) на изменение тонкой структуры металлов и сплавов в твердом состоянии, их сварных соединений. Проведенными ранее исследованиями установлено, что в зависимости от параметров высокоинтенсивного нагружения наблюдается активация дислокационных перемещений, что в конечном итоге приводит к изменению твердости, пластичности и напряженно-деформированного состояния металлов и сплавов, их сварных соединений, а также повышению коррозионной стойкости последних.

Результаты этих исследований явились научной базой по созданию и дальнейшему развитию в ИИПТ НАН Украины различных технологий: электрогидроимпульсной обработки (ЭГИО) металлических конструкций, сварки разнородных металлов в твердом состоянии с использованием электроимпульсного воздействия, в том числе прессо-термической электрогидроимпульсной (ПТЭГ) сварки и др.

ЭГИО металлических конструкций, сущность которой заключается в многократной обработке мест концентрации остаточных напряжений импульсной нагрузкой, формируемой электрическим разрядом в воде. Это обеспечивает снижение остаточных макро- и микронапряжений с одновременной стабилизацией дислокационной структуры в объеме металла сварных и литых конструкций (по площади – до 0,2 м<sup>2</sup>, по глубине – до 100 мм). При ЭГИО обычно используют два способа воздействия: разряд на изделие либо обработка высокоскоростными струями жидкости. Технология реализуется с использованием электроразрядных устройств в технологической ванне с водой, либо при помощи технологической передвижной камеры. ЭГИО выгодно отличается от применяемых деформационных методов, воздействие которых распространяется только на приповерхностный слой, а по сравнению с традиционно применяемой термообработкой является менее энергозатратной, экологически чистой и не только не разупрочняет металл, но даже позволяет добиться его субструктурного упрочнения, причем имеется возможность регулирования его степени путем изменения режимов обработки. ЭГИО разрядом на изделие прошла опытно-промышленную проверку на различных натуральных сварных изделиях, обеспечив снижение остаточных напряжений от 70% до 90%.

ПТЭГ сварка осесимметричных изделий заключается в сочетании электрогидроимпульсной запрессовки и термообработки, приводящих к образованию натяга между трубчатыми изделиями и созданию условий для автовакуумирования, в результате обеспечивается образование металлической связи на площади от 60 до 100% площади контактной поверхности, что обеспечивает стабильно низкое переходное электрическое сопротивление и высокую релаксационную стойкость сварных соединений в процессе эксплуатации. Долговечность сварных соединений в условиях термоциклирования при этом повышается в 3-5 раз. Важным преимуществом ПТЭГ сварки является возможность встраивания техпроцесса в уже работающие производственные линии по изготовлению ответственного теплообменного оборудования, в том числе компактных теплообменников (степень перфорации трубных решеток  $\varphi \leq 1,3$ ).

Технология ПТЭГ сварки прошла апробацию при изготовлении натуральных трубчатых соединений «титан-медь» для катодных токоподводов электролизеров.

Техпроцесс сварки разнородных металлов в твердом состоянии с использованием электроимпульсного воздействия может быть реализован двумя способами: на основе импульсов тока большой плотности ( $\sim 10^9$  А/м<sup>2</sup>), либо электрического взрыва проводника (сварка высокоскоростным ударом).

Применение импульсов тока большой плотности приводит к интенсификации процессов пластического деформирования и активации поверхностей свариваемых соединений. В результате интенсивного смятия приконтактных объемов металла обеспечивается самогерметизация межконтактной зоны, а при последующем нагреве образуется автовакуум, приводящий к самоочистке поверхностей и образованию сварного соединения по типу диффузионного при более низких усилиях и температурах сварки в воздушной среде без применения защитных сред или вакуума. Экспериментально определены рациональная схема пропускания тока и наиболее предпочтительный диапазон изменения параметров импульсного тока, в котором можно эффективно управлять процессами пластического деформирования и активацией поверхностей, а значит формированием сварного соединения.

Все рассмотренные технологии защищены патентами Украины, приоритет принадлежит ИИПТ НАН Украины.

# РАЗРАБОТКА НОВЫХ ПРИНЦИПОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В РАЗРЯДНОИМПУЛЬСНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ НА БАЗЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ВЗРЫВА

А.И. Вовченко, Л.Ю. Демиденко, А.Д. Блащенко  
Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев

Различные технологические процессы с использованием взрывного преобразования энергии в последнее время находят все более широкое применение во многих отраслях промышленности. Свою технологическую нишу среди них занимают разрядноимпульсные технологии (РИТ) на базе высоковольтного электрического разряда (ВЭР) в различных конденсированных средах, способных к экзотермическим химическим превращениям под действием высоких температур и давлений, развиваемых в электроразрядной плазме.

Удельная энергоемкость водонаполненных экзотермических сред (ВЭС) в  $10^4 - 10^5$  раз превышает удельную энергоемкость конденсаторных накопителей, что свидетельствует о высоких потенциальных возможностях использования высоковольтного электрохимического взрыва (ВЭХВ).

Электровзрывным преобразованием химической энергии на базе ВЭС можно эффективно управлять в широких пределах за счет варьирования ее ингредиентного состава, изменяя не только интегральную энергию в канале ВЭХВ, но и гидродинамические характеристики. Кроме того, установлено, что удельная эффективность экзотермических превращений ВЭС определяется двумя электрофизическими факторами: начальной напряженностью электрического поля в разрядном промежутке и удельной электрической энергией, т.е. электрической энергией, выделившейся в канале разряда, приходящейся на единицу массы ВЭС. При этом начальная напряженность электрического поля обуславливает количество параллельных каналов сквозной проводимости в разрядном промежутке при его высоковольтном пробое, а удельная электрическая энергия определяет количество горючего металла (Al), нагретого до температуры плавления и участвующего в экзотермических химических превращениях. Для каждой удельной электрической энергии существует некоторая критическая величина напряженности поля  $E_{кр}$ , при которой величина удельной эффективности экзотермических превращений ВЭС максимальна.

В работе систематизированы основные результаты исследований в направлении технологического использования ВЭХВ в разных разрядноимпульсных технологиях. Показано, что сущность всех РИТ, основанных на использовании ВЭХВ, заключается в воздействии на обрабатываемый объект комплекса силовых импульсов (давления, как в канале разряда, так и в среде, гидротока и квазистатического давления). Классифицированы способы управления указанными силовыми факторами импульсного нагружения в традиционных схемах реализации ВЭХВ. Вместе с тем, показано, что ВЭХВ в РИТ при традиционной схеме генератора импульсных токов (ГИТ) с емкостным накопителем энергии ограничен с точки зрения полноты высвобождения химической энергии вследствие неполного сгорания при этом используемых ВЭС. В связи с этим задача повышения эффективности экзотермических превращений при ВЭХВ весьма актуальна, поскольку непосредственно связана с повышением производительности современных РИТ на основе ВЭХВ.

На основании анализа физических процессов, протекающих при ВЭХВ, предложен и обоснован новый принцип повышения эффективности экзотермических превращений при реализации ВЭХВ, основанный на последовательном порционном вводе электрической энергии в канал ВЭХВ, на базе применения управляемых ГИТ.

Экспериментально исследованы влияние соотношений, как величин электрической энергии, последовательно вводимых высоковольтных импульсов тока, так и величин их зарядных напряжений, а также временных интервалов между импульсами тока на эффективность экзотермических превращений и поведение электро- и гидродинамических характеристик ВЭХВ при разных величинах удельной электрической энергии.

Установлено, что при неизменной величине удельной электрической энергии преобладающее влияние на эффективность экзотермических превращений ВЭС при ВЭХВ оказывает соотношение величин электрической энергии, последовательно вводимых высоковольтных импульсов тока. При постоянном соотношении величин электрической энергии, последовательно вводимых высоковольтных импульсов тока, существенное влияние на эффективность экзотермических превращений ВЭС при ВЭХВ оказывает соотношение величин их зарядных напряжений в диапазоне исследованного временного интервала между импульсами тока, равного  $\tau_3 = (2-8)\tau_1$ , где  $\tau_1$  - характерное время первого импульса тока.

Показано, что при изменении соотношения величин электрической энергии, последовательно вводимых высоковольтных импульсов тока, в интервале 8 -16, соотношений их зарядных напряжений соответственно в интервале 0,6- 0,8 при удельной электрической энергии в диапазоне  $(2-3,8) \cdot 10^6$  Дж/кг и для указанного выше времени задержки  $\tau_3$  между импульсами тока, достигается наибольшая эффективность экзотермических превращений ВЭС при ВЭХВ, которая по сравнению с традиционно применяемой схемой ГИТ повышается в 1,4-1,8 раз.

# НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЁС И КОЛЁСНЫХ ЦЕНТРОВ

В.М. Кузьмичёв, О.Н. Перков  
Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины, г. Днепр

По сравнению с традиционными технологиями обработки металлов давлением, представляет определенный интерес такие технологии, как, например, метод сферодвижной штамповки. Указанная технология является разновидностью прокатки в штампах. Сущность сферодвижной штамповки состоит в том, что один из двух штампов получает колебательные сферические колебания. Деформирующее усилие передаётся только на ограниченную часть поверхности заготовки. Процесс деформации металла осуществляется по принципу торцевой раскатки при перемещении частей штампа относительно заготовки по определенной схеме. Технология позволяет получать готовые изделия высокого качества, часто без необходимости в дальнейшей механической обработке.

Достаточно сложные конструкторские решения при разработке формы сферодвижного прессователя для изготовления конкретного изделия, компенсируются высокой точностью размеров, высоким качеством поверхности изделий и существенным снижением энергозатрат на производство.

Железнодорожные колеса и бандажи, кроме сложной формы, являются ещё крупными и относительно массивными изделиями. На основании этого, использование указанной технологии для производства подобных изделий для железнодорожного транспорта ограничивается трудностями по разработке деформирующего оборудования. Трудности при реализации на практике достаточно сложной кинематики движения инструмента деформации, дополняются необходимостью использования обжимного оборудования повышенной мощности. В результате, в настоящее время методом сферодвижной штамповки изготавливают в основном изделия относительно небольшой массы.

Для производства изделий подобной формы и размеров получили распространение другие схемы изготовления, с использованием технологии близкой к сферодвижной штамповке, (технология AGW, разработанная фирмой WAGNER, в Германии, технология SIRD от фирмы SUMITOMO в Японии). Детали, полученные с помощью такого оборудования, обладают помимо качественной поверхности еще и упрочненным слоем определенной толщины. Указанное преимущество имеет достаточно важное значение, особенно при необходимости обеспечения требуемого ресурса работы изделия. Кроме достижения высокой точности изготавливаемых изделий, отмечается снижение энергетических затрат по сравнению с большинством известных технологий. Одновременно с этим, наблюдаемое снижение объёма механической обработки позволяет достигать значительной экономии металла за счёт уменьшения припусков на механическую обработку.

Схема технологического процесса заключается в деформации, предварительно осаженной на прессе заготовки на специальном агрегате, оснащённом двумя вращающимися штампами, причём верхний наклонён под углом к нижнему, что приводит к формированию полу-параболоидного очага деформации.

Деформация складывается из последовательных этапов движения штампов по определенной траектории. Варьирование величиной контактной поверхности, профилем импульса нагружения и траекторией перемещения штампов, позволяет регулировать усилие и распределение деформации в ее очаге. На основании этого реализуются оптимальные условия изготовления изделия.

Главное отличие указанного процесса от сферодвижной штамповки состоит в простом вращении обоих наклонённых друг к другу полуштампов вокруг своих осей. Такая схема обеспечивает обкатку заготовки и малую площадь контакта. В агрегатах же сферодвижной штамповки нижний штамп неподвижен, а верхний вращается вокруг оси, которая сама описывает коническую, по отношению к оси нижнего штампа, траекторию.

Реализация рассмотренных технологий предусматривает изготовление заготовки для последующей деформации с достаточно жесткими ограничениями по размерам и весу. Что объясняется тем, что отклонения по весу или размерам заготовки более определенных ограничений, будет иметь негативное влияние на качество готового изделия. Так, превышение по весу приведет к неизбежному выдавливанию лишнего объема металла из матрицы в процессе пластической деформации. Использование заготовок меньшей, чем предусмотрено технологией массы, приведёт к неполному заполнению полостей матрицы металлом.

В настоящее время отдельные производители используют указанные технологии для изготовления высококачественных железнодорожных колес и колесных центров.

## СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ФУНКЦІОНАЛІЗОВАНИХ ВУГЛЕЦЕВИХ НАНОПОРОШКІВ

Н.О. Олійник<sup>1</sup>, Г.Д. Ільницька<sup>1</sup>, М.А. Марініч<sup>1</sup>, Г.А. Базалій<sup>1</sup>, І. М. Зайцева<sup>1</sup>,  
В.І.Лавриненко<sup>1</sup>, Т.О. Пріхна<sup>1</sup>, О.М.Сизоненко<sup>2</sup>, О.О. Пасічний<sup>1</sup>, В.В. Смоквина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, м. Київ,

<sup>2</sup>Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв

Нанопорошки вуглецевих матеріалів (алмазів детонаційного синтезу та вуглецевих нанотрубок) мають різноманітне застосування, в тому числі, в композиційних покриттях в якості компонентів, які забезпечують покращення закріплення та утримання абразиву в інструменті.

Для ефективного застосування вуглецевих порошків потрібно їх розширене дослідження та модифікування для створення порошків тонкодисперсних, однорідних за розмірами, з певними гарантованими характеристиками поверхні.

Алмази детонаційного синтезу мають трьохшарову структуру: алмазне ядро; вуглецеву оболонку з рентгеноаморфних структур; поверхневий шар, що містить атоми вуглецю, нітрогену, кисню, оксигену, які формують спектр різноманітних полярних функціональних груп. Така структура визначає властивості нанопорошків алмазу і відкриває широкі можливості модифікування структури та створення заданої периферійної оболонки частинки алмазу.

Перспективи застосування порошків вуглецевих нанотрубок в якості наповнювачів композиційних матеріалів обумовлюють їх висока міцність 2,0–3,5 ГПа, модуль пружності 220–700 ГПа, розвинута питома площа поверхні.

Мета роботи – розробка технологій модифікування нанопорошків вуглецевих матеріалів: алмазу детонаційного синтезу з отриманням хімічно однорідної поверхні та порошку вуглецевих нанотрубок однорідного за розмірами, з низьким вмістом домішок, з гідрофобною енергетично активною поверхнею для застосування у складі композиційних покриттів шліфпорошків алмазів для шліфувального інструменту підвищеної зносостійкості.

Проведено дослідження методів формування поверхневих властивостей нанопорошків алмазу та вуглецевих нанотрубок, встановлено закономірності впливу способів та параметрів обробки на їх фізико-хімічні, адсорбційно-структурні та електрофізичні характеристики. На підставі отриманої бази даних у ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України розроблено нові сучасні технології:

- виготовлення нанопорошків синтетичного алмазу детонаційного синтезу підвищеної однорідності за розмірами, з хімічно однорідною гідрофобною поверхнею марки АСУД-ПХО. Принципова технологічна схема включає хімічне видалення домішок металів та їх сполук, подальшу імпульсну обробку високовольтними електричними розрядами (ВЕР обробка), седиментацію у динамічних умовах з отриманням порошку різних класів крупності, контрольну хімічну очистку та електрохімічну обробку окремо кожного класу. Такий спосіб забезпечує отримання нанопорошку алмазу з характеристиками, які порівняно до характеристик нанопорошку марки АСУД99 суттєво відрізняються: зниженням вмісту домішок у 2,7 рази; підвищенням питомого електроопору до  $5 \cdot 10^9$  Ом·м; підвищенням однорідності за розмірами різних класів крупності у 1,6–3,5 рази; підвищенням питомої площі поверхні на 5,6%, зниженням адсорбційного потенціалу на 33,8 % та електрокінетичного потенціалу на 48 %; збільшенням в 2,7 рази хімічної однорідності поверхні порошку;

- виготовлення порошку вуглецевих нанотрубок марки МУНТ-ПХО однорідного за розмірами, з низьким вмістом домішок, з гідрофобною енергетично активною поверхнею. Порошок МУНТ-ПХО виготовляють модифікуванням серійного порошку МУНТ-А. Принципова технологічна схема виготовлення порошку включає послідовне застосування ВЕР обробки, седиментацію у статичних умовах з отриманням порошку різних класів крупності, хімічного та електрохімічного оброблення. Такий спосіб забезпечує підвищення дисперсності та однорідності порошку за розмірами його частинок за рахунок звуження інтервалу розподілення частинок в 5,6 разів та середнього діаметру у 5 разів; очищення від домішок (їх масова частка зменшується у 3,7 рази), зменшення питомої магнітної сприйнятливості у 5,2 рази, електрокінетичного потенціалу в 7,8 рази, вільної енергії насичення поверхні парами води на 11,9 %, підвищення питомого електроопору в 1,3 рази, питомої площі поверхні порошку в 1,4 рази.

Для оцінки ефективності використання вуглецевих функціоналізованих нанопорошків була виготовлена серія дослідних шліфувальних кругів форми 12А2-45° на полімерній зв'язці В2-08 з використанням зносостійких композитів на основі порошків алмазу марки АС20 зернистості 100/80, послідовно металізованих Ni, композиційним покриттям Ni–Al с добавками функціоналізованих вуглецевих нанотрубок. Встановлено, що додавання порошку вуглецевих нанотрубок у склад металопокриття призводить до утворення скелетної структури композиційного покриття, зростання питомої площі поверхні порошку алмазу у композиційному покритті, порівняно до порошку алмазу у металопокритті. Випробування дослідних алмазних шліфувальних кругів при шліфуванні твердого сплаву показало, що їх зносостійкість збільшена у 1,5–1,6 рази у порівнянні із кругами, виготовленими без застосування порошків вуглецевих нанотрубок.

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗРЯДНО-ИМПУЛЬСНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В МОРСКИХ УСЛОВИЯХ

Т.Д. Денисюк, А.Н. Рачков

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев

Промышленное освоение морских шельфов требует внедрения безопасных в эксплуатации технологий и оборудования, минимизирующих отрицательное техногенное воздействие на окружающую среду. В этой области у ИИПТ НАН Украины накоплен значительный инновационный потенциал.

Повышение добычи углеводородного сырья на морских месторождениях является одним из приоритетных направлений нефтегазового комплекса. При этом очень важно обеспечить безопасные условия функционирования морских стационарных платформ (МСП), с помощью которых ведутся нефтегазодобывающие работы на морском шельфе. Интенсивное биологическое обрастание МСП существенно влияет на их стойкость, безопасность проведения работ и требует периодической очистки. Существующие традиционные методы очистки имеют высокую стоимость и трудоёмкость, требуют значительных затрат на проведение водолазных работ. Электроразрядный (ЭР) способ очистки для работ в среде с повышенной проводимостью (морской воде) требует либо подвода в зону разряда значительного количества пресной воды, либо применения иных способов инициирования. Это усложняет конструкцию технологических и электротехнических устройств и значительно повышает массогабаритные показатели оборудования.

Способ очистки металлоконструкций МСП импульсным коронным разрядом (ИКР) позволяет производить обработку в среде с повышенной проводимостью, значительно упрощает конструкцию технологической и электротехнической частей оборудования. Использование коронного разряда основано на реализации достаточно высокой интенсивности гидродинамических возмущений, генерируемых им. Такая особенность присуща ИКР в сильных водных электролитах, для которых характерно наличие короны в виде сплошного плазменного образования (СПО), формой которого можно управлять и формировать в жидкости поля давлений необходимой величины. Согласно исследованиям для проводимостей  $\sigma_0 \geq 1,0$  См/м возможно зажигание СПО на  $n$  электродах одновременно с практически идентичными параметрами.

Для реализации способа очистки металлоконструкций МСП разработано экспериментальное электроразрядное оборудование – электрогидроимпульсная установка «Корона-1», которое травмобезопасно для обслуживающего персонала, мобильное, не громоздкое, может размещаться как на плавсредствах, так и на МСП. Потребляемая мощность до 5 кВт позволяет работать от судовой энергетической установки, системы энергообеспечения МСП или от автономного источника питания. Установка позволяет выдержать нормы действующих стандартов экологического контроля. При эксплуатации оборудования с несколькими электродными системами можно достичь производительности до 200 м<sup>2</sup>/час.

В связи с увеличением объемов морских перевозок и повышением водоизмещения транспортных судов возникает необходимость реконструкции портовых сооружений и строительства глубоководных причалов, которое сопровождается увеличением объема подводно-технических работ, в частности дноуглубительных работ для создания новых акваторий портов. Разработка новых эффективных, экологически безопасных методов для разрушения плотных и прочных донных грунтов и скальных пород береговой зоны при гидротехническом строительстве и реконструкции морских и речных портов, терминалов, жилых и береговых сооружений является чрезвычайно актуальной проблемой. Существующие традиционные методы (механический и взрывной) не удовлетворяют всем требованиям и потребностям эксплуатации и использования.

Альтернативой для разрушения прочных донных грунтов является способ электроразрядного разрушения, заключающийся в использовании усилий воздействия волн сжатия, генерируемых электроразрядом. ЭР способ обладает рядом преимуществ по сравнению с взрывным: возможностью регулирования силового воздействия на разрушаемый материал, отсутствием брызганности, обеспечением заданного, направленного откола. ЭР способ при глубине залегания до 20 метров разрушает и разрыхляет скальные грунты прочностью до 40 МПа с производительностью до 5-8 м<sup>3</sup>/ч при энергетических затратах не более 0,6 кВт·ч/м<sup>3</sup>. Подводные съемки подтвердили экологическую безопасность метода с точки зрения сохранения флоры и фауны. Технология реализуется при помощи дноуглубительного комплекса, в состав которого входит разработанная ИИПТ НАН Украины электрогидроимпульсная установка «Базальт-К».

Результаты промышленной проверки подтвердили высокую эффективность ЭР способа рыхления донных пород практически любой прочности под водой и наземных выходов скальных пород. Использование способа позволит существенно уменьшить затраты на строительство и реконструкцию морских и речных портов, разного рода гидротехнических и жилых сооружений береговой зоны.

Разработанные высоковольтные разрядно-импульсные технологии, используемые в морских условиях, и оборудование для их реализации готовы к широкому внедрению. Права на них защищены рядом патентов Украины, патентообладателем которых является ИИПТ НАН Украины.

# ЭЛЕКТРОРАЗРЯД – ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫЙ СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ

Т.Д. Денисюк, А.Н. Рачков

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев

Минеральные удобрения, которые сегодня используются в сельском хозяйстве, в основном, имеют гранулированную форму. Они дают неплохой результат по урожайности, но вызывают деградацию почв, связанную с их минерализацией. При минерализации почв нарушается глобулярная структура почвы, срываются глобулы в единую массу. Это препятствует обменным процессам, нарушает грунтовое «дыхание», связанное с движением воды и воздуха в горизонтальном и перпендикулярном направлении, обеспечивающее поступление питательных веществ к растениям. Кроме того, применение гранулированных минеральных удобрений требует достаточной влажности почвы, при отсутствии осадков доступность питательных веществ для растений резко снижается. Рост засушливости климата в последние годы уменьшает эффективность минеральных удобрений. Учитывая значительные затраты на транспортировку, перегрузку и внесения в почву гранулированных минеральных удобрений, гораздо удобнее в использовании являются жидкие формы удобрений, а именно аммиачная вода и водные суспензии гумино-органических удобрений. Кроме того, биологизация и экологизация земледелия является одной из актуальных задач сельскохозяйственного производства, которая может быть решена при использовании биологически активных органических и органо-минеральных удобрений.

Разработанный в ИИПТ НАН Украины электроразрядный метод дезинтеграции гуминосодержащих материалов (бурых углей, торфа, сапропеля) позволяет получить высококачественные органические минеральные удобрения со значительно меньшими затратами энергии по сравнению с традиционным производством гуминовых удобрений. В процессе электроразрядной дезинтеграции гуминосодержащих материалов в воде протекают деструктивные реакции разложения, одновременно в электромагнитном поле электроразряда происходит образование диполей и так называемого механического барьера при столкновении частиц активной твердой фазы. Эти процессы сдерживают оседание или прилипание частиц, что обеспечивает седиментационную устойчивость суспензии. Молекулы воды под влиянием высоких температур и давлений диссоциируют, происходит термолиз воды с понижением pH и образованием сверхактивных молекул  $H_2O_2$  и ионов  $H^+$  и  $OH^-$ . Это приводит к физико-химическому разложению каолинитов, деструкции и расщеплению крупных частиц на радикалы до полного выхода гуминовых кислот. В процессе различных окислительно-восстановительных реакций в растворах неорганических веществ, присутствующих в гуминах, происходит обогащение суспензии такими элементами, как азот, фосфор, бор, медь, марганец и другими микроэлементами, повышающее удобрительную ценность гуминовых препаратов. Таким образом, электроразрядный способ получения гуминового удобрения позволяет совместить мелкофракционную дезинтеграцию гуминосодержащего материала и создание активированной среды, получить стабильную и устойчивую суспензию, обогащенную гуминовыми кислотами и макро- и микроэлементами. По результатам исследований получен патент Украины № 107536 «Спосіб одержання гумінового добрива».

В настоящее время в мире зернопроизводители широко применяют жидкие азотные удобрения, а именно аммиачную воду. В промышленных масштабах аммиачную воду получают из сжиженного аммиака и воды в специальной системе смешения при высоком давлении. Это очень энергоемкий способ.

Проведенные в ИИПТ НАН Украины исследования в области химического и электрофизического воздействия электроразряда на водную среду и интенсификации химических процессов позволяют получить аммиачную воду при электроразрядной обработке водно-воздушной смеси.

Использование высоковольтного импульсного электроразрядного воздействия на водно-воздушную смесь приводит к локальному разложению воды с образованием активных водорода, кислорода, в меньшей степени озона. Главный компонент воздуха – азот, объемное содержание которого в нем достигает 78 %. В нормальных условиях азот химически малоактивен. Под действием горячей плазмы, возникающей при электрических разрядах и коллапсирующих кавитационных пузырьков, азот воздуха активируется и вступает в химические реакции с активированным этим же разрядом кислородом воды. Водно-воздушная смесь при высоковольтном импульсном электроразрядном воздействии насыщается нитрат-ионами, оксидом азота, азотистой и азотной кислотой. Результаты экспериментальных исследований высоковольтного импульсного электроразрядного воздействия на водно-воздушную смесь в соотношении 1:2, с удельными затратами энергии  $60 \text{ МДж/дм}^3$  при зарядном напряжении накопителей 40 кВ, показали максимальное насыщение водно-воздушной смеси азотсодержащими продуктами. Выход азотсодержащих продуктов в водно-воздушной среде составляет  $0,9\text{--}1,2 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$ . Большое содержание азота в форме ионов в полученном образце аммиачной воды значительно упрощает технологию внесения удобрения в почву, он хорошо закрепляется в почве и является доступным для растений.

Проведенные исследования позволяют рекомендовать использовать электроразряд для получения ценных минеральных удобрений и развития экологически ориентированной организации сельскохозяйственного производства.

# СТВОРЕННЯ ХРОМО-ТИТАНОВИХ ЕЛЕКТРОІСКРОВИХ ПОКРИТТІВ НА СТАЛІ 40X13 У РІДИННИХ СЕРЕДОВИЩАХ З ПОРОШКОВИМИ КОМПОНЕНТАМИ

Г.Г. Лобачова, Є.В. Іващенко, В.М. Гурська  
Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, м. Київ

Для підвищення функціональних властивостей та строку служби деталей машин, механізмів, різального інструменту та штампового оснащення у більшості випадків достатнім є зміцнення лише їх робочих поверхонь, що дозволяє суттєво скоротити витрати матеріалів на виготовлення нових виробів. У зв'язку з цим пошук новітніх технологій та удосконалення існуючих методів обробки поверхні є актуальним завданням.

Багатьма дослідниками доведена ефективність застосування електроіскрового легування (ЕІЛ) для локального зміцнення деталей, що дозволяє значно поліпшити фізико-механічні властивості, неодноразово відновлювати ушкоджені ділянки робочих поверхонь для подовження їх експлуатації. Переваги ЕІЛ полягають у використанні будь-яких електропровідних матеріалів для створення адгезійно стійких покриттів широкого функціонального призначення. При цьому метод ЕІЛ є простим у технічній реалізації на малогабаритному транспортабельному обладнанні, екологічно чистим, енерго- та ресурсозберігаючим.

Як відомо, широкоживані багатокомпонентні аноди (переважно карбідні сполуки) мають високу температуру плавлення, їх ерозія за низьких енергетичних параметрів обробки є незначною.

Конкурентноспроможним за цієї обставини може бути почергове нанесення чистих перехідних металів під час реалізації процесу у насичувальних середовищах, що містять вуглець (зокрема, гліцерин, та суміші на його основі з порошками графіту та карбідів). Створені у такий спосіб покриття міститимуть карбіди металів анодів та інтерметаліди, що сприятиме підвищенню твердості та зносостійкості сталевій поверхні.

З літератури відомо, що електричний розряд у рідинах протікає потужніше, ніж у газі, через створення спрямованого каналу, обмеженого середовищем більшої густини. Згідно формулі гліцерину він містить до чверті атомного складу вуглецю. При електричному розряді, гліцерин розігривається вище температури кипіння (563 К), відбувається його часткова дисоціація, і він стає джерелом вуглецю.

Мета роботи: вивчення впливу складу рідинних середовищ з порошковими компонентами під час послідовного ЕІЛ титаном, хромом на структуру та властивості поверхневих шарів сталі 40X13.

Матеріалом для дослідження (катод) обрано мартенситну сталь 40X13, яка використовується для виготовлення ріжучого, вимірювального та хірургічного інструментів; пружин, підшипників та інших виробів, що працюють на знос у слабоагресивних середовищах. Як легувальні аноди були задіяні перехідні метали високої чистоти – Cr (до 99,9 мас. %) та Ti (до 99,9 мас. %), які наносилися на сталеву поверхню у різній послідовності.

Двостадійні процеси ЕІЛ проведено на лабораторній установці «Елітрон-26А» ( $I = 2 - 2,2$  А;  $U = 60$  В; тривалість обробки кожним анодом 180 с) з використанням насичувальних середовищ за такими схемами:

- Cr (гліцерин) – Ti (гліцерин);
- Ti (гліцерин) – Cr (гліцерин);
- Cr (гліцерин + порошок графіту) – Ti (гліцерин + порошок графіту);
- Ti (гліцерин + порошок графіту) – Cr (гліцерин + порошок графіту);
- Cr (гліцерин + порошок карбіду  $Cr_3C_2$ ) – Ti (гліцерин + порошок карбіду TiC);
- Ti (гліцерин + порошок карбіду TiC) – Cr (гліцерин + порошок карбіду  $Cr_3C_2$ ).

Додавання до складу рідинного середовища порошку графіту або карбідів металів аноду на кожній стадії ЕІЛ приводить до появи покриттів з нерівноважною концентрацією елементів у різних його ділянках. Зміною послідовності стадій в межах одного технологічного процесу можна вплинути на характер розподілу карбідів титану та хрому, а також інтерметалідних сполук у легуваному шарі, а, отже, й на характер та значення мікротвердості.

Дослідження структури поверхні сталі 40X13 після ЕІЛ показало, що послідовність нанесення матеріалів легувальних електродів відіграє важливу роль. Товщина Ti-Cr покриттів складає 20 – 25 мкм, а Cr-Ti покриттів – 30 – 35 мкм. Утворення необмеженого твердого розчину між хромом, який наноситься першим, та залізом надає сприятливих умов для масоперенесення легувального матеріалу аноду на сталеву підкладку та робить покриття суцільним, що щільно прилягає.

Значення мікротвердості зростають після усіх проведених процесів внаслідок формування у покриттях твердих розчинів на основі матеріалів електродів, дисперсних карбідів TiC, інтерметалідів  $Cr_2Ti$ . Для Cr-Ti покриття, одержаного при ЕІЛ у гліцерині мікротвердість становить 8,2 ГПа, для Ti-Cr покриття – 7,3 – 9,8 ГПа. Додавання порошку графіту до гліцерину у кількості 25 мас. % сприяє збільшенню мікротвердості для Cr-Ti покриття до 7,2 – 11,1 ГПа, для Ti-Cr покриття – до 8,2 – 10,4 ГПа. Максимальна мікротвердість поверхневого шару сталі 40X13 після ЕІЛ за схемою Cr-Ti у гліцерині з порошком карбіду складає 11,9 ГПа, а у іншій послідовності (Ti-Cr) – 12,43 ГПа. Результати мікрорентгеноспектрального аналізу підтверджують, що різні ділянки покриттів відрізняються за значеннями мікротвердості, що свідчить про неоднорідність їх хімічного складу.

# ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ВЗРЫВА

Л.Ю. Демиденко, Т.Д. Денисюк, Н.А. Онацкая  
Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев

Конкурентоспособность на мировом рынке разрядноимпульсных технологий во многом определяется не только их эффективностью и производительностью, но и их многофункциональностью за счет целенаправленной перенастройки оборудования энергоисточников, используемых для реализации разных разрядноимпульсных технологий (РИТ). К таким энергоисточникам можно отнести, в первую очередь, комбинированные энергоисточники на базе высоковольтного электрического разряда (ВЭР) в конденсированных средах и нетрадиционных взрывчатых веществ (ВВ), которые реализуют явление высоковольтного электрохимического взрыва (ВЭХВ). Применение ВЭХВ в различных РИТ позволяет в отличие от традиционного электровзрыва значительно расширить возможности управления силовыми характеристиками, воздействующими на объект обработки. При этом значительно снижаются массогабаритные характеристики электрогидроимпульсных установок за счет увеличения их удельной энергоемкости, а также повышается ресурс емкостных накопителей и надежность высоковольтных узлов. Применяя различные экзотермические среды (ЭС) и варьируя их массу, вводимую в разрядный промежуток, можно гибко и оперативно управлять силовыми и энергетическими характеристиками ВЭХВ, поскольку протекающие в канале разряда экзотермические химические превращения оказывают существенное влияние также на режим выделения электрической энергии.

Наибольшее распространение ВЭХВ получил для усовершенствования технологий электроразрядного разрушения прочных горных пород в различных карьерах, разрушения бетонных и железобетонных фундаментов и сооружений, а также разрушения морских прочных донных грунтов и скальных пород береговой зоны при гидротехническом строительстве. В этих технологиях основным силовым рабочим фактором является давление, создаваемое расширяющейся послеразрядной полостью, а не воздействие на объект ударных волн высокой интенсивности, поэтому разрушение происходит в режиме «щадящего взрыва», при котором практически отсутствует разлет разрушаемого материала. Это позволяет производить разрушения вблизи инженерных сооружений и действующих предприятий, в цехах заводов без их остановки, в отличие от использования взрывчатых веществ. Испытания по разрушению бетонных конструкций в промышленных условиях на установках типа «Базальт» с использованием ВЭХВ показали, что при неизменных массогабаритных показателях установок их производительность возросла от 3 до 4 раз.

Использование ВЭХВ также позволяет значительно повысить производительность процесса электроразрядного разрушения при разработке донных грунтов высокой прочности (свыше 30 МПа). Экспериментально исследовано влияние количественного и качественного состава ЭС на производительность процесса разрушения при ВЭХВ. Определено, что наиболее целесообразным для разрушения донных грунтов высокой прочности является использование ЭС с 40 % содержанием алюминия во фракционном соотношении: 30 % порошка (ПА-1, ПА-2) и 10 % пудры (ПАП-1, ПАП-2). При этом достигнута производительность от 3 до 5 м<sup>3</sup>/ч, требуемая для масштабного применения РИТ на базе ВЭХВ. Определены схемы силового воздействия на донные грунты с использованием ВЭХВ, обеспечивающие максимальное их рыхление, и сейсмически безопасные расстояния до зданий и сооружений для энергоисточника с запасенной энергией 70 кДж и массой ЭС 0,03 кг. Установлено, что для разработки донного грунта наиболее целесообразно применять электродные одноразовые системы на базе ВЭХВ, использование которых значительно снижает себестоимость электровзрывного разрушения, при этом уменьшаются габариты оборудования и повышается его мобильность.

Промышленные испытания при проведении дноуглубительных работ показали, что техпроцесс электроразрядного рыхления донных грунтов высокой прочности с использованием ВЭХВ, имеющий производительность до 5 м<sup>3</sup>/ч, может успешно применяться при реконструкции морских, речных портов как альтернатива взрывному способу ВВ. При проведении испытаний проводились также наблюдения за состоянием флоры и фауны в море, которые показали отсутствие вредного воздействия ВЭХВ на окружающую среду.

Анализ результатов экспериментальной оценки вклада электрической и химической энергий при ВЭХВ в объем разрушения донного грунта показал, что при равных удельных затратах энергии производительность ВЭХВ более чем в 1,5 раза выше производительности при ВЭР, а затраты электрической энергии в 2,5 раза меньше.

Результаты исследований по использованию в высоковольтных электроразрядных системах подводного ВЭХВ позволили установить основные закономерности изменения его энергетических и гидродинамических характеристик в зависимости от условий реализации ВЭХВ и на их основе разработать алгоритм расчета комбинированных накопителей, которые обеспечивают энергоэффективные режимы работы этих систем.

Результаты исследований использованы при создании новой установки «Базальт-М» на базе ВЭХВ, которая при одинаковой производительности имеет массу и потребляет энергии в несколько раз меньше, чем установка «Базальт», традиционно использующая принцип подводного ВЭР.

# СОЗДАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ С ВЫСОКИМИ ЗНАЧЕНИЯМИ УДЕЛЬНОЙ ОБЪЕМНОЙ ЗАПАСАЕМОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ СКВАЖИННЫХ УСТАНОВОК ИНТЕНСИФИКАЦИИ ДОБЫЧИ НЕФТИ И ГАЗА

В.И. Гунько, А.Я. Дмитришин, Е.Д. Танасова, С.О.Топоров  
Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев

Актуальной задачей в мировой практике добычи полезных ископаемых из недр земли является восстановление производительности нефтяных и газовых скважин в результате их длительной эксплуатации.

Ведущее положение в мире по созданию погружных скважинных установок для повышения дебита нефтяных и газовых скважин занимают ИИПТ НАН Украины (Украина), «Novas Energy» (совместная фирма США и России), «Нефтегазовые инновации», ООО «ГЕОКАРТ» (Россия) и «Blue Spark Energy» (Канада).

Скважинные установки имеют блочную структуру построения, большая часть длины и массы погружной части приходится на блок высоковольтных импульсных конденсаторов. Таким образом, для создания малогабаритных погружных скважинных установок, имеющих высокую конкурентную привлекательность необходимо уменьшение полного объема блока высоковольтных импульсных конденсаторов, т.е. повышение удельной объемной запасаемой энергии каждого конденсатора.

С целью расширения диапазона диаметров нефтяных и газовых скважин, обрабатываемых погружными установками ИИПТ НАН Украины, создаваемые для этих установок конденсаторы должны иметь следующие наружные диаметры корпусов – 70, 89 и 101,6 мм.

Приведен аналитический обзор патентной и научно-технической информации с целью поиска конструктивных решений, направленных на снижение массогабаритных характеристик высоковольтных импульсных конденсаторов и способов изготовления высоковольтных импульсных конденсаторов с улучшенными эксплуатационными и массогабаритными характеристиками.

Улучшение массогабаритных характеристик высоковольтных импульсных конденсаторов возможно тремя путями, каждый из которых ведет к увеличению удельной объемной запасаемой энергии конденсатора. Во-первых, это применение диэлектрических материалов с высокими значениями относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ , во-вторых - повышение величины рабочей напряженности электрического поля  $E_{\text{раб}}$  в диэлектрике секций конденсатора, в-третьих – разработка инженерно-технических решений, позволяющих увеличить активный объем конденсатора, не применяя материалы с высокими значениями  $\epsilon$  и не повышая  $E_{\text{раб}}$ . Для создания высоковольтных импульсных конденсаторов с высокими значениями удельной объемной запасаемой энергии  $W_{\text{уд}}$  для скважинных установок за базовый вариант конденсатора принят высоковольтный импульсный конденсатор ИКП-30-1,2, имеющий средний ресурс  $1 \cdot 10^5$  зарядов-разрядов,  $W_{\text{уд}} = 39,37 \text{ Дж/дм}^3$  при величине рабочей напряженности электрического поля в диэлектрике конденсатора  $E_{\text{раб}} = 127,7 \text{ кВ/мм}$  с наружным диаметром корпуса конденсатора 101,6 мм.

Для проведения экспериментальных исследований по выбору диэлектрической системы создаваемых конденсаторов выбрано три варианта диэлектрической системы – бумажный диэлектрик, пропитанный касторовым маслом с  $\epsilon_{\text{эКВ}} = 5,678$  и  $\text{tg}\delta_{\text{эКВ}} = 4,817 \cdot 10^{-3}$ , комбинированный бумажно-пленочный диэлектрик, пропитанный касторовым маслом с  $\epsilon_{\text{эКВ}} = 4,161$  и  $\text{tg}\delta_{\text{эКВ}} = 2,028 \cdot 10^{-3}$  и комбинированный полипропиленово-полиэтилентерефталатный диэлектрик, пропитанный полиметилсилоксановой жидкостью с  $\epsilon_{\text{эКВ}} = 2,528$  и  $\text{tg}\delta_{\text{эКВ}} = 1,319 \cdot 10^{-3}$ , при этом толщина всех трех вариантов диэлектрика выбрана равной 60 мкм.

Определение длительной электрической прочности выбранных диэлектрических систем проводилось в режиме колебательного разряда при величинах рабочей напряженности электрического поля – 100, 125 и 166,7 кВ/мм. По результатам проведенных испытаний получены зависимости длительной электрической прочности каждой из диэлектрических систем от величины рабочей напряженности электрического поля. Для создания высоковольтных импульсных конденсаторов с повышенными значениями удельной объемной запасаемой энергии выбран комбинированный бумажно-пленочный диэлектрик, пропитанный касторовым маслом.

Разработаны комплекты рабочей конструкторской документации на высоковольтные импульсные конденсаторы для скважинных электроразрядных установок с наружным диаметром корпуса 70 мм и  $W_{\text{уд}} = 70,3 \text{ Дж/дм}^3$ , с наружным диаметром корпуса 89 мм и  $W_{\text{уд}}$  от 52,9 до 68,1 Дж/дм<sup>3</sup> и с наружным диаметром корпуса 101,6 мм и  $W_{\text{уд}}$  от 51,8 до 64,4 Дж/дм<sup>3</sup>.

Показано, что в случае применения в конструкции конденсатора трех последовательно соединенных секций с  $E_{\text{раб}} = 166,7 \text{ кВ/мм}$  в корпусе базового конденсатора ИКП-30-1,2 возможно обеспечить номинальную емкость конденсатора в 2,4 мкФ, т.е. увеличить вдвое величину удельной объемной запасаемой энергии конденсатора, однако средний ресурс конденсатора при этом должен быть уточнен.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ ДЛЯ СКВАЖИННЫХ УСТАНОВОК

А.Я. Дмитришин, С.О.Топоров

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев

Институтом импульсных процессов и технологий (ИИПТ) НАН Украины создан ряд погружных скважинных установок для повышения дебита нефтяных и газовых скважин. Накопителями электрической энергии в них являются высоковольтные импульсные конденсаторы, эксплуатирующиеся в режиме колебательного разряда.

В настоящее время ведутся работы по увеличению частоты следования зарядов-разрядов, с целью уменьшения времени обработки скважин, что приводит к изменению теплового режима работы конденсатора, кроме того, конструктивные изменения в погружных скважинных установках, с целью их совершенствования, приводят к изменению таких параметров их эксплуатации как декремент затухания колебаний разрядного напряжения и период разрядного тока, что, в свою очередь, также ведет к изменению теплового режима работы конденсатора. Вместе с тем, учитывая высокую температуру окружающей среды их эксплуатации (85-100 °С), определение величины максимальной температуры в центре конденсатора является важной задачей для исключения теплового пробоя конденсатора.

В данной работе рассматриваются диэлектрические системы, которые используются в качестве рабочего диэлектрика существующих и разработанных моделей конденсаторов. На основе бумажно-плёночного диэлектрика, пропитанного касторовым маслом: толщинами 47 мкм (содержание пленки – 64%), 50 мкм (содержание пленки – 40%) и 60 мкм (содержание пленки – 50%). На основе полипропиленово-полиэтилентерефталатного диэлектрика, пропитанного полиметилсилоксановой жидкостью ПМС-20: толщинами 34 мкм (содержание полипропиленовой пленки – 70%), 35 мкм (содержание полипропиленовой пленки – 57%) и 39 мкм (содержание полипропиленовой пленки – 61%).

Построены зависимости перегрева, т.е. превышения температуры в центре конденсатора над температурой окружающей среды (85 °С), от частоты следования зарядов-разрядов для выбранных типов диэлектрических систем. Анализ этих зависимостей показал, что наибольшая величина перегрева у бумажно-плёночного диэлектрика, толщиной 50 мкм, что объясняется большим процентным содержанием полярного диэлектрика – конденсаторной бумаги. Уменьшение процентного содержания конденсаторной бумаги в диэлектрической системе приводит к снижению перегрева. Аналогичная картина наблюдается у плёночного полипропиленово-полиэтилентерефталатного диэлектрика, где уменьшение содержания полярной полиэтилентерефталатной пленки приводит к снижению перегрева. Также можно отметить, что значения величин перегрева у плёночных диэлектрических систем с ростом частоты следования зарядов-разрядов до 1 Гц значительно ниже, чем у бумажно-плёночных диэлектрических систем.

Также получены зависимости перегрева конденсатора от изменения величин декремента колебаний разрядного напряжения и периода разрядного тока, при эксплуатации конденсатора при фиксированной частоте следования зарядов-разрядов. Данные зависимости имеют максимум при малых значениях декремента колебаний разрядного напряжения, а при дальнейшем его увеличении перегрев снижается. Т.е. эксплуатация установок в режимах близких к гармоническим резко увеличивает максимальную температуру в центре конденсатора. Что касается периода колебаний разрядного тока, то с его увеличением перегрев снижается.

Для проверки теоретических расчетов были проведены экспериментальные исследования на высоковольтном импульсном конденсаторе ИКП-30-2,4 (номинальное напряжение – 30 кВ, номинальная емкость – 2,4 мкФ) при температурах окружающей среды 20 и 85 °С. Были определены зависимости температурного изменения ёмкости и тангенса угла потерь конденсатора. Снижение емкости конденсатора при повышении температуры окружающей среды от 20 до 85 °С составило 2,4%. Показания температуры снимались с корпуса в центральной части, с крышки в месте подсоединения к ней отрицательного токовывода и с положительного токовывода, расположенного со стороны, где отрицательный вывод припаян к крышке, как наиболее нагретой части конденсатора. Испытания проводились в режиме колебательного разряда с повышенными частотами 0,5 и 1 Гц. Были получены зависимости изменения температуры в указанных точках конденсатора. Результаты экспериментальных исследований вполне согласуются с данными теплового расчета.

На основании полученных результатов даны рекомендации по выбору режимов эксплуатации высоковольтных импульсных конденсаторов, которые используются в погружных скважинных установках для повышения дебита нефтяных и газовых скважин, с целью снижения тепловых потерь и перегрева внутри конденсатора.

# ФУНКЦІОНАЛЬНІ МОЖЛИВОСТІ МЕТОДІВ ІМПУЛЬСНОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛЕВОГО РОЗПЛАВУ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЙ ЛИВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА

А.В. Іванов, В.М. Цуркін, М.В. Честних, М.К. Гумененко  
Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв

Проаналізовано загальні та індивідуальні ознаки методів імпульсної обробки металевих розплавів, які досліджуються та розробляються в ІППТ НАН України, з метою визначення їх функціональних можливостей поліпшувати кристалізаційну здібність розплаву в технологіях ливарного виробництва.

Зокрема, визначено загальні та індивідуальні ознаки таких методів та описано їх енергетичні характеристики.

Показано, що методи, які досліджено, не є універсальними, їх конкретне застосування визначається метою обробки розплаву. На відміну від методів реагентної обробки, дія яких на розплав є вибірковою, дія методів імпульсної обробки можна класифікувати як кооперативну, багатофакторну та багатофункціональну.

Дія методів імпульсної обробки має енергетичну природу впливу на розплав, тому їх застосування дозволяє безпосередньо впливати на атомарну структуру розплаву як таку, що саме її перебудова змінює кристалізаційну здатність розплаву та його властивості.

Отримані дані дозволяють на стадії обирання методу обробки розплаву зробити належним чином попередню оцінку того чи іншого методу, як можливого інструмента для вирішення задач, що забезпечують підвищення якості литого металу.

## ОСОБЛИВОСТІ ІСКРОПЛАЗМОВОЇ КОНСОЛІДАЦІЇ СИСТЕМИ Al-Cu-C

А.Д. Зайченко, М.С. Присташ  
Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв

На сьогоднішній день бурхливий розвиток електроніки та електротехніки потребує нових матеріалів з високими показниками тепло- та електропровідності. Більшість матеріалів електротехнічного призначення виготовляють на основі Cu, вартість якої з кожним роком зростає, тому стоїть задача отримання композитів із заданими властивостями і зменшеною вартістю.

Розглянувши існуючі методи консолідації порошків, встановлено що саме метод іскро-плазмового спікання (ІПС) є найбільш енергоефективним та дозволяє зберегти дрібнозернистість структури за рахунок короткого часу консолідації.

Процес ІПС здійснюється в вакуумному середовищі та полягає в пропусканні електричного струму крізь графітову матрицю та порошок. Стенд ІПС має джерело живлення – суперпозицію пульсуючого та постійного струму. Постійний струм забезпечує однорідність температурного поля за рахунок резистивного нагріву, а пульсуюча складова ініціює мікроплазмові пробої між частинками порошку. Температура спікання протягом усього процесу контролюється системою управління.

Для дослідження впливу інтерметалідної зони  $\text{CuAl}_2$  на твердість матеріалів системи Al-Cu-C було консолідовано суміші різного масового складу: 82 % Al - 12 % Cu - 6 % C, 70 % Al - 25 % Cu - 5 % C та 47 % Al - 47 % Cu - 6 % C. Температура їх консолідації складала 500 - 600°C, час витримки 20 хв при механічному тиску 60 МПа.

За допомогою методів комп'ютерної металографії, а саме програмного комплексу Image Pro Plus, було встановлено, що 60 % Al марки ПА-4 та Cu марки ПМС-1 мають розмір менший за 20 мкм. Розмір частинок порошку графіту не перевищував 10 мкм.

Для компактів проводилось дослідження твердості за Віккерсом при навантаженні 5 кг, згідно з ДСТУ ISO 6507-1:2007 та дослідження мікротвердості окремих фаз згідно з ГОСТ 9450-76 на пристрої ПМТ-3. Для виявлення інтерметалідної фази  $\text{CuAl}_2$  використовували 20% водний розчин  $\text{HNO}_3$ .

В результаті було встановлено, що зміна масового складу компонентів системи Al-Cu-C впливає на товщину інтерметалідного шару  $\text{CuAl}_2$  що утворюється між частками міді та алюмінію під час ІПС. Так для суміші складу 82 % Al - 12 % Cu - 6 % C характерна товщина інтерметалідного шару складає 2,5 мкм, а для суміші складу 47 % Al - 47 % Cu - 6 % C – 7,5 мкм. Мікротвердість шару  $\text{CuAl}_2$  становить ~ 5 ГПа, мікротвердість алюмінію ~ 0,4 ГПа, а міді ~ 0,5 ГПа, тому збільшення товщини шару інтерметаліду впливає на загальну твердість всього компакта та дозволяє отримати матеріали системи Al-Cu-C з твердістю по Віккерсу від 700 до 1100 МПа

# ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ РАЗРЯДНО-ИМПУЛЬСНОЙ ПОДГОТОВКИ ШИХТЫ НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА КАРБИДОТИТАНОВЫХ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

Е.В. Липян, О.Н. Сизоненко

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев

Использование шихты из смеси порошков Ti и Fe после высоковольтной электроразрядной подготовки (ВЭР) для производства безвольфрамовых твердых сплавов (ТС) позволяет исключить необходимость в использовании дорогих и дефицитных легирующих компонентов.

Для управления функциональными свойствами ТС необходимо обеспечить возможность изменения соотношения упрочняющей фазы и связующего при подготовке шихты и дальнейшей консолидации.

Решение этой проблемы связано с определением соотношения компонентов для исходного состава порошковой смеси и варьируемого параметра ВЭР шихты, в качестве которого удобно использовать удельную энергию воздействия  $W_{уд}$ . Использование ВЭР воздействия на порошки состава 80 % Ti + 20 % Fe может дать возможность синтезировать достаточное количество карбида титана в шихте и консолидированном материале и позволит создать безвольфрамовые твердые сплавы на основе карбида титана с железной и титановой связкой с повышенными функциональными свойствами.

Целью данной работы является установление связи параметров ВЭР обработки в керосине смеси порошков титана и железа с функциональными свойствами консолидированных твердосплавных материалов методом искро-плазменного спекания (ИПС).

БВТС с железной (стальной) связкой содержат от 40 до 95 об. % (от 30 до 92 масс. %) TiC, причем с увеличением его содержания обычно возрастают твердость и износостойкость, однако уменьшаются вязкость и пластичность. Исходя из этого, содержание Ti ( $C_{Ti}$ ) в исходной смеси с Fe должно составлять от 26 до 90 мас. %.

Экспериментальные исследования позволили установить связь  $W_{уд}$  и количества образующегося в результате ВРИП шихты TiC, что позволяет перейти к зависимости  $W_{уд}(C_{Ti})$ , которую можно упрощенно аппроксимировать как:  $W_{уд} = 0,32 \cdot C_{Ti}$ , МДж/кг.

Исследование возможности управления функциональными свойствами осуществлялось для ТС, шихта для производства которых была получена в результате ВЭР порошковой смеси состава 80 % Ti + 20 % Fe, а  $W_{уд}$  составляла 4,5; 9; 18 и 27 МДж/кг.

Спекание подготовленной шихты выполнялось на экспериментальном комплексе ИПС «Гефест-10» при максимальной амплитуде суперпозиции постоянного и переменного тока 1,1 кА, частоте переменной составляющей 10 кГц, скорости нарастания температуры 20 °C/с, температуре ~ 1100 °C и времени выдержки 270 с (общее время), механическое давление при спекании 60 МПа

Для ТС определялись твердость HRA, потеря массы при абразивном износе на алмазном круге  $m_w$  и динамическая прочность  $\sigma_d$  методом Гопкинсона-Кольского. Установлено, что ТС, полученные из исходных порошков имеют твердость 74 HRA и потерю массы при износе  $m_w = 4,2$  кг/км. ТС полученные при ВРИП шихты с  $W_{уд} = 4,5$  МДж/кг имели твердость 82 HRA,  $m_w = 4,2$  кг/км,  $\sigma_d = 1250$  МПа, а при  $W_{уд} = 18$  МДж/кг имели твердость 84 HRA,  $m_w = 1,5$  кг/км,  $\sigma_d = >1250$  МПа (не разрушились). При этом твердость ВК8 по ГОСТ 3882-74 составляет 88 HRA, а её,  $m_w = 8,5$  кг/км.

Рассматривая комплекс функциональных свойств получаемых материалов, можно сделать вывод, что оптимальными характеристиками обладают ТС, консолидированные из шихты, полученной ВЭР подготовкой порошков при значениях удельной энергии от 9 до 18 МДж/кг.

**Выводы.** Определены граничные значения соотношений для составов исходной смеси порошков системы Fe-Ti и удельной энергии ВРИП шихты, что позволило целенаправленно изменять соотношение упрочняющей фазы и связующего при подготовке шихты и дальнейшей консолидации, и за счет этого управлять функциональными свойствами карбидтитановых ТС.

# НАНЕСЕНИЕ ЗАЩИТНЫХ НАНОУГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОДУГОВЫМ МЕТОДОМ

Ю.О. Адамчук, Л.З. Богуславский, А.В. Синчук  
Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев

В связи с увеличением мощности излучающих устройств и бурным развитием техники, которая нуждается в защите от различного рода электромагнитных помех, разработка методов получения надежных экранирующих наноматериалов и наноструктурированных покрытий остается одним из приоритетных направлений современной науки. В настоящее время для нанесения нанокристаллических покрытий на поверхность применяются, в основном, стандартные подходы, модернизированные в той или иной степени под конкретную задачу: химическое и физическое осаждение из паровой фазы, газоплазменный метод, ионно-плазменное напыление, катодное напыление, электродуговой метод, метод реактивного магнетронного распыления, детонационное напыление, лазерная наплавка. Однако из-за неудовлетворительного качества получаемых покрытий, низкой производительности или высокой стоимости далеко не все из них имеют потенциал для реализации в промышленном масштабе.

В данной работе предлагается осаждать на поверхность различных конструкционных материалов нанокристаллический углерод, который образуется в результате высокочастотной электроразрядной деструкции органических газов.

Для нанесения покрытия, образец размещается в реакционной камере, заполненной углеродсодержащим газом при атмосферном давлении, и подключается к токовому проводу, как противэлектрод. Другой электрод, который можно перемещать в пространстве реакционной камеры по заданной траектории, располагается перпендикулярно к обрабатываемой поверхности на расстоянии 5-15 мм. При подаче высокого напряжения в промежутке между электродом и поверхностью возникает дуговой разряд, деструкция рабочего газа в высокотемпературной плазме дуги на углерод и водород, и осаждение углерода тонким наноструктурированным слоем на поверхность. Для получения разрядных импульсов используют генератор импульсов напряжения прямоугольной или синусоидальной формы с уровнем напряжения от единиц до десятков киловольт и частотой от 1 до 100 кГц.

Экспериментальная отработка метода с использованием разрядного тока 0,13 А и частоты 56 кГц подтвердила его пригодность для нанесения углеродных наноструктурированных покрытий на любые металлические поверхности, включая медь, не образующую с углеродом твердых растворов и карбидов. При одинаковом времени осаждения структурные особенности покрытия в первую очередь определяются материалом подложки, так как самые плотные и наименее пористые покрытия получены на стали, в которой могут образовываться промежуточные диффузионные и карбидные слои, повышающие адгезию. Средняя толщина покрытия на стали достигает 20–40 мкм, на подложке из никелевого сплава 2–4 мкм, а самые тонкие покрытия, толщина которых не определяется оптически, характерны для алюминия и меди. Результаты атомно-силовой микроскопии показали, что полученные покрытия состоят из структурированных фрагментов наноразмерного диапазона, которые формируют поверхность со среднеарифметической шероховатостью 35–40 нм.

Механизмы роста покрытий различаются в зависимости от характера взаимодействия углерода с материалом основы. Например, на меди наблюдался островковый рост, а на никелевом сплаве – пленочный. На начальных стадиях на медной подложке, не склонной к взаимодействию с углеродом, образуются равномерно распределенные и не связанные с морфологическими особенностями поверхности островки роста, которые со временем увеличиваются. Причем, исходя из конечной бугристой морфологии покрытия очевидно, что скорость роста в высоту значительно опережает боковое развитие углеродных зародышей. Начальное покрытие на никелевом сплаве – тонкая пленка, которая наследует поверхность, повторяя текстуру бороздок шлифовки, и относительно равномерный рост которой в конечном итоге формирует более сглаженный, по сравнению с медью, поверхностный рельеф.

Нанесенные покрытия – рентгеноаморфны (кристаллическая решетка не определяется) и способны поглощать рентгеновское излучение. Дифрактограммы, полученные для покрытий на меди и алюминии, содержат пики исключительно матричных металлов, что свидетельствует об отсутствии образования других промежуточных фаз в системе (растворов углерода в материале подложки, карбидов). Сравнение интенсивности основных дифракционных максимумов, выполненное для образца алюминия без покрытия и образца с покрытием, дает возможность отметить наличие заметного ослабления интенсивности рентгеновского излучения, отраженного большинством кристаллографических плоскостей. Среднее уменьшение интенсивности рентгеновского излучения составляет 6,3%, что для покрытия микронной толщины является неплохим показателем.

Определение адгезионной прочности сцепления покрытия со сталью и алюминием при испытании на разрыв клеевых соединений показало, что полного отрыва покрытия от поверхности не происходит. Прочность клеевых соединений алюминия составляет в среднем 6,8 МПа, клеевых соединений стали - 10,9 МПа, и разрушаются они преимущественно когезионно, с разрывом углеродного покрытия. То есть слабым звеном клеевых соединений является само покрытие, которое, очевидно, имеет слоистую структуру и прочность, характерную для мелкозернистых конструкционных графитов.

# ELECTRIC DISCHARGE METHOD FOR SYNTHESIS OF CARBON NANOMATERIALS

N.I. Kuskova, K.V. Dubovenko, S.V. Petrichenko

Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Science of Ukraine, Mykolayiv

Under electric discharge processing of organic liquids differing in the structure of molecules and degree of electron hybridization in carbon atoms, the synthesis of various carbon nanomaterials (CNM) and hydrocarbon gases of different composition takes place. Processing gas mixtures, which have been formed by electric discharge and in the pyrolysis reactor, results in the selective deposition of certain types of carbon nanomaterials on substrates of different materials.

It has been found experimentally that depending on the organic liquid molecular structure for saturated hydrocarbons, which are a class of alkanes and cycloalkanes, the yield of the carbon nanomaterial under the liquid processing is sharply increased with an increase in the number of carbon atoms and equal amounts of C-C bonds (cyclopentane → hexane), or with an increase in the number of C-C bonds and an equal number of carbon atoms (pentane → cyclopentane, hexane → cyclohexane).

Three-step processing of organic liquids and generated gases in the mode of continuous flow allows increasing the efficiency of raw material processing and obtain various carbon nanomaterials (fullerene nanocomposites, carbon nanotubes, nanofiber and films) with different physical properties.

Despite the large number of publications devoted to the electric discharge synthesis of CNM, a systematic study of electric discharge spatial and temporal characteristic influence on the size, structure and properties of the resulting materials is far from completion. A complicated problem of nanoparticle preparation is the demand of their narrow range of predetermined geometrical dimensions because the nanomaterials separation into fractions after production is a challenge. It is evident that a wide variation of geometric parameters of the synthesized particles is explained, in particular, by the spatial and temporal distribution characteristics of electric discharges in the working environment, in particular, by the discharge temperature and pressure. Therefore, an important task is to perform analysis of integral and spatiotemporal characteristics of electric discharges in plasma chemical reactors, filled with hydrocarbons in liquid or gaseous state.

Numerical simulation of electric discharge formed along the axis of a cylindrical chamber filled with hydrocarbon material has been carried out in the magnetohydrodynamic approximation. The simulation results are compared with the known data. The analysis of the spatial and temporal distribution of the pressure and temperature in the discharge chamber has been performed with due account for the interaction between the shock waves excited by the spark discharge and the plasma channel. Space-time electrodynamic (current density, electric and magnetic field intensity, specific electric conductivity), hydrodynamic (pressure, density, velocity) and thermodynamic (temperature, internal energy) characteristics of the discharge are obtained. The advantage of the model is also the description of multicomponent medium with consideration of its multiple ionization in the discharge chamber.

Possible mechanisms of the carbon nanomaterial formation under electric discharge processing are proposed on the base of experimental data and numerical simulation. It is shown that treatment of the hydrocarbons leads to a cascade of chemical reactions, which include processes of decomposition (C-C bond breaking), dehydrogenation (C-H bond breaking) and polymerization (formation of new C-C bonds). Qualitative and quantitative composition of the all products of electric discharge processing (gaseous, CNM insoluble solids and dissolved substances in the treated liquid) can vary within wide ranges and depends largely on the raw material (organic liquid) type.

A three stage pulsed power source is designed for synthesis of carbon nanomaterials dew to the electric discharge method proposed.

# ОСОБЛИВОСТІ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ТОРОЇДАЛЬНОГО МІЦНОГО КОРПУСУ, ВИКОНАНОГО НАМОТУВАННЯМ ІЗ ПКМ

С.Ф. Присташ

Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

У роботі представлено дослідження особливостей розрахунку напружено-деформованого стану (НДС) тороїдальних міцних корпусів із полімерних композиційних матеріалів, створення яких являється технологічно більш простою процедурою ніж створення аналогічних конструкцій з металу.

Оболонки, що виготовлені намотуванням, являються найбільш складними для розрахунку. Складність полягає в неоднорідності пружних властивостей як по товщині, так і в напрямку армуючих шарів, і в багатьох існуючих методах розрахунку пластин та оболонок ця обставина не враховується. Для таких структур поки що не вдалось отримати оцінки ефективних модулів пружності, тому їх розраховують як багат шарові оболонки, в яких армуючі шари розглядаються жорсткими з приведеними пружними властивостями, що визначаються експериментально або теоретично. Намотування вносить технологічні обмеження в схему армування, а саме: введення армуючого матеріалу в напрямку радіуса або під кутом до нього, виявляється, робить схему досить складною, а часто і неможливою для аналітичного опису.

У роботі досліджено НДС міцного корпусу кругового поперечного перерізу, отриманого методом поперечного намотування в комбінації з повздовжньою намоткою (або викладкою).

Рішення даної задачі представлено в дискретній постановці, коли в якості проектних параметрів використовується кількість шарів в кожному із напрямків армування. Це дозволяє в ході оптимізації враховувати технологічні особливості будови композиційного тороїдального міцного корпусу, отриманого методом безперервного намотування.

Віссиметрична задача згинання ортотропного міцного корпусу зі змінною по меридіанному перетину товщиною вирішена при дії гідростатичного тиску в постановці лінійної теорії пружності з використанням методу Бубнова-Гальоркіна.

В якості прикладу міцного корпусу ( $a=1$  м,  $k=1/3$ ) підводно-технічного засобу розглядаються ортотропні тороїдальні оболонки зі СП та ВП. Пружні характеристики моношару та осереднена товщина пакету обрані з позиції стійкості для глибини занурення  $H=1000$  м ( $P_{кр}=10$  МПа): із СП (S-2 GLAAS/Ероху) –  $E_1=59$  ГПа,  $E_2=20$  ГПа,  $\mu_1=0,28$ ,  $h_{\Sigma}^{СП}=0,064$  м, та з ВП (M35J/Ероху) –  $E_1=207$  ГПа,  $E_2=7,4$  ГПа,  $\mu_1=0,348$ ,  $h_{\Sigma}^{ВП}=0,04$  м. Товщина моношарів складала зі СП  $h_1=0,25 \cdot 10^{-3}$  м, а з ВП –  $h_1=0,2 \cdot 10^{-3}$  м.

Встановлено вплив механічних властивостей компонентів композиційного матеріалу, порядку розташування армуючих шарів та геометрії тороїдального корпусу на його напружений стан. Це дозволить в разі оптимізації враховувати технологічні особливості створення композитного тороїдального міцного корпусу, отриманого методом безперервного намотування волокном.

Проведено аналіз збіжності отриманих результатів та виявлені їх особливості, що дозволило отримати епюри розподілу прогинів, нормальних зусиль, згинаючих моментів та перерізуючих зусиль по меридіанному перерізу тора та побудувати епюри напружень.

Чисельний аналіз збіжності отриманих результатів показав, що для розрахунків напружень достатньо утримувати до  $M=5$  членів ряду, а при визначенні прогинів достатньо  $M=3$ .

Максимальний прогин розвивається при  $\theta=\pm\pi/2$  та складає 17% для СП і 16,3% для ВП від змінної товщини оболонки. Усі точки середньої лінії переміщуються у напрямку геометричного центру перерізу оболонки, крім вузької зони навколо точки при  $\theta=\pi$ .

Максимальні нормальні зусилля  $T_1^{\max}$  при  $\theta = \pi$ , а  $T_2^{\max}$  при  $\theta=\pm\pi/2$ .

Згинальні моменти  $M_1^{\max}$  при  $\theta=\pm 5\pi/6$ .

Максимальні сумарні значення напружень  $\sigma_{\theta}$  і  $\sigma_{\psi}$  для тороїдальних міцних корпусів в обох прикладах, що враховують зміну товщини в поперечному напрямку, досягають на зовнішньому екваторі ( $\theta=0^\circ$ ).

Показано, що врахування зміни товщини при намотуванні поперечних шарів суттєво впливає на величину напружень. Головний вклад в НДС в точці на зовнішньому екваторі вносять нормальні зусилля  $T_1(\theta)$  і  $T_2(\theta)$ .

При  $P_{кр} = 10$  МПа максимальні напруження для СП S-2 GLASS/Ероху склали при врахуванні змінної товщини оболонки  $\sigma_{\theta}^{\max} = 185$  МПа та  $\sigma_{\psi}^{\max} = 103$  МПа, для ВП M35J/Ероху склали  $\sigma_{\theta}^{\max} = 291$  МПа та  $\sigma_{\psi}^{\max} = 169$  МПа, а в розрахунку по осередненій товщині, по рішенню Феппля, вони склали для СП  $\sigma_{\theta}^{\max} = 163,5$  МПа та  $\sigma_{\psi}^{\max} = 93,5$  МПа і для ВП  $\sigma_{\theta}^{\max} = 270$  МПа та  $\sigma_{\psi}^{\max} = 155$  МПа.

З аналізу отриманих даних можна зробити висновок: не врахування зміни товщини оболонки призводить до помилки в небезпечну сторону та складає для СП  $\sigma_{\theta}^{\max}$  - 11,6%,  $\sigma_{\psi}^{\max}$  - 9,22%, а для ВП  $\sigma_{\theta}^{\max}$  - 7,21%,  $\sigma_{\psi}^{\max}$  - 8,28%.

# ДОСЛІДЖЕННЯ ВИДІЛЕННЯ МЕТАНУ ПРИ ТЕПЛОВІЙ ДІЇ НА ТВЕРДУ ВУГЛЕЦЕВМІСНУ СИРОВИНУ

Агасєв Р.А., Ключєв Е.С.

Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, м. Дніпро

На сьогоднішній день для паливно-енергетичного комплексу України існує потреба в пошуку додаткових джерел енергії. Одним із перспективних напрямків вирішення цього питання є комплексне освоєння вуглецевмісних ресурсів, які зосереджені в породних відвалах та мулонакопичувачах вуглезбагачувальних фабрик. Тому актуальним є вдосконалення існуючих геотехнологічних способів розробки родовищ, які дозволяють найбільш ефективно переробити вуглецевмісні поклади та отримати альтернативу природному газу.

При цьому необхідно вирішувати ряд завдань, пов'язаних з отриманням даних про властивості, склад і особливості поведінки твердої вуглецевмісної сировини при фізико-хімічних процесах, які характеризуються фазовими перетвореннями та супроводжуються тепловиділенням з утворенням парогазової фази за рахунок хімічних реакцій у пористому середовищі. Аналіз відомих способів засвідчив, що існуючі процеси теплової дії характеризуються істотним зниженням кількості горючих компонентів у газовій фазі, значним забрудненням навколишнього середовища та складнощами в контролюванні процесу, що призводить до додаткових витрат. Одною з причин цього є недостатня вивченість процесів фізико-хімічних перетворень, що відбуваються у вуглецевмісній сировині, і відсутність обґрунтованого вибору раціональних параметрів теплової дії для отримання газової фази.

Тому метою роботи є вивчення особливостей отримання метану при тепловій дії на тверду вуглецевмісну сировину та встановлення закономірностей його виділення в залежності від температури процесу. Для досягнення поставленої мети виконано експериментальні дослідження складу вуглецевмісної сировини, що дозволило отримати газову фазу з високим вмістом метану.

В якості матеріалу для проведення досліджень обрано сапропеліт й продукт переробки вугілля шахти (вугільний шлам) «Червоноградська» Львівсько-Волинського басейну. При оцінці показників речовинного складу, параметрів технічного та хімічного аналізів компонентів середовища використано методи математичної статистики та визначено необхідну кількість зразків матеріалу. Оцінка проведена за наступними показниками: вміст вуглецю, водню, кисню, азоту, загальної сірки, вологість, зольність, вихід легких речовин і хімічний склад золи. Аналіз мінералогічного складу за допомогою поляризаційного мікроскопа показав, що до складу досліджених зразків порід входить 30-37% органічних речовин у вигляді вуглефікованого детриту і вугільного пилу, 61-68% золи, 2-2,2 % сірки і 10-30 % глинистих частинок. Встановлено наступне співвідношення основних мінералів: гідрослюди – 17-25 %; каолініту – 5-15 %; силікату – 5-10 %; хлориту – 9-10 %.

Експериментальні дослідження проведені для встановлення закономірностей зміни кількості і складу газової фази від температури і часу процесу і обґрунтування раціональних параметрів теплової дії на тверду вуглецевмісну сировину. Для досягнення поставленої мети вирішено наступні завдання:

- визначено основні параметри процесу: температура, час процесу та кількість газової фази;
- проведено аналіз хімічного складу газової фази, утвореної в процесі теплової дії.

Сутність експериментального методу полягала в нагріванні без доступу повітря в реторті певної маси вугілля і порід з отриманням твердого залишку і збиранням газо- і пароподібних продуктів, що утворилися в процесі теплової дії. Смоли і воду конденсували в приймачі-охолоджувачі. Потім твердий залишок, що залишився в реторті, і приймач разом з продуктами конденсації кожен окремо зважували. Вихід газової фази визначався по об'єму води, що витекла з газометра. При аналізі отриманих даних встановлено, що вихід метану у діапазоні від 400 °С до 900 °С для різних компонентів сировини відбувається за ідентичними залежностями. При цьому кількісний склад газової фази при тепловій дії на бінарні суміші сапропеліту і породи не відповідає сумарному кількісному складу газової фази, отриманої окремо із сапропеліту і породи. Це пов'язано, ймовірно, з можливим проявом каталітичних ефектів, що відбуваються при фізико-хімічних перетвореннях у вуглецевмісних породах. Наявність у мінеральному складі оксидів  $Fe_2O_3$  і  $MgO$  сприяє прискоренню процесу розкладання органічних речовин, що підвищує вихід газової фази в 1,1-1,3 рази. Таким чином, вихід метану змінюється за параболічною кривою і в діапазоні температур від 700 °С до 800 °С має максимум. У подальшому вихід метану зменшується через його піроліз. Новизна отриманих результатів полягає в тому, що вперше отримано залежності розподілу горючих компонентів від температури в процесі теплової дії на гірничє середовище, що дозволяє вдосконалити процес вилучення метану з газової фази.

У результаті експериментальних досліджень встановлено, що найбільша кількість метану утворюється при тепловій дії на вугільний шлам. Таким чином, експериментально підтверджено принципову можливість отримання метану для подальшого вдосконалення геотехнологічних способів розробки твердої вуглецевмісної сировини при здійсненні теплової дії.

# ДИФФУЗИОННАЯ СВАРКА КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ НАНОСТРУКТУРНОЙ ФОЛЬГИ

В.Ф. Квасницкий<sup>1</sup>, В.В. Квасницкий<sup>2</sup>, Б.В. Бугаенко<sup>1</sup>,  
Е.А. Бутурля<sup>1</sup>, Д.С. Литвиненко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> - Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев,

<sup>2</sup> – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев

Преимуществами композиционных материалов (КМ) являются их повышенные температуры эксплуатации, жесткость, износостойкость, прочность, которые сохраняются вплоть до температуры плавления. Реализация преимуществ КМ возможна только при наличии надежных способов соединения отдельных элементов конструкций, изготовленных из КМ в виде листов, прутков или более сложных элементов как в однородном, так и в разнородном сочетании с другими материалами. Сварка плавлением КМ приводит к разрушению их структуры и поэтому является неэффективной. Возможно применение контактной сварки без расплавления. Возможна пайка углеалюминиевых конструкций как между собой, так и с алюминиевыми сплавами. Используемые ныне способы соединения КМ можно разделить на две группы:

- сварка с нерасплавляющимися высокопластичными прослойками;
- сварка с расплавляющимися прослойками.

В качестве мягких прослоек используют алюминий технический, легированный магнием, кремнием, медью или литием, которые обладают сверхпластичностью. В качестве расплавляющихся прослоек используются в основном прослойки эвтектического типа. Одним из наиболее эффективных способов соединения является диффузионная сварка в вакууме (ДСВ) через нерасплавляющуюся прослойку с активацией соединяемых поверхностей. Для этого используют нерасплавляющиеся высокопластичные промежуточные прослойки, например, алюминий, легированный магнием, кремнием, медью, литием, обладающие сверхпластичностью.

Цель настоящей работы – исследование процесса ДСВ композита на основе алюминия, содержащего 55 % карбида кремния, с применением наноструктурных нерасплавляющихся прослоек. Исследованы параметры режимов ДСВ, параметры пластической деформации композита и структура сварных соединений. Образцы сваривались внахлестку через промежуточную прокладку из наномногослойной пленки, полученной электронно-лучевым напылением. При этом использовали фольгу алюминий-никель и алюминий-титан, которые были получены на стандартном оборудовании путём послойного напыления алюминия и никеля или алюминия и титана при толщине фольги от 20 до 94 мкм в зависимости от количества циклов, которое составляло 40...330 циклов. В фольге алюминий-никель концентрация никеля составляла ( % ат ) 38,7...54,8 и алюминия 45,2...61,7, в фольге алюминий-титан – титана 22,2...48,6 и алюминия 51,4...77,8.

Процесс соединения проводился в вакууме  $10^{-2}$  Па при температуре и давлении в стыке обеспечивающими необходимую пластическую деформацию.

Особенностью композита на основе алюминия, содержащего 55% карбида кремния, является низкая пластичность. Учитывая то, что при ДСВ образование физического контакта происходит за счёт пластической деформации ползучести, для обеспечения жёсткого контроля величины деформации при ДСВ в работе исследованы процессы ползучести и установлены параметры ползучести в зависимости от температуры и напряжения сжатия композита, по которым определены параметры режима ДСВ. Получено уравнение ползучести, позволяющее регулировать параметры режима ДСВ в широком интервале, не допуская разрушения композита.

Установлена принципиальная возможность ДСВ КМ с использованием наномногослойной прослойки без её оплавления с применением индукционного и контактного нагрева. При индукционном нагреве в индукторе разогревались стальные цилиндры, которые передавали тепло за счёт теплопроводности свариваемым внахлестку пластинам из КМ. Температура контролировалась термопарой, установленной на стальном цилиндре непосредственно возле свариваемых заготовок. Давление между свариваемыми поверхностями обеспечивалось усилием от рычажного механизма. В процессе термического цикла сварки давление изменялось с целью обеспечения нагрева заготовок, пластической деформации ползучести и физического контакта соединяемых поверхностей.

Бездефектные сварные соединения получены как с фольгой алюминий-титан, так и алюминий-никель при температуре 580...600°C. Давление и время сварки определяется по величине необходимой (допустимой) пластической деформации ползучести. По результатам исследований структуры соединений рекомендованы фольги и параметры режимов ДСВ КМ.

## ВПЛИВ МОДИФІКАТОРА НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИТІВ

А.В. Букетов, А.Г. Кулініч, Р.Ю. Негруца, М.Ю. Амелін, О.М. Безбах  
Херсонська державна морська академія, м. Херсон

Провідні галузі економіки, сучасний стан промисловості постійно вимагають від виробників й науковців розробляти та впроваджувати у виробництво нові матеріали. Основні сфери застосування таких матеріалів – це надійність при експлуатації машин та механізмів технологічного устаткування, а також при ремонті транспортних засобів. Одними з перспективних матеріалів, які б відповідали вимогам сучасності є полімерні композити. На сьогодні композити з епоксидною матрицею ефективно використовують для захисту обладнання від корозії та з метою поліпшення фізико-механічних і теплофізичних властивостей деталей машин у багатьох галузях виробництва. Композитні матеріали (КМ) мають кращі характеристики зносостійкості, довговічності, вони достатньо витривалі до впливу хімічно-активних речовин, мають підвищені антикорозійні властивості порівняно з традиційними матеріалами, такими як метали та сплави на їх основі. Тому їх все більше застосовують в судно- та машинобудуванні для суттєвого збільшення ресурсу роботи обладнання та устаткування, у тому числі для збільшення терміну експлуатації та міжремонтного періоду деталей машин та механізмів. З метою покращення фізико-механічних властивостей КМ на основі епоксидного діанового олігомеру ЕД-20, останній модифікують різноманітними хімічними сполуками.

Як основний компонент для зв'язувача при формуванні КМ вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84). Як модифікатор використано 4-амінобензойну кислоту. Модифікатор вводили у зв'язувач за вмісту від 0,10 до 2,00 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20. Для зшивання епоксидних композицій використано твердник поліетиленполіамін ПЕПА (ТУ 6-05-241-202-78).

У результаті експериментальних досліджень встановлено, що при введенні у діановий олігомер ЕД-20 модифікатора 4-амінобензойної кислоти ( $C_7H_7NO_2$ ) за вмісту  $q = 0,10 \dots 0,50$  мас.ч. порівняно з вихідною матрицею відбувається суттєве покращення фізико-механічних властивостей КМ. Зокрема, максимальне значення руйнівних напружень при згинанні ( $\sigma_{32} = 62,7$  МПа) спостерігали за вмісту модифікатора у кількості  $q = 0,50$  мас.ч., найбільше значення модуля пружності при згинанні ( $E = 3,9$  ГПа) відмічено за вмісту модифікатора –  $q = 0,10$  мас.ч. та  $q = 1,50$  мас.ч. При цьому необхідно зазначити, що за вмісту модифікатора у кількості  $q = 1,00 \dots 2,00$  мас.ч. спостерігали суттєве зниження таких властивостей як руйнівні напруження при згинанні та ударна в'язкість матеріалів. Отже, можна стверджувати, що оптимальний вміст модифікатора 4-амінобензойної кислоти в епоксидній матриці з найкращими фізико-механічними властивостями становить  $q = 0,10$  мас.ч. на 100 мас.ч. олігомеру ЕД-20. За такого вмісту модифікатора формується матеріал з такими показниками властивостей: руйнівні напруження при згинанні  $\sigma_{32} = 56,8$  МПа, модуль пружності при згинанні  $E = 3,9$  ГПа та ударна в'язкість  $a = 7,9$  кДж/м<sup>2</sup>. Така модифікація забезпечує формування полімеру, який порівняно з вихідною (немодифікованою) матрицею характеризується вищими показниками руйнівних напружень при згинанні (у 1,2 разів), модуля пружності при згинанні (у 1,4 разів). При цьому показники ударної в'язкості при модифікації епоксидного зв'язувача практично не змінюються (значення знаходяться у межах похибки експерименту).

Методом оптичної мікроскопії дослідили поверхню зламу вихідної та модифікованої, за різного вмісту модифікатора, епоксидних матриць. На підставі аналізу фрактограм вихідної матриці встановлено, що поверхня зламу має однорідну структуру, прямі неглибокі лінії сколювання. Це свідчить про крихкість та напружений стан матеріалу. Природа фрактограм композитів за вмісту модифікатора  $q = 0,10 \dots 0,50$  мас.ч. визначається однорідністю поверхні, розгалуженістю, незначними лініями зламу та несуттєвими кратероподібними утвореннями, що дозволяє припустити про формування кінетично врівноваженого в'язкого матеріалу з підвищеною стійкістю до руйнування. Аналіз фрактограм зламу композитів за вмісту модифікатора у кількості  $q = 1,00 \dots 2,00$  мас.ч. показує значне зниження однорідності структури, лінії сколювання хаотичні за формою з суттєвими заглибленнями, у деяких місцях їх поверхня має характерну форму сходинок. Напружений стан та крихкість матеріалів зростає, що зумовлено погіршенням фізико-хімічних процесів структуроутворення матеріалів. Можна констатувати про недоцільність введення у епоксидний олігомер ЕД-20 модифікатора за вмісту  $q = 1,00 \dots 2,00$  мас.ч. Необхідно зазначити, що дослідження топології зламу модифікованих матриць методом оптичної мікроскопії добре корелюють з результатами експериментальних випробувань фізико-механічних властивостей композитів.

# ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИТИВ, НАПОВНЕНИХ ЧАСТКАМИ ПРОКАТНОЇ ЗАЛІЗНОЇ ОКАЛИНИ

А.В. Сапронова, Н.М. Букетова  
Херсонська державна морська академія, м. Херсон

Загальновідомо, що введення наповнювачів у епоксидний зв'язувач забезпечує утворення хімічної та фізичної взаємодії при зшиванні епоксикомпозитів. Взаємодія компонентів залежить від хімічної активності наповнювача, питомої площі його поверхні, співвідношення інгредієнтів і суттєво впливає на структуру матеріалів та їх характеристики у процесі експлуатації. При цьому актуальним є використання дешевих наповнювачів (відходи промислового виробництва), які, окрім підвищення експлуатаційних характеристик епоксидних композитів, сприяють зменшенню вартості конструкційних матеріалів, що вигідно з економічної і екологічної точки зору. Враховуючи об'єми виробництва прокатної сталі актуальним є питання утилізації прокатної залізної окалини (ПЗО). ПЗО утворюється на поверхні прокату і представляє собою суміш різних фаз, причому склад і структура будуть визначатися режимом теплового оброблення металу. Таким чином ПЗО різного розміру і складу є цікавими з наукової і практичної точки зору як наповнювачі для формування епоксидних композитів з підвищеними експлуатаційними характеристиками.

Як основний компонент для зв'язувача при формуванні КМ вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84). Як наповнювач використовували відходи від виробництва, а саме частки прокатної залізної окалини, що характеризуються наступним складом, %:  $\text{SiO}_2$  – 0,803;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 0,36;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 32,57;  $\text{FeO}$  – 64,85;  $\text{MgO}$  – 0,03;  $\text{MnO}$  – 0,44;  $\text{CaO}$  – 0,21;  $\text{S}$  – 0,031. Дисперсність часток становить  $d = 60 \dots 63$  мкм. Для зшивання епоксидних композицій використано твердник поліетиленполіамін ПЕПА (ТУ 6-05-241-202-78).

Методом ІЧ-спектрального аналізу визначили хімічну активність часток ПЗО. Встановлено значну кількість активних груп у діапазоні хвильових чисел  $\nu = 400 \dots 1350$   $\text{cm}^{-1}$  ( $\text{Mg-O}$ ,  $\text{Mn-O}$ ,  $\text{S}$ ,  $\text{Ca-O}$ ,  $\text{Fe-O}$ ,  $\text{Fe-O}_2$ ,  $\text{Si-O}_2$ ,  $\text{Si-O-Si}$ ). Такі групи активізують перебіг процесів полімеризації за рахунок взаємодії з боковими групами та сегментами зв'язувача, що забезпечує формування полімерів із високими показниками механічної міцності. Доведено, що введення у епоксидний зв'язувач наповнювача ПЗО за вмісту  $q = 10$  мас.ч. приводить до підвищення показників руйнівних напружень при згинанні композитних матеріалів відносно матриці на  $\Delta\sigma_{32} = 10 \dots 12$  МПа. Це опосередковано свідчить про взаємодію аміногруп твердника з атомами кисню оксидів металів внаслідок чого зростає густина просторової сітки полімеру, відповідно зростає механічна міцність матеріалу. При збільшенні вмісту часток ПЗО зростає і густина просторової сітки полімеру, а отже і ступінь зшивання полімеру. Підтвердженням наведених положень є зростання руйнівних напружень при згинанні з  $\sigma_{32} = 48,0$  МПа (для епоксидної матриці) до  $\sigma_{32} = 70$  МПа при введенні оптимального вмісту ( $q = 20$  мас.ч.) часток ПЗО. Подальше введення часток ПЗО за вмісту  $q = 40 \dots 80$  мас.ч. призводить до зниження руйнівних напружень при згинанні  $\sigma_{32} = 60,0 \dots 48,0$  МПа. Вважали, поясненням є зростання жорсткості полімерів за рахунок вповільнення сегментальної рухливості міжвузлових молекулярних ланцюгів зумовленої зростанням густини полімеру до критичного значення.

Додатково встановлено, що динаміка зростання модуля пружності аналогічна руйнівним напруженням при згинанні. Однак, максимальне значення модуля пружності  $E = 4,2$  ГПа спостерігали при введенні ПЗО за вмісту  $q = 80$  мас.ч.

Показано, що ведення у епоксидний зв'язувач наповнювача ПЗО за вмісту  $q = 10$  мас.ч. не суттєво впливає на показники ударної в'язкості, позаяк їх значення становить  $W = 7,3$  кДж/м<sup>2</sup>, що є на рівні із значенням ударної в'язкості епоксидної матриці. Експериментально встановлено, що при введенні ПЗО за вмісту  $q = 20 \dots 60$  мас.ч. ударна в'язкість зростає відносно вихідної матриці ( $W = 7,3$  кДж/м<sup>2</sup>) і становить  $W = 7,5 \dots 8,9$  кДж/м<sup>2</sup>. Максимальне значення ударної в'язкості спостерігали при введенні часток  $q = 80$  мас.ч., що додатково узгоджується із результатами модуля пружності при згинанні і свідчить про достовірність отриманих результатів дослідження.

Отже, доведено, що для формування композитів з поліпшеними фізико-механічними властивостями у комплексі необхідно у епоксидний олігомер ЕД-20 (100 мас.ч.) вводити наповнювач прокатну залізну окалину за вмісту  $q = 40$  мас.ч. У такому випадку формується матеріал з наступними властивостями: руйнівні напруження при згинанні –  $\sigma_{32} = 60,0$  МПа, модуль пружності при згинанні –  $E = 4,1$  ГПа, ударна в'язкість –  $W = 8,3$  кДж/м<sup>2</sup>. Наведені результати добре узгоджуються із дослідженням структури розроблених матеріалів. Методом оптичної мікроскопії, встановлено, що використання дисперсних часток прокатної залізної окалини за вмісту  $q = 40$  мас.ч. забезпечує формування термодинамічно і кінетично врівноважених полімерних систем. Аналіз фрактограм зламу дозволив виявити структурні особливості композитів (рівномірний розподіл часток за об'ємом, що зумовлює формування однорідної структури) та визначити оптимальний вміст дисперсних наповнювачів для формування покриттів, які експлуатуються в умовах впливу механічних навантажень.

## ПРОЦЕСИ ОТРИМАННЯ ПОРИСТИХ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ З РЕГУЛЬОВАНОЮ ТЕРМІЧНОЮ СТІЙКІСТЮ

Л.П. Клименко, В.І. Андреев, О.Ф. Прищепов, О.І. Случак, В.В. Шугай  
Чорноморський національний університет ім. Петра Могили, м. Миколаїв

Титанова губка, що є основою розроблених футерувальних матеріалів є також сировиною для виробництва металічного титану. Виготовлення композитних матеріалів відбувається способом рівномірного розподілу наповнювачів  $\text{SiO}_2$  (пил оксиду кремнію),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (корунд), базальтова смола, графіт, червоний бокситний шлам, армуючі базальтові волокна по об'єму кожної з заготовок на кожний з шарів композиту за рахунок силікатної матриці рідкого скла, пресуванням брикету з титанової губки з наповнювачами з навантаженням 8 тонн та спіканням готового матеріалу у вакуумі при температурі 1100 °С.

Контроль пористості матеріалу на основі титанової губки здійснювався двома методами:

1. за рахунок додавання солі  $\text{NaCl}$  перед пресуванням та її вимиванням перед спіканням заготовки у вакуумі;
2. за рахунок управління пористістю шляхом стискання в ході пресування у відповідності з розробленою раніше математичною моделлю.

Так як основою для розроблюваної низки композитних матеріалів має стати склад формувальних сумішей для піщано-глинистих форм, варто розглянути процес їх формування саме на основі рідкого скла, що ми використовуємо у якості матриці. Формувальні суміші з рідким склом, що застигають під дією діоксиду вуглецю, двокальцієвого силікату або порошкоподібною ферросиліцію, не мають достатньої міцності в сирому стані. Виняток становлять суміші з добавками глинистих пластифікаторів та зв'язуючих. Висока плинність суміші (відсутність міцності по-сирому), однак, не вважається недоліком, тому що такі суміші вимагають мінімальної витрати енергії при ущільненні форм.

У порівнянні з зв'язуючим, що твердіє в результаті окислення або полімеризації (масла, смоли), суміші з рідким склом мають більш низьку міцність після затвердіння. Це, однак, при продуманій технології виготовлення форм не завжди є перешкодою.

Відповідно, розглянуто можливість виготовлення композитних матеріалів двох типів. Перший тип має металічну матрицю у вигляді пресованого та спеченого брикету титанової губки з наповнювачами.

Другий тип є повністю керамічним і хоча не потребує пресування, має ряд проблем з механічною стійкістю.

Випробувано можливість спікання титанового брикету в вакуумі та в муфельній печі за доступу повітря. Спікання в муфельній печі спає поверхню металу з наповнювачем в кожному шарі, при цьому відбувається окиснення металічної матриці з формуванням оксиду титану, що має гірші механічні, але дещо кращі термоізоляційні властивості. У випадку використання поверхневої замазки з рідкого скла та жаростійких компонентів, процеси окиснення зводяться до мінімуму, що робить технологію досить перспективною з точки зору витрат енергії.

Випробувано можливість укріплення керамічного композиту органічними пластифікаторами. Найбільшу ефективність демонструє вермикуліт. Торф утворює з рідким склом та наповнювачами складний полімер-керамічний матеріал з складно прогнозованими властивостями. Склад суміші та технологія виготовлення потребує доопрацювання.

Таким чином було досліджено та апробовано нові методи виробництва порошкових композитів, що полягають у вологому замішуванні суміші наповнювача з титановою губкою або жаростійкою основою, аналогічною за складом до піщано-глинистих форм в рідкій керамічній матриці для оптимізації трибологічних характеристик матеріалу та підвищення його термічної стійкості. Єдиною особливістю процесу виробництва стала необхідність пресування заготовки не пізніше 3 годин від замішування.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СКОРОСТНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛА В ПРОЦЕССАХ СОЕДИНЕНИЯ И РАЗДЕЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ

Ю. С. Воробьев, Н. Ю. Овчарова

Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, г. Харьков

Современные технологии обработки элементов конструкции с помощью импульсных воздействий, предполагают скоростное деформирование материала. Деформации при таких процессах не могут считаться малыми. Следует учитывать, что в данном случае в процессе деформирования меняются механические свойства материалов.

Анализ скоростного деформирования элементов конструкции проводится на основе трехмерных моделей. Моделирование процессов проводится с использованием динамического варианта теории пластичности. При этом учитываются динамические свойства материалов, которые представляют зависимости между интенсивностями напряжений и интенсивностями деформаций и их скоростей. Характеристики динамических свойств материалов определяются с помощью плоских и цилиндрических образцов на специальных установках. Скорости деформации в течение всего процесса могут быть переменными. Учитываются конечные деформации. В результате исследуемый процесс является существенно нелинейным. Задача решается с помощью метода конечных элементов, который учитывает все особенности протекающих процессов. В докладе обсуждаются особенности реализации численных исследований.

В качестве примера рассматривается процесс соединения двух цилиндрических слоев с использованием импульсного источника энергии. Таким источником энергии является листовой заряд взрывчатого вещества. Благодаря энергии взрывчатого вещества метаемый слой движется со скоростью ( $3 \cdot 10^3$  м/с) и соединяется с другим слоем с помощью сварки взрывом. Показано распределение максимальных и остаточных деформаций в зоне соединения слоев. Показана нелинейная зависимость деформаций и напряжений от величины импульсной нагрузки. Такие процессы использовались для соединения элементов теплообменных аппаратов и присоединения отводов к газопроводам. Проводятся сопоставления численных результатов с экспериментальными. Экспериментальные результаты получены с помощью тензометрической техники.

С помощью импульсных источников энергии может быть проведено эффективное разделение элементов конструкции. Для осуществления этого процесса наносится концентратор по линии предполагаемого разделения. В ряде случаев для эффективной реализации процесса наносится система концентраторов. Затем для разделения используются листовой или шнуровой заряд взрывчатого вещества. Максимальные напряжения, вызывающие разделение элементов, обычно возникают примерно через 5 мкс после воздействия импульса нагрузки. Разделение элементов проходит вдоль концентратора. Контролируемое разделение элементов конструкций используется в машиностроении в строительной индустрии, а также в ракетной и космической технике. Численные исследования позволяют сократить объем экспериментальных исследований.

Приводятся конкретные примеры использования технологий разделения и соединения элементов конструкций, в основе которых лежат процессы скоростного деформирования элементов конструкций. Показано резкое отличие результатов численных исследований с использованием линейных и нелинейных моделей.

Развитие моделей скоростного деформирования материала, методов численного анализа решения данных задач позволяет решить ряд прикладных проблем.

# РЕОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СВС-ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ Ti-Al-C

Л.П. Шведов

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев

МАХ - фазы - это материалы со свойствами, сочетающимися в себе как преимущества металлов, так и керамик и их получение является очень перспективным направлением в современном материаловедении. Одним из относительно дешёвых и технологичных способов получения таких материалов является самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС). Кроме того, ожидается, что использование СВС для получения МАХ - фаз позволит получить компактный материал с высокодисперсной структурой, размер зёрен которой будет значительно меньше, чем размер зёрен материала получаемого иными способами. Возможность получения МАХ - фаз в системе Ti-Al-C с помощью СВС - процесса интенсивно исследуется последние годы экспериментально. В связи с этим возникает необходимость разработки и развития теоретических подходов для лучшего понимания, описания и возможности сравнения с экспериментом.

Для математического описания процесса СВС-синтеза определяется система уравнений, учитывающая с одной стороны термодинамические, а с другой - реологические параметры продукта синтеза. Предполагая, что процесс происходит в условиях одностороннего равномерного сжатия в пресс-форме, получены следующие одномерные уравнения для описания порошковой смеси и продуктов синтеза: уравнение непрерывности и уравнение движения с соответствующими реологическими соотношениями для учёта вязкости. В модели предполагается равномерное распределение плотности в пространстве в каждый момент времени. Также учитывается зависимость сдвиговой и объёмной вязкости от плотности смеси и температуры, которые изменяются со временем. Напряжение на верхней границе смеси приравнивается по абсолютному значению к усилию прессования. В модели пренебрегаем трением на стенках пресс-формы, доуплотнением смеси при попадании в калибр, возможным градиентом температуры и теплоотводом из пресс-формы в калибр. Всё это позволяет нам получить дифференциальные уравнения на зависимость плотности конечного продукта от времени и скорости движения как пуансона пресс-формы, так нижней границы экструдированного материала, в случае экструзии.

Рассматривается как изотермический процесс, в первом приближении, так и неизотермический, когда учитывается теплоотвод и остывание образца. В свою очередь для каждого из этих случаев рассматривается две возможности: первая - есть только допрессование в пресс-форме после прохождения реакции, вторая - под действием внешнего давления происходит процесс экструзии через калибр соединённый с пресс-формой. Для неизотермического процесса дополнительно имеем уравнение на зависимость температуры от времени. Начальная относительная плотность (отношение плотности конечного продукта к плотности образца) полагается равной  $\rho=0.6$ .

В самом простом случае мы рассматриваем изотермический процесс в отсутствие экструзии, то есть происходит только компактирование материала после окончания СВС - реакции, в то время как образец сохраняет ещё пластические свойства. При этом у нас остаётся только два уравнения на зависимость относительной плотности от времени и скорость движения плунжера пресса. Результаты расчёта показывают, что при давлениях порядка  $10^7$  Па в нашей системе, относительная плотность в течение порядка нескольких секунд стремится к 1, после чего движение останавливается. В случае, когда есть экструзия, добавляется ещё уравнение описывающее движение нижней границы экструдированного материала и картина несколько меняется. В первые секунды из калибра происходит выдавливание неуплотнённого материала, в то время как в пресс - форме материал доуплотняется до относительной плотности порядка 1, после чего происходит равномерное выдавливание, пока есть материал в пресс - форме. Скорость выдавливания определяется отношением диаметров пресс - формы и калибра. Скорость доуплотнения слабо зависит от того есть экструзия или нет.

Более реалистичной есть неизотермическая модель, когда учитывается остывание образца за счёт теплопотерь на стенках пресс - формы. Считаем, что СВС - реакция окончена и нет дополнительного тепловыделения в образце. Так же в случае экструзии, пренебрегаем теплопотерями в калибре как в связи с его относительной малостью, так и в связи с тем, что основная компактификация и формирование зёрновой структуры происходит в пресс - форме. В отличие от изотермического процесса поведение материала зависит от соотношения скорости остывания к скорости компактификации или выдавливания. Если характерное время остывания велико и материал сохраняет свои пластические свойства в процессе экструзии или допрессования, то результаты расчёта совпадают с результатами изотермической модели. В противоположном случае получается, что материал остывает, теряет свои пластические свойства и процесс компактификации и выдавливания в калибр под действием внешнего усилия останавливается.

# ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ ОПИС ХІМІЧНИХ РЕАКЦІЙ В СИСТЕМІ ТИТАН-АЛЮМІНІЙ-ГЕКСАМЕТИЛЕНТЕТРАМІН В УМОВАХ САМОПОШИРЮВАНОГО ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗУ

Г.М. Ющишина

Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Николаїв

Отримання нових матеріалів, що за своїми властивостями займають проміжний стан між металами та керамікою, - МАХ-фаз - є одним з перспективних напрямів сучасного матеріалознавства. Основною тенденцією останніх досліджень в цьому напрямку є розв'язок проблеми здешевлення цільового продукту. Для її вирішення пропонується два підходи: по-перше, розробка нових способів синтезу, що значно скорочують час проведення процесу, по-друге, використання більш дешевих матеріалів у вихідній шихті. В наших попередніх дослідженнях було продемонстровано принципову можливість отримання МАХ-фаз різного складу під час реалізації процесу самопоширюваного високотемпературного синтезу в системі Ti-Al-C з використанням різних вуглецевмісних прекурсорів (гексаметилентетраамін, фторопласт, аморфний вуглець, отриманий шляхом електророзрядної деструкції рідких вуглеводнів). При цьому отриманий матеріал разом із тернарними МАХ-фазами ( $Ti_3AlC_2$  та  $Ti_2AlC$ ) містив і бінарні сполуки (карбіди алюмінія і титану), а також вільний вуглець та титан.

В цьому зв'язку виникає необхідність щодо проведення термодинамічних досліджень можливих реакцій в подібних системах зі складним органічним прекурсором.

Метою даної роботи було термодинамічне обґрунтування хімічних реакцій в системі титан-алюміній-гексаметилентетраамін, що перебігають в умовах самопоширюваного високотемпературного синтезу (СВС).

До складу можливих реакцій було віднесено реакції утворення МАХ-фаз, карбідів титану та алюмінію, а також, враховуючи, що синтез здійснювали на повітрі, реакції взаємодії компонентів шихти з киснем та азотом повітря. Є дані про утворення алюмінідів титану в цих умовах (найбільш стійкий в даному діапазоні температур TiAl). Наявність в продуктах реакції вільного титану та вуглецю та високі температури процесу дозволяє припустити можливість алюмотермічного відновлення титан діоксиду та карбон діоксиду. Загальна кількість можливих реакцій, термодинамічні параметри яких було обчислено, склала чотирнадцять.

Добре відомо, що основною термодинамічною величиною, що вказує на мимовільність перебігу хімічного процесу є вільна енергія Гіббса. Використовуючи загальноприйняті формули для обчислення енергії Гіббса реакції, ентальпії, ентропії, залежності цих величин від температури було обчислено значення цих параметрів для 14 можливих хімічних процесів за умови стандартної температури (298 K), температурах ініціювання СВС процесу (1227 K) та горіння (1814 K) в системі, що розглядається.

Показано, що утворення МАХ-фази  $Ti_3AlC_2$  з термодинамічної точки зору є більш вірогідним ( $\Delta G_{298} = -2466,38$  кДж) у порівнянні з одержанням МАХ-фази  $Ti_2AlC$  ( $\Delta G_{298} = -45,30$  кДж). Підвищення температури до 1814 K практично не впливає на значення енергії Гіббса реакції утворення  $Ti_3AlC_2$ , тоді як для  $Ti_2AlC$  значення цього параметру змінює свій знак, тобто процес утворення цієї фази стає термодинамічно неможливим. Значення вільної енергії Гіббса для реакцій утворення карбідів алюмінію та титану приблизно однакові ( $\Delta G_{298}(Al_4C_3) = -198,85$  кДж та  $\Delta G_{298}(TiC) = -205,53$  кДж) та незначно зменшуються за умови підвищення температури, залишаючись від'ємними. Взаємодія компонентів шихти зі складовими частинами повітря включає в собі 1) реакцію повного згорання гексаметилентетрааміну, розташованого на поверхні зразка ( $\Delta G_{298} = -3976,80$  кДж); 2) реакцію неповного згорання гексаметилентетрааміну з утворення вільного вуглецю ( $\Delta G_{298} = -2071,60$  кДж); 3) горіння поверхневого алюмінію ( $\Delta G_{298} = -3173,20$  кДж) та титану ( $\Delta G_{298} = -883,26$  кДж); 4) утворення нітридів алюмінію ( $\Delta G_{298} = -571,57$  кДж) та титану ( $\Delta G_{298} = -586,25$  кДж).

Таким чином, проведений термодинамічний аналіз даного процесу доводить той факт, що основним типом МАХ-фази, що утворюється за даних умов синтезу є  $Ti_3AlC_2$ .

Високі від'ємні значення енергії Гіббса реакцій взаємодії компонентів шихти з киснем та азотом повітря призводять до нераціональної витрати цих речовин, тому процес необхідно здійснювати в умовах інертного або відновлюючого середовища (аргон, водень, негорючі органічні речовини).

# ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ПРЕКУРСОРОВ НА САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩИЙСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СИНТЕЗ В ПОРОШКОВЫХ СИСТЕМАХ Ti-Al-C

Д. И. Челпанов, А. Н. Ющишина, Н. И. Кускова  
Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев

Многолетние усилия по развитию методов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) разнообразных керамических и металлокерамических пеноматериалов, сверхтвердых материалов, композиционных материалов и полимер-керамики, а также различных наноматериалов и порошков, содержащих наноразмерные кристаллиты, позволяют процессам СВС до сих пор занимать лидирующие позиции среди многочисленных аналогов.

В современном материаловедении особое внимание привлекает новый вид тугоплавких тройных соединений гексагональной плотной упаковки составом переходной металл + элемент подгруппы «А» + углерод или азот – МАХ-фазы, сочетающих свойства металлов и керамики.

Альтернативой распространенного метода горячего изостатического прессования является СВС, который позволяет значительно снизить энергозатраты и упростить процесс получения материалов на основе МАХ-фаз.

Целью данной работы ставилось получение композитов на основе МАХ-фаз методом СВС в порошковых системах титана (100 мкм), алюминия (50 мкм) и различных углеродсодержащих прекурсоров (гексаметилентетрамин  $C_6H_{12}N_4$  (техн.) ГОСТ 1381-73, политетрафторэтилен  $-(C_2F_4)_n-$  ГОСТ 10007-80 (50 мкм) и аморфный углерод, синтезированный электроразрядной обработкой газообразных углеводородов).

Порошковые компоненты смешивались в стехиометрическом соотношении для успешного синтеза  $Ti_3AlC_2$  и компактировались в политетрафторэтиленовых трубках или прессовались в специальной пресс-форме в цилиндрические брикеты. Процесс СВС инициировался нагревом вольфрамовой проволоки.

Процесс горения изучался путем измерения температуры с использованием вольфрам-ренийевых термопар (ТВР) А1, аналогового прецизионного усилителя AD627 и осциллографа Wittig Technologies W2012, а также видеорегистрации процесса с использованием цифрового фотоаппарата Sony Cyber-shot DSC-H7. По расчетным формулам определялись основные параметры, характеризующие процесс СВС, – ширина зоны прогрева  $x_m$ , время реакции в волне  $t_p$ , время нагревания вещества в волне  $t_m$  и скорость нагревания вещества в волне  $W$ . Для построения температурного профиля рассчитывались коэффициент теплопроводности порошковой смеси  $\lambda_{см}$  и тепловой поток  $q$ .

Проводился рентгенофазовый анализ (РФА) синтезированных металлоуглеродных материалов в излучении  $CuK\alpha$  на дифрактометрах ДРОН-3 и Bruker D8 DISCOVER, Rigaku Ultima IV (Япония). Обработку результатов РФА осуществляли с использованием программного обеспечения Bruker: EVA. Для приближенной оценки среднего размера кристаллитов применялся метод Уильямсона-Холла.

Порошковая смесь Ti-Al- $C_6H_{12}N_4$  требовала длительного инициирования, за которым следовали сложные многоступенчатые реакции, сопровождаемые горением  $C_6H_{12}N_4$  и алюминия, при которых СВС начинался только после определенного периода времени. Горение порошковой смеси Ti-Al- $C_6H_{12}N_4$  происходило при температуре, близкой к температуре плавления титана. Для уменьшения пористости материала применялось дополнительное сжатие образца после прохождения волны горения в момент начала остывания синтезированного продукта. Для очистки СВС-продукта от карбида алюминия и свободного титана продукт обрабатывался 10% серной кислотой в течение двух часов при температуре 100°C.

СВС в порошковой смеси Ti+Al+ $-(C_2F_4)_n-$  после инициирования начинался с плавления алюминия с последующей реакцией между алюминием и  $-(C_2F_4)_n-$  с образованием фторида алюминия и синтезом свободного углерода. После плавления титана под воздействием высоких температур экзотермической реакции (1940 К) образовывался расплав, из которого выделялись карбид титана и МАХ-фаза  $Ti_2AlC$ .

СВС в порошковой смеси Ti+Al+C показал возможность синтеза смеси МАХ-фаз  $Ti_2AlC$ ,  $Ti_3AlC_2$  и карбида титана в различном соотношении в зависимости от методики приготовления экспериментальных образцов: в политетрафторэтиленовом контейнере образовывалась смесь двух МАХ-фаз и карбида титана, тогда как в брикетированном образце фаза  $Ti_3AlC_2$  не синтезировалась, а материал содержал непрореагировавший титан.

По результатам РФА определялся фазовый состав синтезированного композитного материала для выбранных порошковых смесей при различных условиях проведения синтеза и последующей химической очистки, а также параметры решетки и средний размер кристаллитов.

Исследованы процессы горения и синтеза в выбранных порошковых смесях при использовании различных углеродсодержащих прекурсоров (гексаметилентетрамин, политетрафторэтилен, аморфный углерод). Показано, что характер протекания и основные параметры процессов СВС определяются типом выбранного углеродного прекурсора и методикой приготовления исходных образцов.

Использование выбранных в работе прекурсоров позволяет получать в процессах самораспространяющегося высокотемпературного синтеза композитные материалы, содержащие карбид титана и МАХ-фазы  $Ti_2AlC$  и  $Ti_3AlC_2$ .

# УТИЛИЗАЦИЯ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ МЕТОДАМИ РАЗРЯДНОИМПУЛЬСНОЙ ДЕСТРУКЦИИ И САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА

Н.И. Кускова, А.Н. Корзинова, С.А. Хайнацкий, А.Н. Ющишина, Д.И. Челпанов  
Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев

Отличительной особенностью утилизации отходов органических растворителей, лакокрасочных материалов (ЛКМ) и галогенсодержащих органических веществ является то, что различные виды углеродсодержащих отходов перерабатываются в соответствии со специально разработанными технологиями при соблюдении специфических условий. Указанные технологии утилизации не являются экологически чистыми, осуществляются не полностью и сопровождаются образованием высокотоксичных продуктов, которые представляют серьезную угрозу для окружающей среды. Поэтому проблема создания современных экологически безопасных методов и способов утилизации отходов органических растворителей и ЛКМ остается актуальной. Также стоит отметить, что эти продукты могут служить исходным сырьем для получения ценных углеродных наноматериалов (УНМ).

Разрядноимпульсный метод деструкции углеродсодержащих жидкостей может обеспечить не только утилизацию вредных веществ, но и синтез углеродных наноматериалов, ввиду высокого содержания углерода в отходах. Для полной и безопасной утилизации растворителей и ЛКМ этот метод был существенно усовершенствован, что позволило перерабатывать выделяющийся при разложении обрабатываемых жидкостей газ. В плазме электрического разряда молекулы газообразных углеводородов распадаются на углерод и водород. При последовательном включении в схему обработки жидких отходов в качестве второй стадии переработки газов, выброс в атмосферу вредных веществ уменьшается до приемлемых уровней.

Метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), благодаря своим технологическим преимуществам, позволяет успешно перерабатывать отходы твёрдых порошкообразных галогенсодержащих веществ, несмотря на высокую устойчивость галогензамещенных ароматических колец к окислительной деградации.

Целью работы было развитие разрядноимпульсных и СВС методов переработки промышленных углеродсодержащих отходов (органических растворителей, галогенсодержащих органических веществ, ЛКМ), включающих синтез углеродных наноматериалов.

Для исследования двухстадийных процессов синтеза УНМ применялся экспериментальный стенд проточной электроразрядной обработки (ЭРО) жидких органических отходов и обработки смеси выделившихся углеводородных газов импульсным разрядом микросекундной длительности и каталитическим пиролизом.

Рабочая жидкость подавалась в камеру для последующей ЭРО, часть парогазовых смесей конденсировалась на поверхности рабочей жидкости и поступала на вторичную обработку. Остальной газ подавался в дополнительную камеру для обработки искровым разрядом. Обработанный газ поступал в фильтроразделительное устройство, а далее – в устройство для каталитического пиролиза.

При реализации СВС подготовленная из порошковых реагентов, в качестве которых может применяться твердая фаза после ЭРО, шихта располагалась в специальной ячейке, после чего производился кратковременный локальный нагрев торца порошковой экзотермической смеси до температуры, соответствующей инициации самораспространяющейся реакции.

Показано, что эффективность двухстадийной разрядноимпульсной переработки отходов органических растворителей на УНМ и водород возрастает от 3 до 10 раз, по сравнению с одностадийной. Определены эффективные режимы переработки отходов в проточном режиме с достижением полного диспергирования эмалевых пленок.

Показано, что для полной утилизации отходов органических растворителей, лакокрасочных материалов и полихлорзамещенных бифенилов необходима их двухстадийная ЭРО. Подобным образом могут быть переработаны любые жидкие или твёрдые растворимые в органических жидкостях углеродсодержащие отходы.

Полученный в результате двухстадийной ЭРО выходной продукт включает в себя углеродсодержащие аморфные наноматериалы.

Исследованы СВС-процессы переработки отходов твёрдых порошкообразных галогенсодержащих веществ - политетрафторэтилена и гексахлорбензола. Для выбранных реагентов реализации СВС рассчитаны термодинамические характеристики. Анализ результатов показал, что внутренней энергии рассмотренных экзотермических систем достаточно для синтеза углеродсодержащих порошковых композитов.

Рентгенофазовый анализ образцов СВС-продукта выбранных порошковых систем показал, что исходные порошки вступили в СВС-реакцию с образованием углеродных наноматериалов.

Показана возможность применения экологически чистых СВС-процессов утилизации твёрдых галогенсодержащих отходов, происходящих одновременно с синтезом углеродных наноматериалов.

# РОЗРЯДНО-ІМПУЛЬСНА ДЕЗІНТЕГРАЦІЯ ЯК СПОСІБ ОТРИМАННЯ МІКРОДИСПЕРСНОЇ СКЛЯНОЇ КОМПОНЕНТИ НОВІТНІХ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

П.Л. Цолін, І.М. Старков, О.М. Рачков  
Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв

Розробка ефективних, екологічно безпечних, вогне- і вологостійких, легких і з тривалим терміном експлуатації теплоізоляційних матеріалів, з огляду на існуючу гостру проблему енергозбереження, є актуальною науково-технічною задачею.

До безпечної теплоізоляції відносяться натуральні (мінеральні) та піноскляні композиційні матеріали, що характеризуються високою вологостійкістю, негорючі, морозостійкі, виготовлені з екологічно чистої сировини.

Технологічний процес виготовлення піноскла заснований на вспінненні рідко-скляної суміші, до складу якої входять вода, скляний матеріал, піноутворюючі добавки та інше.

Також від фракційного складу наповнювачів, дисперсності твердої фази безпосередньо залежать характеристики щільності, теплопровідності, міцності отриманого теплоізоляційного матеріалу (піноскляного блоку або щелебю).

Оскільки значення фракційного складу скляної компоненти грає важливу роль у виробництві піноскляних виробів, то пошук методів, які дозволяють її подрібнювати до мікронних значень залишається актуальним завданням.

Розглянувши існуючі методи подрібнення, з усіх методів отримання тонкодисперсних порошоків найбільш перспективним для подрібнення скла представляється метод, заснований на електрогідралічному ефекті. Даний метод має набагато більший потенціал, ніж традиційне подрібнення скляного матеріалу, яке здійснюється в кульових або стрижневих млинах. Електророзрядне подрібнення характеризується безліччю досить складних явищ, починаючи від пробою рідини і закінчуючи руйнуванням матеріалу і дозволяє найбільш раціонально використовувати електроенергію і досягати високої повноти руйнування матеріалів при найменших витратах електроенергії.

Енергія, що виділяється в каналі розряду, в основному витрачається на роботу, що здійснюється каналом при розширенні (до 50%) і нагрів речовини в каналі розряду. У свою чергу, робота каналу розряду перетворюється в енергію стиснення (до 20%) і енергію пульсації газового пузиря (до 30%). Змінити енергію, що вводиться в канал розряду, енергію хвиль стискування і газового пузиря можна зміною режимів електричного розряду. У момент розряду при достатній амплітуді хвиль тиску відбувається роздавлювання або розрив матеріалу в зоні, прилеглої до каналу розряду, а також утворення і розвиток проникаючих тріщин. Хвиля тиску при досягненні відкритої поверхні частково відбивається, утворюючи в матеріалі хвилю розтягування, яка є причиною утворення відкольних тріщин, спучування поверхні і руйнування.

Основним чинником руйнування скла є тиск хвилі стиснення, що генерується внаслідок виділення запасеної енергії в каналі розряду. Ефективність руйнування залежить від параметрів лабораторного обладнання і режимів електричного розряду. Задавалися початковими параметрами електроустановки розрядноімпульсної дезінтеграції для розрахунків полів тиску та хвиль стиснення на різних відстанях від каналу розряду.

Силове поле електричного розряду в реакторі має забезпечувати роботу деформаційних сил, що мають місце при дії хвиль стиснення, тобто тиск поблизу зони розряду має бути не менше межі міцності основи на стиск.

Методика експерименту полягала в використанні потужних імпульсних розрядів в міжелектродному проміжку, які дозволяють забезпечити необхідні умови, достатні для руйнування скла.

Оскільки процес подрібнення здійснюється в рідкому середовищі, в пори подрібненого матеріалу проникає рідина. Це знижує його міцність. При деформації твердого тіла в його поверхневому шарі розвиваються клиновидні мікротріщини, здатні замикатися після зняття навантаження. Адсорбційні шари, мігруючи по поверхні, досягають їх гирла і перешкоджають змиканню. Використання поверхнево-активних речовин, що адсорбуються оброблюваним матеріалом із зовнішнього середовища за відсутності хімічної взаємодії може значно знижувати межу пружності, міцність і твердість, полегшувати руйнування крихких тіл і збільшувати пластичність матеріалів.

Отримано результати попередніх обробок для оцінки можливостей (в першу чергу, по дисперсності) розрядно-імпульсної дезінтеграції скла, проведених для заданих параметрів ланцюга в камері, що забезпечує необхідний максимальний радіус руйнування в чистій воді і в воді з додаванням поверхнево-активних речовин.

Аналіз гранулометричного складу дисперсії показав можливість дезінтеграції скла до мікронної фракції:

- у воді: 5 мкм – 20 %, 300 мкм – 40 %, 600 мкм – 40 %;
- у воді з додаванням ПАВ: від 4 мкм до 6 мкм – 30 %, від 14 мкм до 20 мкм – 50 %, від 500 мкм до 700 мкм – 10 %.

## ПОЛУЧЕНИЕ МЕТАЛЛ–ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ Ti–Al<sub>3</sub>Ti

А.В. Синчук., В.Н.Цуркин, А.В.Иванов  
Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев

Металл-интерметаллидные слоистые композиты (МИСК) – это новые материалы с градиентной структурой, которые имеют высокие показатели жаропрочности и трещиностойкости. Более того, МИСК структурной системы Ti/Al<sub>3</sub>Ti, благодаря сочетанию малого удельного веса и высокой трещиностойкости (50 МПа·м<sup>1/2</sup>), пригодны для изготовления элементов противоударной защиты летательных аппаратов или бронжилетов. Собственного производства МИСК в Украине нет, а существующие за рубежом способы – многостадийны (многократная прокатка пакета из слоев разнородных металлов с последующим отжигом, сварка взрывом с последующим отжигом) либо длительны (реакционное спекание пакета). Твердофазный синтез интерметаллидов, обеспечивающий формирование конечной структуры МИСК, является медленнопротекающим гетерогенным химическим процессом и в зависимости от размеров исходного пакета может занимать десятки часов.

*Цель работы* – ускорить протекание твердофазного синтеза интерметаллидов путем пропускания через слоистый пакет Al–Ti электрического тока.

МИСК получали путем реакционного спекания под давлением порядка 25 МПа уложенных поочередно в пакеты фольг Ti (BT00) и Al (A5E) толщиной по 50 мкм. При 630 °С осуществлялась изотермическая выдержка, в течение которой через пакет, толщина которого составляла около 1 мм, пропускался электрический ток, генерируемый двумя разными источниками. Низковольтный источник импульсов позволял пропускать через пакет импульсы тока различной формы, как биполярные, так и монополярные (были использованы частоты 40, 800 и 1600 Гц). В качестве источника постоянного тока был применен сварочный трансформатор с выпрямителем, а сила постоянного тока варьировалась в пределах I=70–140 А.

Установлено, что по сравнению с обычным спеканием при протекании импульсного электрического тока через пакет скорость образования интерметаллидов увеличивается в 1,5–2 раза в зависимости от схемы пропускания, формы, энергоемкости и количества импульсов. При продолжительности спекания менее 3 часов в системе преобладают диффузионные процессы с увеличением толщины диффузионного пограничного слоя. Далее эволюция фазового состава и структуры слоистой системы такова, что вначале вдоль границы раздела реагентов появляются интерметаллидные прослойки толщиной 2–4 мкм, затем – более крупные компактные зерна интерметаллидной фазы, которые растут до тех пор, пока не образуют сплошной слой, потом происходит развитие этого слоя в направлении, перпендикулярном границе. Методом микрорентгеноспектрального анализа показано, что вне зависимости от действия тока единственным интерметаллидом, образующимся в системе, является триалюминид Al<sub>3</sub>Ti.

В силу того, что триалюминид Al<sub>3</sub>Ti имеет иную, чем исходные металлы, решетку, начало химического превращения сопровождается образованием пор, а затем и явных микротрещин, увеличивающих объем фольг Al. К окончанию процесса спекания, который при пропускании импульсов тока длится не более 5 часов, а в отсутствие тока – 7–8 часов, несплошности под действием давления «залечиваются» таким образом, что конечная структура МИСК представляет собой чередование остаточных слоев Ti со средней толщиной 30 мкм и слоев триалюминид Al<sub>3</sub>Ti с микротвердостью 4,5–7 ГПа. Анализируя эффективность влияния импульсов на процесс спекания, можно выстроить такую последовательность (по убыванию): пропускание монополярных импульсов тока с подключением фольг Al к «+» контакту, а фольг Ti – к «-» контакту → пропускание через пакет биполярных импульсов тока → пропускание монополярных импульсов тока с подключением фольг Al к «-» контакту, а фольг Ti – к «+» контакту.

Протекание тока улучшает физический контакт между сопрягаемыми поверхностями фольг. Эксперимент показал, что отдельно взятое прессование пакета при комнатной температуре в течение 10 минут дает осадку только отдельных микровыступов поверхности, не оказывая заметного влияния на общую картину шероховатости фольг. Но если через сжатый пакет даже при комнатной температуре в течение 10 минут пропустить импульсный ток, то поверхностный рельеф фольг заметно изменяется. На поверхности фольг Al становятся заметными следы растекания гребешков шероховатости, а их высота уменьшается до пределов разрешения оптического микроскопа. Поверхность фольг Ti «выглаживается» за счет смятия микровыступов до 0,5 мкм, что свидетельствует о вовлечении в процесс пластического деформирования не только относительно мягкого Al, но и более жесткого Ti.

Дальнейшие исследования показали, что длительность получения МИСК может быть еще больше сокращена, если применять не импульсный, а постоянный ток. Под действием постоянного тока МИСК толщиной 1 мм могут быть получены за 3 часа, если сила тока составляет I=110 А, или за 4 часа при I=70 А, а МИСК толщиной 3 мм могут быть получены за 4–5 часов при I=140 А.

К числу механизмов, обеспечивающих ускорение гетерогенных химических реакций в слоистой системе Al – Ti, можно отнести электропластический эффект, действием которого создается хороший физический контакт поверхностей, Джоулев нагрев межслоевых границ, который интенсифицирует тепловую диффузию, и электромиграцию, которая генерирует дополнительный диффузионный поток в зону реакции.

# ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ РАСПЛАВА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

А. В. Иванов, В.Н. Цуркин

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев

На сегодняшний день обработка расплава электрическим током, пропускаемым непосредственно через расплав, является эффективным инструментом по модифицированию его структуры и улучшению его свойств. Однако единой и стройной теории для системы «Параметры воздействия-Механизмы воздействия-Структура- Свойства» нет и находится она только в процессе своего развития. Данные о механизмах такой обработки можно условно разделить на макро- и микроуровень, т.е. влияние проходящего тока на макрообъем расплава и его влияние от микро- до атомарного уровней, например, кластеры и зародыши кристаллизации. Так сложилось, что теория, которая описывает процессы электротокковой обработки на макроуровне, теоретически и практически изучена достаточно хорошо для того, чтобы системно с ней работать. В противовес этому, данные по воздействию электрического тока на микро- нано- включения отрывочны и сравнительно малочисленны. Поэтому получение таких данных численно или экспериментально является актуальной научно-технической задачей. Так же это позволит оценить и объяснить изменение термодинамической обстановки в расплаве при его кристаллизации и последующем твердении.

Цель работы – путем численного эксперимента установить характер и особенности распределения параметров электрических и тепловых полей, возникающих в расплаве при прохождении электрического тока, на микро- и нановключениях.

Чтобы определить особенности распределения электрического и теплового полей на границе раздела фаз в жидкометаллическом проводнике рассматривали ситуацию, когда модельная частица находится в сфере влияния электрического поля и имеет проводимость  $\sigma_{\text{вкл}}$ , которая больше или меньше проводимости расплава  $\sigma_{\text{распл}}$ . Ограничивались размером частицы порядка  $10^{-8}$  м. Рассматривались круглые и кубические частицы.

Полученные в ходе численного эксперимента результаты позволяют утверждать о существенном влиянии формы и проводимости частицы на характер пространственного и количественного перераспределения параметров электрического и теплового полей в области «частица-расплав». При наличии проводящей частицы наблюдается ослабление электрического поля внутри её объема и скачек потенциала на её границах. Это обуславливает характерное резкое увеличение на 50% тепловой мощности на границах, ориентированных вдоль направления электрического тока, и такое же скачкообразное уменьшение на 60 % на границах, перпендикулярных направлению токовых линий. В связи с тем, что электрическое поле проникает в проводящую частицу, тепловая мощность ( $\approx 25-30$  % для данного случая) выделяется и внутри её объема пропорционально  $\sigma_{\text{вкл}}/\sigma_{\text{распл}}$ . В случае непроводящей частицы, электрическое поле, практически не проникая в нее, обуславливает характерный скачек напряженности и, соответственно, удельной мощности тепловыделения на границах, перпендикулярных линиям тока на 70 % для круглой частицы. Для кубической частицы такой скачек параметров составляет порядка 50 % в области середины грани кубического включения, но значения напряженности и тепловой мощности практически уменьшаются до нуля на границах, расположенных вдоль направления протекания тока.

Разработанный алгоритм решения поставленной задачи может быть использован для анализа подобной электрофизической ситуации в случаях наличия ансамбля частиц различной формы, проводимости и размера.

Основываясь на результатах численного моделирования, была предложена рабочая гипотеза об изменении химического потенциала в области частицы, а, значит, и кристаллизационной способности всего расплава, что в дальнейшем, по мнению авторов, позволит создать научно-обоснованные подходы и методы для решения термодинамической задачи, анализирующей образование и рост кристаллов при протекании через расплав электрического тока.

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПОЛЯ ПРИ КОНДУКЦИОННОЙ ЭЛЕКТРОТОКОВОЙ ОБРАБОТКЕ РАСПЛАВОВ

А. В. Иванов

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев

Обработка жидких и кристаллизующихся металлов и сплавов путем воздействия на них физических полей с целью улучшения показателей структуры и качества литых изделий является перспективным и непрерывно развивающимся направлением в современном литейном производстве. Одним из сравнительно молодых, получивших развитие в последние десятилетия, методом такого воздействия является кондукционная электротоксовая обработка расплавов (КЭТО). Суть данного метода лежит в пропускании электрического тока через объект обработки с помощью электродов, непосредственно контактирующих с расплавом. КЭТО расплавов, как и всякий другой метод обработки физическими полями лежит на стыке различных областей наук. Поэтому создание целостной картины, которая бы реально отображала все этапы воздействия и его результата на обрабатываемый металл, пока еще нет. Решается такая задача дискретно, т.е. выделяются основные факторы воздействия, их взаимозависимости с энергетическим источником, который генерирует в данном случае электрический ток, и, затем, все это связывается уже с литейными и металлургическими процессами, происходящими в расплаве. Как утверждают последние публикации как отечественных, так и зарубежных авторов, основным фактором, определяющим эффективность КЭТО, является электромагнитное поле, которое определяет интенсивность и сферу влияния тех или иных физических процессов, происходящих при пропускании электрического тока через расплав. Поэтому получение новых теоретических и экспериментальных данных, позволяющих обобщить и получить взаимозависимости энергетических, технологических параметров и результата КЭТО являются актуальной научно-практической задачей.

Цель данной работы – методами математического моделирования выявить особенности распределения электромагнитного и гидродинамического полей в расплаве при использовании разных режимов тока (режим постоянного, переменного и импульсного) и различных типов электродных систем.

В ходе выполнения работы были выявлены особенности распределения электромагнитного и гидродинамического полей при КЭТО в различных ее режимах и вариантах технологического исполнения. Установлено, что в зависимости от типа электродной системы и режима электрического тока в объеме расплава генерируются качественно различные распределения электрических, магнитных и гидродинамических полей. Характер этих полей, определяемых как сфера влияния на расплав, определяет варианты воздействия, как на кристаллизационную способность расплава, так и на процессы его твердения. Полученные результаты позволили определить потенциальные возможности по влиянию на конечный результат обработки гидродинамических течений в расплаве, возникающих при КЭТО в разных вариантах электродных систем и режимов тока. Как известно, роль гидродинамических течений в процессах переноса массы в расплаве более существенна, чем диффузионных процессов. Этот факт должен качественно и количественно менять результативность процессов сорбции при кристаллизации, а также активно влиять на гомогенизацию расплава. Доказано, что при различных температурных диапазонах обработки расплава, а именно в жидком состоянии и при образовании и росте кристаллов, характер распределения электрического и магнитного полей существенно различается. Наблюдается концентрация и перераспределение электрического поля в областях с различной проводимостью (жидкий металл – растущие кристаллы), изменяются приоритетные механизмы воздействия, как, например, тепловой и гидродинамический, что необходимо учитывать при проектировании оборудования и технологии КЭТО для конкретных задач литейного производства.

## ОТРИМАННЯ ВИСОКОЯКІСНИХ СПЛАВІВ СИСТЕМИ Al-Sn МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОГІДРОІМПУЛЬСНОЇ ОБРОБКИ РОЗПЛАВУ

В.М. Цуркін, А.В. Іванов, М.К. Гумененко, Ю.Н. Дьогтев, Т.Г. Харитонова  
Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв.

Олово раніше додавали у малих дозах до алюмінію як легуючий елемент для підвищення рідкотекучості, а потім сплави Al-Sn знайшли застосування для виготовлення підшипників ковзання за рахунок того, що точка евтектики такого сплаву складає 228 °С, що практично у 3 рази нижче за точку плавлення Al. При ковзанні Sn підправляється та виконує функції мастила. Сучасні технологічні методи дозволяють отримувати такі сплави при вмісті Sn до 20% але при швидкому охолодженні.

Мета даної роботи – отримання сплавів Al-Sn при вмісті Sn до 45% у вигляді пластин для наступної прокатки з дрібнодисперсними вкрапленнями Sn.

Використовували електрогідроімпульсну обробку (ЕГІО) розплаву, що крім Al містив Sn до 45%, 1% Cu, 1% Si, 0,5% Mn. Шихта такого складу виплавлялась при  $T = 800$  °С, потім при 760 °С додавали Sn у потрібній кількості та проводили ЕГІО за оптимальними параметрами. Заливку проводили у спеціальну металеву форму, яка мала температуру 220 °С. Результати такої обробки аналізували методами металографії, які показали, що Sn у виливках мав глобулярну структурну форму з розміром <1 мкм та був розпоршений рівномірно в об'ємі виливка.

Таким чином експериментально доведена потенційна можливість застосування ЕГІО розплаву Al-Sn для отримання якісних зливків з вмістом Sn до 45%.

## ЗРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ КОНДУКЦІЙНОЇ ЕЛЕКТРОСТРУМОВОЇ ОБРОБКИ РОЗПЛАВУ ДОВЕТЕКТИЧНОГО СИЛУМІНУ

В.М. Цуркін, А.В. Іванов, М.В. Честних, М.К. Гумененко, Ю.Н. Дьогтев, Т.Г. Харитонова  
Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв.

Мета роботи: за однакових технологічних параметрів виплавки доевтектичного силуміну АК7 співставити результати обробки розплаву кондукційним електричним струмом з різними його режимами.

У роботі досліджено вплив постійного пульсуючого струму з частотою 100 Гц та змінного з частотою 50 Гц в діапазоні сили струму до 120 А, а також імпульсного струму, що генерується низьковольтним джерелом з амплітудою струму до 800 А і частотою чередування імпульсів від 20 до 3000 Гц, та високовольтним з амплітудою струму до 15 кА і частотою чередування імпульсів 2; 4; 6 Гц. Для введення у розплав струму використовували систему титанових електродів які, заглиблювались у розплав на глибину 5 мм. Досліджено результати обробки як у печі в рідкому стані сплаву, так і поза пічну при кристалізації та твердненні, також додатково застосовували реагентну обробку лігатурою складу AlTi5B1 та NaCl. Виконано більше 150 плавок. Результат обробки визначали металографічними дослідженнями та аналізуючи механічні властивості виливків.

У роботі показано, що за окремих параметрів обробки найбільш активний вплив на структуру та властивості литого металу відбувається при обробці у печі при температурі плавлення, яка була сталою та дорівнювала 740 °С. Крім того, експериментально доведено, що при окремих визначених енергетичних параметрах навантаження різних режимів струму отримано практично однакові позитивні результати.

# ОТРИМАННЯ ВИСОКОЕНТРОПІЙНИХ $\text{AlCoFeCrVNi}$ ТА $\text{AlCoFeCrVTi}$ СПЛАВІВ МЕХАНІЧНИМ ЛЕГУВАННЯМ ТА СПІКАННЯМ ПІД ТИСКОМ

В.В. Кушнір, В.В.Чернявський, О.І. Юркова

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ

Розвиток будь-якої галузі промисловості тісно пов'язано з розвитком матеріалів, інколи такі матеріали повинні мати багато специфічних властивостей, які в традиційних матеріалах навіть можуть бути суперечливими. Тому весь час відбувається пошук нових матеріалів та технологій їх отримання. Так, тайванським вченим Jien-Wei Yeh на початку ХХІ сторіччя, було відкрито високоентропійні сплави (ВЕС), які виявляють унікальне поєднання фізико-механічних характеристик – високої твердості та міцності при достатній пластичності, підвищеної термостабільності, високої зносостійкості та стійкості до окиснення і корозії. ВЕСи можуть застосовуватися в умовах ударних, динамічних навантажень, тертя, можуть працювати в умовах радіації, при підвищених температурах та інших екстремальних умовах експлуатації. ВЕСи отримують свої властивості завдяки чотирьом ефектам, а саме високій ентропії, сповільненій дифузії, сильному викривленню кристалічної ґратки та коктейльному ефекту. Не дивлячись на відносно велику кількість статей, що вже існують на даний момент, ВЕСи потребують більш детального дослідження впливу складу та методів отримання на їх властивості.

Метою роботи є вивчення можливості синтезу високоентропійних  $\text{AlCoFeCrVNi}$  та  $\text{AlCoFeCrVTi}$  сплавів методом порошкової металургії, а саме механічним легуванням та наступним спіканням під тиском.

В якості, вихідних матеріалів використано порошки Al, Co, Fe, Cr, V, Ni, Ti з чистою понад 99 % та розміром частинок не більше 45 мкм. Процес механічного легування (МЛ) проводили в планетарному млині з розмельними камерами та кулями з твердого сплаву марки ВК6М. В якості середовища для розмелу використовували бензин. Порошки отримані після МЛ були спечені в комірках високого тиску на гідравлічному пресі для синтезу надтвердих матеріалів ДО 0044, з одночасним прикладанням тиску 5 ГПа при температурі 800 °С протягом 30 хв. Дослідження структури, хімічного та фазового складу порошоків після 0,5, 1, 2, 5, 10 год. МЛ та спікання під тиском (СПТ) проводили методами рентгеноструктурного, мікрорентгеноспектрального та мікροструктурного аналізу за допомогою рентгенівського дифрактометра Ultima IV, Rigaku (Японія), в монохроматичному  $\text{Cu K}\alpha$  випромінюванні, та скануючого електронного мікроскопа з мікроаналізатором РЕММА-101А.

Процес сплавування між різними компонентами вихідної порошкової суміші починається з подрібненням кристалітів до нанорозмірів і протікає неоднорідно, що пов'язано з різними температурами плавлення компонентів, а отже із різними енергіями зв'язку між атомами та їх різною дифузійною активністю. Під час проведення МЛ сумішею Al-Co-Fe-Cr-V-Ni та Al-Co-Fe-Cr-V-Ti порошоків формуються ВЕСи, які складаються з твердих розчинів заміщення з ГЦК та ОЦК кристалічною структурою, які знаходяться в наноструктурному стані, також в структурі присутні в невеликій кількості часток карбиду вольфраму WC, які потрапили в сплав за рахунок намелу. Після 10 год. МЛ, ВЕС  $\text{AlCoFeCrVNi}$  складається з ОЦК та ГЦК твердих розчинів, які знаходяться в нанокристалічному стані з розміром кристалітів приблизно 17 нм. При цьому ОЦК твердий розчин є переважаючим, його частка у складі сплаву – 60 %. Параметри кристалічної ґратки ОЦК та ГЦК твердих розчинів складають 0,2898 нм та 0,3544 нм, відповідно. В той же час, після 10 год. МЛ  $\text{AlCoFeCrVTi}$  сплав є однофазним і складається лише з ОЦК твердого розчину, з параметром кристалічної ґратки 0,2904 нм та розміром кристалітів приблизно 15 нм.

Дослідження показали, що спікання під тиском при температурі 800 °С сприяє збереженню наноструктурного стану, не дивлячись на ріст кристалітів приблизно до 50 нм, та збереженню фазового складу  $\text{AlCoFeCrVNi}$  та  $\text{AlCoFeCrVTi}$  сплавів, отриманих під час МЛ. Не дивлячись на це, тверді розчини, що формуються під час проведення МЛ, в обох сплавах є метастабільними та в процесі спікання відбувається їх перетворення на більш стабільні, при цьому кількість ГЦК твердого розчину, порівняно з ОЦК складовою, збільшується. Після проведення СПТ періоди ґраток ГЦК та ОЦК твердих розчинів, для  $\text{AlCoFeCrVNi}$  сплаву становлять 0,2588 нм та 0,2905 нм, відповідно, для  $\text{AlCoFeCrVTi}$  сплаву становлять 0,3584 нм та 0,2896 нм, відповідно.

Компактні  $\text{AlCoFeCrVNi}$  та  $\text{AlCoFeCrVTi}$  сплави після спікання мають високу мікротвердість, а саме,  $\text{HV}=11,7\pm 1$  ГПа та  $\text{HV}=13,7\pm 1,1$  ГПа, що пояснюється твердорозчинним зміцненням зі значним спотворенням кристалічної решітки твердих розчинів, через різницю атомних радіусів елементів заміщення та їх наноструктурним станом. Також завдяки високому тиску у процесі спікання, досягається висока щільність зразків з майже відсутньою пористістю.

**Висновки:** під час механічного легування багатокомпонентних сумішей порошоків синтезовано високоентропійні  $\text{AlCoFeCrVNi}$  та  $\text{AlCoFeCrVTi}$  сплави, які складаються з метастабільних твердих розчинів заміщення з ГЦК + ОЦК та ОЦК структурою, відповідно, та знаходяться в наноструктурному стані. В процесі спікання під тиском 5 ГПа при температурі 800 °С відбувається їх перетворення на більш стабільні, при цьому кількість ГЦК твердого розчину, порівняно з ОЦК складовою, збільшується. Не дивлячись на ріст зерна високий тиск та низка температура процесу спікання сприяють збереженню фазового складу та наноструктурного стану в компактних зразках.

# ОТРИМАННЯ ВИСОКОЕНТРОПІЙНОГО AlNiCoFeCrTi СПЛАВУ МЕТОДОМ МЕХАНІЧНОГО ЛЕГУВАННЯ ТА СПІКАННЯ

С.О. Наконечний, В.В. Чернявський, О.І. Юркова

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського",  
м. Київ

В наш час розвиток технологій призвів до високої необхідності в матеріалах з більш кращими властивостями, що спонукає до створення нових конструкційних та функціональних матеріалів (сплавів, різних композитів та інших матеріалів), які містять більше одного компонента, що й дозволяє отримати необхідні у сучасному світі властивості. Одним з таких нових класів матеріалів є високоентропійні сплави, які представляють собою багатокомпонентні сплави з п'яти і більше компонентів, вміст яких становить від 5 до 35 ат. %. Основний вплив на структуру та властивості високоентропійних сплавів мають чотири основні ефекти: висока ентропія змішування, спотворення кристалічної решітки, уповільнення дифузії та коктейльний ефект. Ці сплави володіють значно кращими експлуатаційними властивостями, ніж інші традиційні сплави з тими ж компонентами, що надає можливість широкого застосування даного класу металевих матеріалів в різних галузях промисловості. Високоентропійні сплави отримують такими методами, що й традиційні: литво, гартування розплаву, осадження плівок з газової фази, механічного легування, а також комбінованими методами.

Мета роботи – оптимізація процесу синтезу високоентропійного сплаву методом порошкової металургії за рахунок комбінації короткочасного механічного легування з наступною термічною обробкою.

В якості вихідного матеріалу для отримання високоентропійного сплаву обрано еквіатомну суміш порошків Al, Ni, Co, Fe, Cr та Ti чистотою 99,5 – 99,9 %. Механічне легування (МЛ) суміші вихідних порошків для отримання високоентропійного AlNiCoFeCrTi сплаву проводили в планетарному млині у середовищі бензину протягом 1, 2 та 3 годин. Гомогенізуючий відпал отриманого після МЛ порошку проводили в вакуумній печі при температурі 1200 °C протягом 1 год. Дослідження структури, фазового та хімічного складу порошку на різних етапах механічного легування та після відпалу виконували методами скануючої електронної мікроскопії, енергодисперсійного рентгенівського (EDX) мікроаналізу та рентгеноструктурного аналізу за допомогою скануючого електронного мікроскопу REMMA-101A та рентгенівського дифрактометра Ultima-IV, ф. Rigaku.

За допомогою скануючої електронної мікроскопії встановлено, що під час розмелювання частинки приймають більш сферичну форму в порівнянні з вихідним станом, при цьому відбувається їх укрупнення та процес сплавоутворення. Частинки мають практично однорідну мікроструктуру, проте присутні невеликі ділянки світлого кольору, що свідчить про неповну розчиненість деяких компонентів. Після відпалу частинки порошкового сплаву вже мають неоднорідну мікроструктуру з декількох фаз.

За результатами рентгеноструктурного аналізу встановлено, що після механічного легування сплав складається з твердого розчину заміщення з ОЦК кристалічною структурою, який є метастабільним. Зі збільшенням часу механічного легування від 1 години до 3-х годин відбувається значне подрібнення і структурний стан ОЦК твердого розчину стає нанокристалічним, а його період решітки  $a$  збільшується, що свідчить про взаємне розчинення вихідних компонентів порошкової суміші.

Після відпалу при температурі 1200 °C структура багатокомпонентного AlNiFeCrCoTi сплаву суттєво змінюється в залежності від часу (1, 2 та 3 години) попереднього механічного легування. Після відпалу порошку, отриманого протягом 1 години механічного легування, структура сплаву складається з ГЦК- та ОЦК-твердого розчину, інтрметалідних фаз: AlTiCo<sub>2</sub> з ГЦК-кристалічною структурою, Cr<sub>0,99</sub>Fe<sub>1,01</sub> ( $\sigma$ -фаза) з тетрагональною структурою, що пов'язано з недостатнім розчиненням певних легуючих елементів та метастабільним станом ОЦК-твердого розчину, а також карбід титану TiC з ГЦК-кристалічною структурою, який міг утворитися за рахунок вуглецю в складі бензину, що використовувався в процесі механічного легування. Після відпалу порошку, отриманого протягом 2-х годин механічного легування, зникає інтрметалідна AlTiCo<sub>2</sub> фаза, в той час як сплав після 3-х годин механічного легування та відпалу зовсім не містить інтрметалідних фаз, а лише два тверді розчини з ГЦК- та ОЦК структурою і карбід титану.

Результати мікротвердих випробувань засвідчили високий рівень мікротвердості порошкового AlNiCoFeCrTi сплаву: мікротвердість HV знаходиться в діапазоні від 7 до 8 ГПа після механічного легування і від 9 до 10 ГПа після відпалу. Високі характеристики міцності забезпечуються ефектами твердорозчинного та наноструктурного зміцнення після механічного легування та твердорозчинного та дисперсійного зміцнення включеннями інтерметалідних та карбідних фаз після відпалу.

Комбінацією методів короткочасного механічного легування обробки суміші порошків системи Al-Co-Ni-Fe-Cr-Ti еквіатомного складу та наступної термічної було синтезовано порошкові високоентропійні сплави на основі твердих розчинів з ОЦК та ГЦК кристалічними структурами, інтерметалідних сполук і карбід титану TiC, які володіють більш високою мікротвердістю порівняно з вихідними компонентами. Високі характеристики міцності забезпечуються ефектами твердорозчинного та наноструктурного зміцнення після механічного легування та твердорозчинного та дисперсійного зміцнення включеннями інтерметалідних та карбідних фаз.

# ОТРИМАННЯ ВИСОКОЕНТРОПІЙНОГО AlNiCoFeCrTi СПЛАВУ В ПРОЦЕСІ МЕХАНІЧНОГО ЛЕГУВАННЯ

О.С. Кременчутський, В.В. Чернявський, О.І. Юркова  
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ

Постійне збільшення фізико-механічних та експлуатаційних вимог до матеріалів призводить до все більш активного дослідження і покращення складу, структури, властивостей та технологій отримання, а також пошуку нових сфер застосування багатокомпонентних металевих високоентропійних сплавів (ВЕС). ВЕС містять у своєму складі не менше 5-ти основних елементів приблизно у еквіатомному співвідношенні. Концентрація кожного з елементів може змінюватися від 5 до 35 ат. %, що залежить від кількості компонентів у сплаві. Проста кристалічна структура ВЕС зумовлює комбінацію унікальних властивостей, таких, як висока міцність, термостабільність, високий опір зношуванню та корозії, радіаційна стійкість, як при кімнатній, так і при високій температурі. ВЕС є перспективними для застосування у будь-яких галузях промисловості, їх використовують у виготовленні ріжучого інструменту, штамсів, фільтрів, форм для литва, покриттів, в якості матеріалу для дифузійних бар'єрних шарів та ін. ВЕС можна отримувати тими ж методами, що і традиційні сплави, а саме литтям, швидким гартуванням розплаву, осадженням плівок, механічним легуванням (МЛ). Збільшення однорідності твердих розчинів під час обробки при кімнатній температурі є основною перевагою методу МЛ над литтям, особливо багатокомпонентних сплавів зі значними відмінностями в температурах плавлення вихідних компонентів. Крім того, МЛ забезпечує формування нанокристалічної структури, що сприятиме поліпшенню механічних властивостей цих сплавів.

Мета роботи – дослідження етапів формування структури, фазового складу та мікротвердості порошкового високоентропійного AlNiCoFeCrTi сплаву під час механічного легування (МЛ).

В якості вихідного матеріалу для виготовлення даного сплаву обрано еквіатомну суміш порошків Al, Ni, Co, Fe, Cr та Ti чистотою 99,5 – 99,9 %. Такий склад матеріалу було обрано зважаючи на умови формування стабільних твердих розчинів. За результатами теоретичних розрахунків ентропії, ентальпії змішування, різниці атомних радіусів, а також концентрації валентних електронів (КВЕ), в результаті формування досліджуваного ВЕС, очікувалося отримати однофазний ОЦК-твердий розчин.

Процес МЛ проводили у високоенергетичному планетарному млині в середовищі бензину в твердосплавних (WC) розмельних камерах, співвідношення маси порошку до розмельних тіл становило 1:10. Форму, розміри, мікроструктуру та хімічний склад частинок сплаву на різних етапах (0,5; 1; 2; 5; 10 год.) МЛ досліджували в скануючому електронному мікроскопі REMMA-101A, оснащеному енергодисперсійним мікроаналізатором. Фазовий склад суміші порошків на різних етапах МЛ визначали на дифрактометрі Ultima-IV, ф. Rigaku в монохроматичному Cu K<sub>α</sub> випромінюванні. Мікротвердість HV порошку визначали на мікротвердомірі ПМТ-3 при навантаженні 0,49 Н за стандартною методикою.

Під час МЛ протягом 0,5 годин, після початкової стадії подрібнення – утворення дрібної фракції порошку за рахунок дроблення крихкої складової з одночасним укрупненням композиційних частинок внаслідок ущільнення матеріалу, починається друга – холодне зварювання, що призводить до коагуляції між частинками. Вже під час 1 години МЛ проходить третя стадія – утворення рівновісних частинок порошку, зменшується їх середній розмір. Під час 2-ої години проходить четверта стадія – коли ділянки зварювання матеріалу орієнтуються не в одному напрямку в границях частинки, а довільним чином. Між 5 та 10 годинами процесу МЛ проходить 5 стадія подрібнення – механічне легування, формується стійкий розподіл частинок за розміром і досягається максимальний рівень їх твердості, значно зростають коефіцієнти дифузії, відбувається остаточне взаємне розчинення компонентів і утворення сплаву.

За результатами EDX аналізу концентраційні відхилення кожного елемента сплаву від номінального складу не перевищують 2,5 ат. %, що вказує на однорідність сплаву по елементному складу.

Після 0,5 год. МЛ в спектрах рентгенівської дифракції спостерігається майже повне розчинення Al, а також менш активне але поступове розчинення Ni, Fe, Cr та Co в порівнянні з вихідною сумішшю. Після 1 год. МЛ суміші порошків в дифракційному спектрі виникає система максимумів, яка співпадає з положенням піків Fe та Cr, яка була ідентифікована як ОЦК-твердий розчин за рядом співвідношення  $\sin^2\theta_0/\sin^2\theta_1$ . Cr та Fe мають необмежену взаємну розчинність і всі інші компоненти суміші розчиняються в їх ОЦК решітці. На малих кутах дифракції спостерігаються нові максимуми, які за своїм положенням відповідають карбиду вольфраму WC, поява якого пояснюється поступовим намелом від стінок розмельної камери при МЛ. Після 5 год. МЛ починає активно розчинятися в сплаві Ti, це пов'язано з великими силами міжатомного зв'язку цього елемента. Поступове та все більш суттєве збільшення ширини максимумів і зменшення їх інтенсивності зі збільшенням часу МЛ свідчить про подрібнення зеренної структури до нанорівня, взаємне розчинення компонентів та збільшення величини мікронапружень в результаті подрібнення кристалітів, а також деформації кристалічної решітки через взаємне розчинення атомів із різними атомними радіусами.

Вимірювання мікротвердості показало поступово рівномірне збільшення мікротвердості від 3 ГПа (на початковій стадії, 0,5 год. МЛ) до 10 ГПа (після 10 годин МЛ), яка є значно вищою у порівнянні з цим параметром для ВЕС отриманих за ливарними технологіями.

# ФОРМИРОВАНИЕ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОЙ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЧУГУННЫХ ОТЛИВОК МОДИФИЦИРОВАНИЕМ РАСПЛАВА В ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЕ

М.А. Фесенко<sup>1</sup>, А.Н. Фесенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского", г. Киев

<sup>2</sup>Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск

К отдельным частям многих деталей, работающих в условиях абразивного и ударно-абразивного износа, иногда предъявляются диаметрально противоположные требования по механическим и эксплуатационным свойствам. Чаще всего такие детали должны иметь твердую износостойкую рабочую поверхность и мягкую ударостойкую сердцевину, матричную основу или элементы монтажного крепления.

Износостойкость рабочей поверхности отливок в достаточной степени могут обеспечить карбиды железа в ледебуритной эвтектике белого чугуна, а повышенную пластичность и ударную вязкость – магниевый высокопрочный чугун с шаровидным графитом феррито-перлитного класса.

Широко известные способы дифференциации структуры и свойств металла в локальных частях (поверхностях) отливок базируются на выплавке белого и серого чугунов в двух отдельных плавильных агрегатах с последующей одновременной или последовательной их заливкой в общую литейную форму. При этом, сфероидизирующее модифицирование магнием и его сплавами для преобразования хрупкого серого чугуна в высокопрочный применяется в исключительно редких случаях.

Отрабатывается принципиально новый способ дифференциации структуры и свойств чугуна в разных частях (поверхностях, слоях) отливки, который базируется на использовании технологии внутриформенной обработки исходного расплава в реакционной камере литниковой системы, известный под названием как «Inmold-process».

Идея предложенного способа заключается в разделении потока расплава исходного серого или белого чугуна во время заливки литейной формы на два, один из которых направляется непосредственно без обработки или после внутриформенного модифицирования в реакционной камере литниковой системы модификатором в одну часть полости формы, в то время как второй поток поступает в другую часть полости формы после модифицирования в реакционной камере другим по функциональному назначению модификатором.

Для подтверждения возможности получения на практике чугунов с дифференцированными структурой и свойствами в нижних и верхних слоях с использованием технологии внутриформенного модифицирования одного расплава базового чугуна, а также исследования влияния основных факторов процесса на структуру и свойства чугуна в таких отливках в качестве объекта исследования выбрали вертикальную плиту размером 240×240×30 мм массой 10,0 кг, с двумя независимыми литниковыми системами. Экспериментальные отливки получали по двум технологическим вариантам.

По первому технологическому варианту исходный белый чугун в начале заливали через первую литниковую систему, подводящую металл непосредственно в полость литейной формы с последующей доливкой через вторую независимую от первой литниковую систему включающую реакционную камеру со сфероидизирующим ферросилицимагниевым модификатором (ФСМг7) с выдержкой между двумя этапами заливки.

По второму технологическому варианту чугун эвтектического состава пропускали через реакционную камеру первой литниковой системы с карбидостабилизирующим никельмагниевым (НМг15) модификатором, а после временной выдержки между двумя этапами заливки через вторую литниковую систему со сфероидизирующим железокремниймагниевым модификатором (ФСМг7).

Экспериментально установили, что дифференциация структуры и свойств чугуна в верхней и нижней части отливки с толщиной стенки 30 мм и массой 10 кг, как в первом, так и во втором случае достигается при 30...120 секундной выдержке между двумя этапами заливки формы.

При этом в структуре чугуна нижней части отливки наблюдается образование дендритов первичного аустенита, между которыми располагалась ледебуритная эвтектика. Структура чугуна верхней части отливки состояла из включений графита правильной шаровидной формы в феррито-перлитной металлической матрице. В результате дифференциации микроструктуры достигается разница твердости между верхней и нижней базовыми плоскостями отливки до 140...150 НВ. При этом твердость верхней матричной поверхности отливки в литом состоянии составляет 220...240 НВ, а нижней рабочей – 380...400 НВ.

Предложенный способ дифференциации структуры и свойств модифицированием исходного расплава чугуна в литейной форме является перспективным для изготовления бронифутеровочных плит мельниц, склизов бункеров, щек и молотков дробилок, прокатных валков, шкивов и других отливок с износостойкой рабочей поверхностью и вязкой ударостойкой матричной основой.

## НАНОСТРУКТУРУВАННЯ КРИСТАЛІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ПЕРЕДРЕКРИСТАЛІЗАЦІЙНОЮ ТЕРМІЧНОЮ ОБРОБКОЮ

О.М. Дубовий, А.А. Карпеченко, М. М. Бобров, Т.О. Макруха  
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Високих показників фізико-механічних властивостей металів і сплавів можна досягти наноструктуруванням. Подрібнення зеренної (субзеренної) структури до нанокристалічного стану здійснюють переважно найпоширенішими методами інтенсивної пластичної деформації. Однак, на сьогодні промислові методи отримання наноструктури по всьому об'єму реального виробу є досить складними і, як наслідок, дорогими з економічної точки зору. У зв'язку з цим розробка нових методів наноструктурування, направлених на поліпшення фізико-механічних властивостей та підвищення показників експлуатаційних характеристик металів і сплавів, є актуальним завданням сучасного матеріалознавства.

Нами розроблено наукові основи формування наноструктурних елементів у деформованих металах і сплавах та напилені покриттях. Сутність розробленого процесу полягає у фіксуванні при нагріванні деформованого металу (навіть кераміки) здрібненої полігонізаційної субструктури (здебільшого нанорозмірної).

Дослідження залежності твердості деформованих технічно чистого заліза, вуглецевої і низьколегованої сталі, бронзи, яка чутлива до розміру елементів субструктури, від часу витримки при температурах, які відповідають температурному порогу рекристалізації, показали, що вона носить екстремальний характер з чітким максимумом і надає можливість підвищення твердості на 15...45% у порівнянні з деформованим станом.

Подальші дослідження щодо впливу вуглецю та хрому на максимальну твердість при короткочасній витримці при температурі рекристалізації (таку термообробку назвали передрекристалізаційною) показали, що збільшення вмісту вуглецю в сталі призводить до зниження приросту твердості. Така залежність пояснюється тим, що зі збільшенням кількості вуглецю в сталі збільшується кількість цементиту, який, маючи високу твердість, гальмує утворення дислокаційних сплетінь в процесі пластичної деформації.

Подібний ефект зменшення приросту твердості після передрекристалізаційної термічної обробки (ПТО) спостерігається і при легуванні сталі хромом. Збільшення концентрації хрому в сталі сприяє утворенню карбідів, які накопичуючись на границях субзерен, блокують дислокації при пластичній деформації на початковій стадії полігонізації. Зменшення щільності дислокацій в процесі пластичної деформації призводить до зменшення центрів зародження нових субзерен, що зумовлює зменшення приросту показників твердості після ПТО.

У результаті ПТО відбувається поліпшення фізико-механічних властивостей пластично деформованих сталей. Механізм такого поліпшення пов'язаний зі здрібненням субструктури, що підтверджується зменшенням розмірів областей когерентного розсіювання.

Ефект підвищення твердості ( $HV_5$ ) викликаній здрібненням субструктури після ПТО проявляється і у напиленіх покриттях. Так, як і у сталях, розмір ОКР електродугових покриттів входить до нанорозмірного діапазону.

Нами визначено оптимальний режим передрекристалізаційної термічної обробки теплозахисного плазмового покриття з  $ZrO_2 - 7\% Y_2O_3$  що забезпечує підвищення твердості на 13% та зниження теплопровідності керамічного шару на 15% у порівнянні зі станом після напилення за рахунок субструктурних змін. Режим полягає у нагріванні до температури  $1300^{\circ}C$ , витримці протягом 15хв та охолодженні на повітрі.

Наноструктурування сталей і напиленіх покриттів із застосуванням ПТО забезпечує суттєве підвищення фізико-механічних властивостей. Але запропонована обробка має недолік – короткочасну витримку при температурі рекристалізації, до 5хв, що обмежує її застосування – тільки для деталей малого розміру. Нами також досліджена можливість термічної стабілізації полігонізаційної субструктури в процесі ПТО застосуванням комбінування динамічної й статичної деформації. Комбіноване деформування 30% + 30% надає можливість збільшити час витримки для технічно чистого заліза та вуглецевих сталей до 60 хв.

Таким чином, встановлено, що передрекристалізаційна термічна обробка надає можливість формувати наноструктурні елементи і цим підвищити фізико-механічні властивості не менше ніж на 15%. Комбіноване деформування (30% динамічного+30% статичного) вуглецевих сталей підвищує термічну стабільність полігонізаційної субструктури більше ніж на порядок.

# УПРАВЛЕНИЕ СТРУКТУРОЙ И СВОЙСТВАМИ ЗАЭВТЕКТИЧЕСКИХ СИЛУМИНОВ СПЕЦИАЛЬНЫМИ СПОСОБАМИ ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВА ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ

А.Г. Пригунова, С.С. Петров, М.В. Кошелев  
Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, г. Киев

Разработан новый способ модифицирования заэвтектических силуминов обработкой расплава однополярным импульсным электрическим током с периодическим изменением частоты. Суть способа заключается в циклическом воздействии на жидкую фазу импульсами электрического тока низких, средних и высоких частот, которые отличаются по величине, способу подачи сигнала и чередуются по определенному временному закону. Периодичность переключения импульсов составляла 0,5...1 с.

Такая обработка микронеоднородного расплава Al – 18,5 % мас. Si приводит к уменьшению удельной теплоты кристаллизации первичных кристаллов кремния более, чем на 50 %, эвтектики на 2...4 %, повышению температуры ликвидус на 20...25 °С и снижению температуры солидус на 6...14 °С по сравнению со сплавом в исходном состоянии. При общем увеличении интервала кристаллизации сплава, обработанного электрическим током, температурный интервал плавления первичных кристаллов кремния сокращается более, чем в три раза.

В результате воздействия электрического тока на расплав, который в последующем охлаждался со скоростью 0,3 °С/с (охлаждение с печью), подавляется выделение первичных кристаллов кремния. По сравнению с исходным образцом сплава, содержащим 18,5 % Si, в котором объемная доля первичного кремния по данным ДТА составляет 9,7%, при обработке расплава по специальным режимам она уменьшается в 3,6 раза (2,7%).

При исследовании методами оптической металлографии сплава Al – 18,5 % мас. Si, обработанного в жидком состоянии электрическим током, первичные кристаллы кремния в микроструктуре не обнаружены, что связано с уменьшением их размера до значений, находящихся за пределами разрешающей способности микроскопа. По результатам электронномикроскопического анализа первичные кристаллы кремния имеют трубчатую форму с максимальной длиной 1...2 мкм, диаметром поперечного сечения около 100 нм и толщиной стенок - около 20 нм.

Одновременно изменяется морфология эвтектических кристаллов кремния, уменьшается их размер. Использование специальных методов электролитического травления позволило установить, что они представляют собой трехплоскостные дендриты, две ветви которого предположительно расположены под углом 120° по отношению друг к другу. Его третья ветвь перпендикулярна плоскости съемки и фактически определяет положение габитусной плоскости кремниевого дендрита. В отличие от кремниевых дендритов, образующихся при высокоскоростном охлаждении ( $V_{охл.} \approx 10^3 \dots 10^4$  °С/с), толщина ветвей дендрита после обработки расплава электрическим током по специальному режиму значительно меньше и не превышает 40...100 нм, а его габитусная плоскость меняет свое направление в пределах 0,5...2 мкм. Это приводит к изоморфности кремниевого каркаса. Одна из трех ветвей кремниевого дендрита недостаточно развита и чаще всего представляет собой овальные диски, диаметр которых не превышает 2,0 мкм. Рост эвтектических дендритов кремния начинается от первичных кристаллов кремния.

Рентгеноструктурный анализ образцов, полученных в результате обработки расплава периодическим однополярным импульсным электрическим током, позволил идентифицировать ряд полиморфных модификаций кремния. Одна из них - Si<sub>v</sub> (JCPDS 41-4111). Образование этой модификации, наиболее вероятно, связано со смещением атомных слоев в кубической решетке кремния типа алмаза, а Si<sub>v</sub> – является его политипом. При использовании режимов с повышенной плотностью тока объемная доля фазы Si<sub>v</sub> несколько уменьшается. Появляются аллотропные модификации кремния Si<sub>t</sub> с тетрагональной структурой и δ-Si со структурой ОЦК, а также силицид Al<sub>3</sub>Si с ГЦК-решеткой. На основании проведенных расчетов можно утверждать, что силицид Al<sub>3</sub>Si сформировался на базе кластера с соответствующей стехиометрией и ближним порядком атомов в расплаве.

Надо полагать, что структурные изменения в твердом состоянии обусловлены резонансными явлениями в микронеоднородном расплаве при повышенных частотах электрического тока, изменяющихся по определенному временному закону. Кластеры в жидкости имеют определенное время жизни, и, следовательно, характеризуются соответствующей частотой появления и рассыпания. При частоте импульсного тока, совпадающей с "мерцанием" кластеров, они разрушаются. Вновь образующиеся кластеры соответствуют иному, метастабильному, структурному состоянию расплава. При затвердевании это приводит к изменению микроструктуры, фазового состава, морфологии и размера первичных и эвтектических кристаллов кремния, некоторые из параметров которого уменьшаются до наноразмерных величин.

Структурные перестройки в заэвтектическом сплаве, обработанном в жидком состоянии периодическим однополярным импульсным электрическим током по специальным режимам, приводят к качественным изменениям его механических характеристик, повышению пластичности до уровня алюминия технической чистоты. Это открывает новые перспективы в создании материалов с принципиально новыми свойствами.

# ВЛИЯНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ, ФОРМИРУЮЩЕЙ РАЗРЯД В ВОДЕ, НА ДЕФОРМИРОВАНИЕ ПЛАСТИН

В.М. Косенков, В.М. Бычков, Ф.Н.Тищенко  
Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев

Высоковольтный разряд в воде находит широкое применение в различных технических приложениях. Его эффективность во многом зависит от параметров разрядной цепи, таких как: ёмкость конденсаторной батареи ( $C$ ), напряжение её заряда ( $U_0$ ), индуктивность ( $L$ ), расстояние между электродами ( $l_c$ ), активное сопротивление ( $R_r$ ) всех элементов разрядной цепи, кроме канала разряда. Во многих работах исследовали влияние параметров  $C$ ,  $U_0$ ,  $l_c$ ,  $R_r$  на изменение свойств различных сред и объектов под действием волн давления, генерируемых электрическим разрядом в воде, но влиянию  $L$  уделяли намного меньше внимания. Главным образом это связано с тем, что в большинстве технических приложений основное воздействие на среды и объекты осуществляют первичные ударные волны, генерируемые электрическим разрядом в воде. Положительный эффект воздействия ударных волн на среды и объекты как правило пропорционален их амплитуде. Было определено, что уменьшение  $L$  приводит к существенному увеличению амплитуды первичных ударных волн. Поэтому во многих работах рекомендовали задавать  $L$  как можно меньшей величины. По аналогии эти рекомендации распространяли на процессы, время протекания которых намного больше, чем время действия первичных ударных волн. К таким процессам относится деформирование пластин, происходящее в результате электрического разряда в воде. В этом случае данные о влиянии величины  $L$  отсутствуют, что определяет актуальность проведения исследований.

Цель настоящей работы заключалась в экспериментальном исследовании влияния индуктивности разрядной цепи на количество энергии, выделяемой в канале разряда, а также на энергию деформирования металлических пластин под действием волн, генерируемых электрическим разрядом в воде.

В процессе экспериментального исследования ёмкость конденсаторной батареи ( $C$ ) была постоянной и равной 10 мкФ. Индуктивность ( $L$ ) и активное сопротивление ( $R_r$ ) всех элементов разрядной цепи, кроме канала разряда, определяли по осциллограммам тока короткого замыкания электродов. Минимальная индуктивность разрядного контура равнялась 9,5 мкГн, а максимальная - 65,6 мкГн. Напряжение заряда конденсаторной батареи ( $U_0$ ) изменяли в пределах от 30 до 40 кВ, что соответствовало энергии заряда батареи ( $E_0$ ) от 4,5 до 8 кДж. Расстояние между электродами ( $l_c$ ) задавали равным 20 мм, 30 мм и 55 мм. Разряд инициировали пробоем слоя воды между электродами под действием  $U_0$ . Волны от электрического разряда в воде воздействовали на листовую высокопрочный алюминиевый сплав 5754 толщиной 1,35 мм, деформируя его в открытую кольцевую матрицу диаметром 120 мм.

Анализ процессов выполняли на основе измерения силы тока ( $i$ ) и напряжения ( $U$ ) на канале разряда, а также максимального прогиба пластины ( $\Delta$ ). По результатам измерения силы тока и напряжения на канале разряда определяли энергетические характеристики разряда: мощность ( $N$ ) и энергию, выделившуюся в канале разряда ( $E_c$ ). Полученное значение  $E_c$  делили на  $E_0$  для определения эффективности её передачи в канал разряда ( $\eta_c$ ). Энергию пластического деформирования пластины ( $E_p$ ) определяли по её прогибу. Величина  $\eta_p$ , вычисляемая как отношение  $E_p$  к  $E_0$ , характеризовала эффективность использования  $E_0$  для деформирования пластины.

Увеличение  $L$  от 10 мкГн до 65,6 мкГн при одной и той же  $E_0$  ( $U_0$  равно 30 кВ), увеличивает период колебаний тока в цепи приблизительно в 2,5 раза и во столько же раз уменьшает его амплитуду. Амплитуда силы тока монотонно уменьшается от периода к периоду с течением времени разряда независимо от  $L$ , при этом амплитуда напряжения между электродами при больших  $L$  сначала уменьшается, но к концу разряда увеличивается, достигая уровня напряжения в конце первого полупериода разряда. Это свидетельствует о существенном увеличении сопротивления канала разряда на последних периодах колебания тока. Определено, что увеличение индуктивности разрядного контура существенно увеличивает эквивалентное сопротивление канала разряда ( $R_c$ ). При малых  $l_c$  величина  $R_c$  возрастает от 2,5 до 3 раз, а при  $l_c$  равной 55 мм – в 1,7 раза. Учитывая, что  $R_r$  практически не зависит от изменения  $L$ , а  $R_c$  существенно увеличивается, то большая часть энергии  $E_0$  выделяется в канале разряда, увеличивая тем самым электрический КПД ( $\eta_c$ ). Степень увеличения  $\eta_c$  существенно зависит от расстояния между электродами  $l_c$ . Увеличение  $L$  приблизительно в 7 раз, когда  $l_c$  изменяется от 20 до 30 мм, приводит к повышению  $\eta_c$  от 0,53 до 0,7 (в 1,3 раза). Увеличение  $l_c$  до 55 мм приводит к меньшему росту  $\eta_c$  от 0,65 до 0,72 (в 1,1 раза). Следовательно, увеличение  $L$  позволяет существенно увеличить  $\eta_c$ .

Увеличение  $L$  положительно влияет на энергетическую эффективность деформирования пластин. Величина  $\eta_p$  монотонно увеличивается от 0,04 до 0,063 (в 1,6 раза), когда  $L$  изменяется от 10 до 65,6 мкГн, что сравнимо с изменением величины  $\eta_c$ .

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что в рассмотренной области изменения параметров разрядного контура увеличение  $L$  позволяет существенно повысить эффективность преобразования энергии  $E_0$  в канале разряда до 1,3 раза и в деформируемой пластине до 1,6 раза. Впервые определено положительное влияние увеличения индуктивности разрядной цепи на деформирование пластин, приводящее к увеличению количества используемой для этого энергии.

# ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ ЛИСТОВЫХ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ НА ДЕФОРМАЦИЮ ИХ РАЗРУШЕНИЯ

В.М. Косенков, Л.П. Коломийцева

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев

**Введение.** Современные листовые высокопрочные стали DP780, DP980, BH240 обладают пониженными пластическими свойствами, что затрудняет процесс изготовления из них деталей. Устранить эту проблему в значительной степени позволяет использование особенностей поведения металлов в процессе их деформирования с большой скоростью. Однако, не смотря на имеющиеся исследования этой проблемы, отсутствуют данные о зависимости пластических деформаций разрушения ( $\varepsilon_{cr}$ ) листовых высокопрочных сталей от скорости их деформации ( $\dot{\varepsilon}$ ) и напряжённого состояния, предшествующего разрушению, что свидетельствует о научной и практической актуальности решения этой задачи. Поэтому основной целью данной работы было исследование зависимости деформаций  $\varepsilon_{cr}$  от  $\dot{\varepsilon}$  при одноосном и двухосном способах приложения деформирующих сил.

**Постановка задачи и методика её решения.** Для исследования влияния  $\dot{\varepsilon}$  на  $\varepsilon_{cr}$  высокопрочных листовых сталей использовали образцы из материалов DP980 и DP780, толщиной ( $\delta$ ) 1,35 мм, а также BH240  $\delta=0,65$  мм.

Одноосное растяжение образцов с  $\dot{\varepsilon} \in [2 \cdot 10^{-4}; 4 \cdot 10^{-4}] \text{ с}^{-1}$  выполняли на разрывной машине FP 10/1 HECKERT, а с  $\dot{\varepsilon} \in [5 \cdot 10^{-2}; 0,3] \text{ с}^{-1}$  с помощью гидравлического пресса П6324 и специальной оснастки. Двухосное растяжение пластин с малой скоростью деформации выполняли по разработанному ранее методу с эквивалентной скоростью  $\dot{\varepsilon}^* \in [0,5; 2] \text{ с}^{-1}$ , определяя с помощью контрольной сетки деформацию разрушения ( $\varepsilon_{cr}^*$ ), эквивалентную одноосному растяжению материала.

Одноосное растяжение образцов с  $\dot{\varepsilon} \in [300; 3200] \text{ с}^{-1}$  выполняли по методу Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсона, применяя разработанную ранее "прямую" схему растяжения образцов, в процессе прохождения по стержням первичных волн сжатия. Двухосное растяжение пластин высокопрочных сталей с  $\dot{\varepsilon}^* \in [3000; 17000] \text{ с}^{-1}$  выполняли волнами давления, генерируемыми электрическим разрядом в воде с помощью электрогидравлического пресса T1226Б и специальной оснастки, позволяющей определять скорость прогиба пластины в процессе её деформирования и затем вычислять скорость её эквивалентной деформации.

**Результаты исследования.** Данные экспериментального исследования влияния  $\dot{\varepsilon}$  на  $\varepsilon_{cr}$  (и  $\dot{\varepsilon}^*$  на  $\varepsilon_{cr}^*$ ) в процессе растяжения образцов аппроксимировали функцией  $\varepsilon_{cr} = a + b \cdot \dot{\varepsilon}^c$  (а, b, c – параметры аппроксимации экспериментальных данных).

Зависимости  $\varepsilon_{cr}$  от  $\dot{\varepsilon}$  характеризуют увеличение пластичности исследованных материалов с повышением  $\dot{\varepsilon}$ . Наибольшее влияние  $\dot{\varepsilon}$  на  $\varepsilon_{cr}$  наблюдается при относительно малых скоростях деформации ( $\dot{\varepsilon} \in [10^{-4}; 4 \cdot 10^2] \text{ с}^{-1}$ ). За пределами этого интервала, когда  $\dot{\varepsilon} \in [4 \cdot 10^2; 3 \cdot 10^3] \text{ с}^{-1}$  (режим высокоскоростного деформирования), увеличение пластичности материала замедляется при возрастании  $\dot{\varepsilon}$ . При одноосной деформации с  $\dot{\varepsilon} = 3000 \text{ с}^{-1}$   $\varepsilon_{cr}$  стали DP780 увеличивается в 2,3 раза, DP980 – в 2,9 раза, а BH240 – в 1,9 раза.

Зависимость  $\varepsilon_{cr}^*$  от  $\dot{\varepsilon}^*$  в процессе двухосного растяжения стали DP780 аналогична ее одноосному растяжению, но деформирование со скоростью  $\dot{\varepsilon}^* = 3000 \text{ с}^{-1}$  увеличивает  $\varepsilon_{cr}^*$  только в 1,35 раза, а не в 2,3 раза, как при одноосном растяжении. Даже увеличение  $\dot{\varepsilon}^*$  до  $17000 \text{ с}^{-1}$  приводит к увеличению  $\varepsilon_{cr}^*$  только в 1,6 раза.

**Заключение.** Увеличение скорости деформации листовых высокопрочных сплавов DP780, DP980, BH240 существенно увеличивает деформации их разрушения, на которые значительно влияет изменение напряжённо-деформированного состояния материала в процессе его деформирования.

## ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА КАРБИДОСТАЛЕЙ С ВКЛЮЧЕНИЯМИ МИКРОПОРОШКА АЛМАЗА

О.Н. Сизоненко<sup>1</sup>, А.А. Коваленко<sup>1</sup>, Н.А. Олейник<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев,

<sup>2</sup> Институт сверхтвердых материалов им. Бакуля НАН Украины, г. Киев

Развитие основных отраслей современной промышленности предъявляет неуклонно возрастающие требования к свойствам используемых конструкционных и инструментальных материалов – статической и динамической прочности, сопротивлению хрупкому разрушению, износостойкости в различных условиях эксплуатации. Уровень этих свойств в значительной степени определяет надежность деталей, узлов, рабочих органов, механизмов, технологической оснастки и оборудования. Современная промышленность нуждается в конструкционных материалах с высокими показателями твердости и износостойкости. Влияние на структуру материалов – актуальная научно-техническая проблема современного материаловедения, открывающая пути управления свойствами гетерогенных систем (смеси дисперсных тел различной физической и химической природы) и выдвигающая необходимость поиска методов управления их свойствами с учетом кинетических закономерностей физико-химических явлений и процессов.

Карбидосталь – это композиционный термоупрочненный материал, содержащий 30 - 35 % мелкодисперсных частиц карбида или карбонитрида титана, равномерно распределенный в матрице (основе) из инструментальной теплостойкой стали, преимущественно из быстрорежущей Р6М5, Р6М5К5, изготавливаемый методами порошковой металлургии в виде полуфабрикатов (пруток, полоса и т. п.). По уровню режущих свойств карбидосталь занимает промежуточное положение между быстрорежущими сталями повышенной теплостойкости (Р6М5К, Р9М4К8) и W-Co-сплавами (типа ВК8), превосходя последние по прочности при изгибе на 600-800 МПа.

Функциональные свойства карбидосталей, такие как износостойкость и твердость могут быть улучшены, если вводить в шихту частицы сверхтвердых материалов, таких как алмаз. Однако консолидация карбидосталей, при наличии алмазных зерен, связана с большими сложностями, так как при высоких температурах алмазы превращаются в графит. Использование метода искро-плазменного спекания, для которого характерны высокие скорости нагрева и относительно низкие температуры и времена выдержки, в отличие от традиционных методов спекания, может помочь сохранить алмазное зерно.

Поэтому целью работы было исследовать функциональные свойства карбидосталей с включениями микропорошка алмаза.

Смесь порошков (75 % Fe + 25 % Ti) и микропорошка алмазов марки АСМ 40/28 подвергали высоковольтной электроразрядной обработке (ВЭР). Для ВЭР обработки смеси порошков железо-титан в качестве рабочей жидкости использовался керосин, что позволяло предотвратить их окисление и синтезировать наноглерод, который будет участвовать в реакции карбидизации порошков металлов [10]. Удельная энергия обработки системы порошков 75% Fe + 25 % Ti составляла 25 МДж/кг, при энергии единичного разряда  $W1 = 0,5$  кДж.

Микропорошки алмаза обрабатывались в дистиллированной воде при удельной энергии обработки не более 5,8 МДж/кг, что позволило снизить возможность диспергирования, но воздействовать на поверхность алмазов с точки зрения изменения их морфологии. Так же для исследований применяли смесь 75 % Fe + 25 % Ti с исходным порошком алмаза (АСМ 40/28) в количестве 1 % от массы порошковой шихты.

В результате было экспериментально установлено, что добавление микропорошков алмаза в шихту при консолидации искро-плазменным спеканием карбидосталей приводит к улучшению функциональных характеристик получаемых материалов. Добавление в шихту Fe–Ti–C исходного микропорошка алмаза марки АСМ 40/28 повышает твердость до 47 HRC, при высокой износостойкости. Потеря массы обрабатываемого образца составляет 19,0 мг/км, а консолидированный материал по износостойкости превосходит термообработанную инструментальную сталь Р6М5 в 2 раза. Добавление в шихту Fe–Ti–C обработанного микропорошка алмаза марки АСМ 40/28 повышает твердость до 54 HRC, при высокой износостойкости. Потеря массы обрабатываемого образца составляет 18,5 мг/км. Консолидированный материал по твердости приближается к термообработанной инструментальной стали Р6М5, а по износостойкости превосходит ее в 2,16 раза.

# ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ, УПРОЧНЕННЫХ МАХ-ФАЗАМИ СИСТЕМЫ Ti-Al-C

О.Н. Сизоненко<sup>1</sup>, Н.С. Присташ<sup>1</sup>, А.Д. Зайченко<sup>1</sup>, А.С. Торпаков<sup>1</sup>, Е.В. Липян<sup>1</sup>, А.Д. Рудь<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев

<sup>2</sup> Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАН Украины, г. Киев

Создание новых материалов с высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами, которые обеспечат необходимую надежность работы изделий в экстремальных условиях, является актуальным для развития современной техники. К сожалению, возможности их получения с помощью традиционных металлургических методов в значительной степени исчерпаны. Поэтому важной задачей, стоящей перед учеными и инженерами, является разработка физических принципов создания новых материалов в условиях высокоэнергетической подготовки порошков и экстремальных сверхскоростных воздействий температур и давлений при консолидации методом искро-плазменного спекания (ИПС), что позволит получить материалы с более высокими физико-механическими свойствами, чем полученные по традиционным металлургическим способам.

Под МАХ фазой подразумевается тройная система  $M_{n+1}AX_n$  имеющая гексагональную плотноупакованную структуру, в которой М – переходный металл, А – элемент А подгруппы таблицы Менделеева, а X – углерод или азот. Существенная отличительная особенность этих материалов заключается в слоистом строении их гексагональных кристаллических решеток, в которых слои атомов элементов М и А чередуются в определенной последовательности. Это и обеспечивает их высокие физико-механические характеристики, которые сочетают в себе свойства керамики и металлов. Среди многих МАХ-фаз, которые синтезированы в настоящее время, наибольший интерес представляют МАХ-фазы на основе титана:  $Ti_2AlC$ ,  $Ti_2AlN$ ,  $Ti_3AlC_2$  и особенно  $Ti_2AlC$ , слоистая структура которого позволяет использовать его в условиях воздействия высоких температур и повышенной коррозии. Поэтому создание металломатричных композиционных материалов, которые имеют в своей структуре МАХ-фазы системы Ti-Al-C, представляет собой актуальную научную задачу.

Для получения металломатричных композитов, упрочненных наноламнатными МАХ-фазами, был применен новый подход, который заключается в том, что синтез упрочняющих фаз (в том числе МАХ-фаз) происходит в две стадии: на первой стадии происходит диспергирование, подготовка поверхности порошков и синтез дисперсноупрочняющих включений. На второй стадии при ИПС происходит синтез материала с дисперсноупрочняющими добавками при сохранении наноструктуры.

На первой стадии применялись два различных метода синтеза и активации: механо-химический с использованием планетарной мельницы и высоковольтная электроразрядная обработка порошков в углеводородной жидкости (ВЭР). Использование углеводородной жидкости (керосина) в качестве рабочей среды при ВЭР обработке исходной смеси порошков Al-Ti позволяет не вводить в состав смеси дополнительный графит. При высоковольтном разряде создаются условия (давление в канале разряда достигает 1 ГПа а температура в канале разряда может достигать 50'000 К) для пиролиза керосина с образованием твердофазного наноуглерода. Синтезированные наночастицы углерода способны вступать в реакции карбидизации с частицами порошков, образуя наноструктурные упрочняющие фазы

Механоактивация исходных крупнодисперсных порошков титана, алюминия и графита в атомном соотношении 3:1,1:2 проводилась при комнатной температуре в планетарной мельнице Fritsch Pulverisette 6 в атмосфере аргона в течение 3 часов. Скорость вращения мельницы составляла 400 оборотов в минуту. Соотношение массы шариков к массе образца - 20:1.

Эксперименты по консолидации полученных композиций были проведены методом искро-плазменного спекания на установке «Гефест-10», разработанной в ИИПТ НАН Украины. Установка позволяет консолидировать порошки при механическом нагружении в вакууме путем пропускания через засыпку суперпозиции постоянного и переменного токов амплитудой 1,1 кА с частотой пульсирующей составляющей 10 кГц. ИПС осуществляли в графитовых матрицах (марка графита МПГ 6) с внутренним диаметром 10 мм, куда засыпали 3 г шихты. Давление подпрессовки во всех экспериментах составляло ~ 40 МПа, а давление спекания ~ 60 МПа, время изотермической выдержки – 5 мин.

Была экспериментально исследована возможность создания металломатричных композитов, упрочненных МАХ-фазами системы Ti-Al-C путем ИПС консолидации шихты после механоактивации и ВЭР обработки порошков титана и алюминия в керосине. Показано, что шихта, подготовленная в ходе механоактивации, и шихта, полученная в процессе ВЭР обработки в керосине, имеют схожий гранулометрический и фазовый состав и отличаются лишь аллотропными формами углерода в своем составе. Установлено влияние аллотропных форм углерода на образование новых фаз в процессе ИПС. Так, в механоактивированной шихте, которая содержит графит, происходит образование МАХ-фазы  $Ti_3AlC_2$ , а в ВЭР активированной, которая содержит  $C_{60}$  и  $C_{70}$ , образуется МАХ-фаза  $Ti_2AlC$  и тройной карбид  $Ti_3AlC$ . Показано, что металломатричный композит системы Ti-Al-C, который содержит МАХ-фазу  $Ti_2AlC$  и тройной карбид  $Ti_3AlC$ , имеет твердость по Виккерсу 7 ГПа, что почти на 2 ГПа выше, чем у образцов, которые содержат МАХ-фазу  $Ti_3AlC_2$  (5,1 ГПа).

# МЕТОД ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИМПУЛЬСАМИ ТОКА ДЛЯ ОЦЕНКИ И РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ.

Л.М. Лобанов<sup>1</sup>, И.П. Кондратенко<sup>2</sup>, В.А. Пивторак<sup>1</sup>, Н.А. Пашин<sup>1</sup>, О.Л. Миходуй<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, г. Киев

<sup>2</sup> Институт электродинамики НАН Украины, г. Киев

Работа посвящена актуальной научно – прикладной проблеме разработки научных основ регулирования напряженно - деформированного состояния сварных соединений при реализации процесса электродинамической обработки (ЭДО), который основан на взаимодействии импульсного электрического тока и ударной нагрузки, что дает возможность обеспечить релаксацию остаточных сварочных напряжений, повысить механические характеристики и оптимизировать структуру металла в зоне обработки. Созданы электромеханические устройства комбинированного воздействия для ЭДО, которые объединяют в себе два фактора влияния – высокую плотность импульсного электрического тока и ударное нагружение, величины которых определяются взаимосвязью между параметрами разрядного контура и обеспечивают снижение остаточных напряжений в сварных соединениях. Показано, что для локальной релаксации напряженного состояния в сварных соединениях из алюминиевого сплава АМг6 толщиной 4 мм достаточным является уровень энергии  $E_{пл}$  пластического деформирования, не превышающий значения в 1 кДж, при котором плотность и длительность импульса тока –  $j$  и  $t$ , достигают соответственно 2 кА/мм<sup>2</sup> и 0,7 мс, а сила ударной нагрузки  $P$  - более 20 кН. Установлено, что ЭДО сплава АМг6 и стали Ст3 обеспечивает релаксацию остаточных сварочных напряжений, повышения механических характеристик и оптимизацию структуры металла в зоне обработки вследствие электропластического деформирования, упорядочивания дислокационной субструктуры, увеличения вязкости и повышения твердости. Установлено, что ЭДО обеспечивает повышение долговечности сварных соединений сплава АМг6 до шести раз при циклическом нагружении симметричным консольным изгибом с частотой 14 Гц при амплитуде цикла  $2\sigma_a = 160$  МПа. Доказано, что ЭДО является эффективным методом правки сварных соединений электропластическим деформированием металла, которое способствует образованию пластических деформаций удлинения, которые компенсируют пластические деформации укорочения от сварки, следствием чего является снижение остаточных прогибов тонкостенных корпусных конструкций при меньших затратах энергии, чем при тепловой правке и ударной с подогревом. На базе положений Прантля-Рейсса теории движения упруго-пластической среды разработана модель напряженно - деформированного состояния пластины при ее ударном взаимодействии с индентором, в рамках которой установлены аналитические зависимости для расчета параметров эффективной пластической деформации, определена кинетика волн напряжений и силы ударного нагружения, которые являются входными параметрами для расчета на базе уравнений Максвелла для нестационарного электромагнитного поля, режимов ЭДО, обеспечивающих релаксацию остаточных сварочных напряжений. Разработаны научно обоснованные технологии ЭДО, направленные на повышение долговечности и точности изготовления сварных корпусов судов из алюминиевых сплавов АМг6 и 1561, промежуточных корпусов авиадвигателей Д-36 из жаропрочного магниевое сплава МЛ10. На базе метода ЭДО разработана технология упрочнения стрингерных панелей крыла самолета из алюминиевого сплава Д16 в зоне отверстий для перетекания топлива.

Выполнены эксперименты по оценке влияния импульсного тока на релаксацию напряженно - деформированного состояния тестовых образцов из сплава АМГ-6 толщиной 8 мм. Установлено, что действие импульсного тока на тестовые образцы с известными величинами напряжений приводит к перемещению точек его поверхности. Исследовано влияние таких параметров импульсного тока, как частота тока, длительность одного импульса тока, продолжительность обработки импульсным током, амплитуда силы тока на величину перемещений точек поверхности тестовых образцов. Эксперименты по измерению перемещений выполнялись методом электронной спекл - интерферометрии.

# ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ В ЦЕПЯХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ МАГНИТНО-ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕНЕРАТОРАХ ИМПУЛЬСОВ

А.И. Христо

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев

Последнее десятилетие характеризуется значительным развитием электроразрядных технологий направленных на очистку вредных токсических отходов в воздушной или водной средах. Неотъемлемой частью оборудования этих технологий являются высоковольтные генераторы коротких импульсов, к которым предъявляются особые требования относительно параметров формируемых импульсов, как пиковая мощность, длительность импульса, крутизна переднего фронта и другие. Большинству из этих требований вполне соответствуют магнитно-полупроводниковые генераторы импульсов (МПГИ), которые получили значительное развитие благодаря появлению новых магнитных материалов с улучшенными характеристиками, что позволило снизить динамические потери переключения коммутирующих дросселей. Несмотря на значительные успехи в совершенствовании техники магнитных генераторов все же остаются проблемы с достоверным описанием обменных процессов протекающих между генератором и нагрузкой, их влиянием на устойчивые режимы колебаний и эффективность преобразования энергии в схемах МПГИ.

В настоящее время значительный вклад в развитие научных основ, принципов построения и систематизации МПГИ внесен учеными Института Электродинамики НАН Украины, которыми были разработан ряд практических схем МПГИ с новыми узлами компрессии импульса. Эти современные устройства были использованы в качестве высоковольтного оборудования для питания разрядной камеры в технологии обеззараживания воды импульсным барьерным разрядом. В частности, в работах И.В. Волкова, В.И. Зозулева, Д.А. Шолоха впервые показана возможность повышения энергетических показателей МПГИ за счет одновременного протекания токов в смежных узлах компрессии импульсов, а также предложены схемно-узловые способы повышения энергетических и динамических показателей МПГИ путем уменьшения коэффициента проницаемости насыщенного сердечника КД. Благодаря исследованиям направленным на поиск более эффективных электроразрядных способов очистки воздуха от промышленных газовых выбросов, учеными ИИПТ НАН Украины был разработан специальный класс высоковольтного оборудования обеспечивающего формирование импульсов с частотой следования 10 кГц, напряжением до 100 кВ, крутизной переднего фронта до 1 мкс при длительности импульса до 20 мкс. В частности, в работе Л.З. Богуславского отмечено положительное влияние сдвоенного высоковольтного импульса на эффективность газоочистки при обработке воздуха в стримерном объемном и коронном разрядах.

На основании численного моделирования и экспериментального исследования была получена расширенная классификация управляемых преобразовательных звеньев во входном контуре МПГИ, которая разделяет эти звенья согласно количеству используемых управляемых ключей и модификации предтрансформаторного звена магнитного сжатия импульса. Следуя этой классификации можно заключить, что в одноключевых схемах восстановление исходного состояния магнитных элементов достигается либо за счет использования цепи подмагничивания, либо индуктивно-диодного зарядного контура. Однако эти решения имеют ряд недостатков связанных с ограничением частоты импульсов и разрядной мощности. Вместе с тем, добавление дополнительного элемента в зарядную цепь, позволяет разделить зарядные и разрядные такты преобразования, в то время как сочетание двухключевого преобразовательного звена и предтрансформаторного звена сжатия дает возможность выявить новые закономерности функционирования структурных узлов и повысить энергодинамические параметры генератора.

Установлено, что на характер протекания электромагнитных процессов в цепях двухключевого МПГИ существенно влияет присутствие предтрансформаторного звена магнитного сжатия. Согласно полученной классификации можно выделить двухключевые преобразовательные звенья, содержащие последовательное, последовательно - инверсное и перезарядно - последовательное предтрансформаторное звено магнитного сжатия. Как показывает моделирование, введение звена магнитного сжатия увеличивает порог существования асимметричного режима колебаний в МПГИ, однако это решение позволяет уменьшить нагрузку на силовые ключи и оптимизировать длительность импульсов тока через ИТ. На основе сравнительного анализа электродинамических характеристик рассмотренных МПГИ установлено, что МПГИ с перезарядно - последовательным звеном сжатия в отличие от других МПГИ имеет заметное преимущество по пиковой и средней мощности, которая высвобождается в нагрузке, даже, несмотря на то, что этот вариант МПГИ имеет меньшую граничную частоту следования импульсов. Увеличение пиковой мощности объясняется тем, что в перезарядно - последовательном звене сжатия энергия запасается не только в продольном конденсаторе, как в других МПГИ, но и в поперечном конденсаторе, который в следующем такте перезарядается. Один из вариантов МПГИ был использован для плазменной инициации экзотермической реакции сверхвысокотемпературного самораспространяющегося синтеза металл-углеродных частиц в предварительно уплотненной трехкомпонентной смеси порошков Ti-Al-C.

# ВИКОРИСТАННЯ FUZZY-МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ СИНТЕЗІ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ РОЗРЯДНО-ІМПУЛЬСНОЮ ОБРОБКОЮ МАТЕРІАЛІВ

С.С. Козирев

Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв

В розрядно-імпульсних технологіях обробки матеріалів використовується електровибухове перетворення енергії як джерело концентрованого, дозованого впливу у заданих локальних об'ємах з високими питомими енергетичними показниками. До основних переваг електровибухового перетворення енергії відноситься можливість досягнення високих питомих енергетичних показників та можливість забезпечення керованості процесу. Реалізація основної переваги електровибухового перетворення енергії - керованості, потребує його всебічного вивчення та формалізації, тобто побудови математичної моделі керування. Існуючі моделі, які побудовані на основі вивчення електро- та гідродинамічних перехідних процесів і описуються системою нелінійних диференціальних рівнянь, навіть при значних спрощеннях, є занадто складними. Вони до того ж не враховують багатьох факторів впливу на режим розряду та стохастичності процесу, обумовленого статистичними закономірностями елементарних процесів на стадії формування каналу розряду, тому не можуть бути застосовані в процесі керування. Аналіз моделей, на основі яких синтезовані системи регулювання та стабілізації окремих параметрів процесу електровибухового перетворення енергії, показав що всі вони побудовані з використанням лінеаризації передатних функцій об'єкта і описують роботу в околі точки номінального режиму при певних припущеннях відносно збурень. Враховується тільки вхідне збурення по координаті  $l$  – довжина розрядного проміжку, яке апроксимується лінійною функцією часу  $\Delta l(t)$ . Прийняті припущення при побудові моделей керування електровибуховим перетворенням енергії допустимі для дуже вузького класу задач. В реальних умовах існує значна кількість не врахованих збурень, які суттєво впливають на режим розряду. До таких збурень відноситься зміна питомого опору рідини  $\rho$ , в якій відбувається високовольтний електричний розряд, нехтувати якою неможливо, тому необхідно розглядати додаткову координату  $\rho[n]$ , яка впливає на оператор об'єкта керування та статистичні характеристики інформаційних координат. Припущення про лінійність збурення по координаті  $l[n]$  також діє тільки при обробці поверхонь з незначними перепадами висот та в околі точки номінального режиму. Тому існуючі моделі керування не придатні для використання при синтезі адаптивних систем керування, які повинні забезпечувати керованість процесу електровибухового перетворення енергії в усьому просторі станів при зміні технологічних параметрів в широкому діапазоні та дії непередбачуваних зовнішніх впливів.

Метою роботи є побудова адекватної моделі керування електровибуховим перетворенням енергії в умовах значних змін параметрів середовища і збурюючих впливів з урахуванням суттєвої нелінійності та стохастичності об'єкта на основі сучасних методів fuzzy-апроксимації з використанням апарату нечіткої логіки, що при синтезі системи керування забезпечить розширення зони керованості об'єкта, підвищення точності підтримки оптимальних режимів в реальних умовах.

З метою побудови fuzzy-моделі керування режимом електровибуху на всьому просторі станів проведено теоретичне і експериментальне дослідження процесу дискретного, з періодом  $T$ , електровибухового перетворення енергії в розрядному контурі ГІС як об'єкта керування:  $Y(nT) = AX(nT)$ ,  $n$  - поточна реалізація процесу. Для визначення найбільш статистично ефективної інформаційної координати проведено дослідження статистичних характеристик та кореляційних відношень координат вихідного вектора, за результатами якого в якості статистично ефективної інформаційної координати прийнято їх лінійну комбінацію:  $\sum[n] = i_m[n] + k_{up}[n]/i_m[n]$ . Синтез нечіткої моделі електровибухового перетворення енергії проводимо, використовуючи fuzzy-апроксимацію на основі експериментальних даних. В якості лінгвістичних змінних fuzzy-апроксиматора приймаємо координати  $l[n]$ ,  $\rho[n]$ . Кількість термів (лінгвістичних значень) для кожної змінної вибираємо рівною кількості рівнів значень за планом факторного експерименту. Функції приналежності координат вектора стану апроксимуємо трикутною функцією. База правил формується на основі бази знань, в якості якої використовуємо експериментальні дані. База правил у вигляді нечітких логічних рівнянь дозволяє пов'язати функцію приналежності вихідної змінної та координат вхідного вектора, в результаті чого отримуємо лінгвістичні значення вихідної змінної. Нечітке моделювання проводимо в середовищі FuzzyTECH, використовуючи пакет Fuzzy Logic Toolbox.

**Висновки.** Побудовано нечітку модель керування електровибуховим перетворенням енергії на основі використання методів fuzzy-апроксимації, яка оперуючи математичним сподіванням інформаційної координати, описує об'єкт на всьому просторі станів з врахуванням нелінійності. При синтезі нечіткої моделі в якості бази знань використано базу експериментальних даних, яка при зміні технологічних параметрів може бути легко розширена, забезпечуючи адаптивність керування при різних режимах роботи.

Побудовано нечітку модель залежності середньостатистичного відхилення інформаційної координати від положення об'єкта в просторі станів, що дасть змогу розширити зону керованості та підвищити точність.

Використання побудованих нечітких моделей при синтезі системи керування забезпечить керованість об'єкта у всьому просторі станів та адаптивність системи керування при зміні технологічних параметрів та параметрів середовища в широкому діапазоні. Впровадження адаптивної системи керування, синтезованої на основі нечітких моделей, дозволить підвищити продуктивність електророзрядних технологій обробки матеріалів, що використовують електровибух.

# ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНИХ ПОЛІМЕРНИХ ПЛІВОК КОМБІНОВАНИХ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ, ПІДДАНИХ ВПЛИВУ ПІДВИЩЕНИХ ТЕМПЕРАТУР

А.П. Малюшевська

Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв

Світовий досвід виробництва та експлуатації високовольтних імпульсних конденсаторів дозволяє виробникам сформулювати комплекс вимог до електрофізичних характеристик основного робочого елементу конденсатора – діелектричної системи секції. В результаті спеціалістами з конденсаторобудування ШПТ найбільш технологічними та надійними твердими електроізоляційними компонентами для діелектричної просоченої плівкової системи секцій високовольтних імпульсних конденсаторів було визнано поліпропіленову, поліетилентерефталатну плівки та їх комбінації. Навіть в умовах відсутності критичних часткових розрядів найбільш вагомим недоліком, що знижує працездатність просоченої плівкової діелектричної системи в цілому, є погіршення її електрофізичних експлуатаційних характеристик внаслідок поступового розчинення полімеру в рідкому діелектрику, особливо за умов дії підвищених температур. Зазначена взаємодія компонентів плівкової просоченої діелектричної системи реалізується, як набухання полімерної плівки з наступним розчиненням переважно аморфної складової полімеру і переходом в просочуючу рідину полімерних макромолекул, а також іонів металів, іоногенних домішок і технологічних забруднень, що містяться в плівці. Як наслідок, мають місце незворотні структурні зміни полімерної плівки, які призводять до зниження її електричної й механічної міцності.

Встановлено, що в силових (у тому числі високовольтних імпульсних) конденсаторах із просоченням синтетичними рідинами, що мають високий ступень хімічної спорідненості із просочуваною полімерною плівкою, процес руйнування просочуючого діелектрика іде як за рахунок термоокислювальної деструкції, так і внаслідок термостимульованої взаємодії із твердими плівковими компонентами. Інтенсивність такої термостимульованої взаємодії багато в чому визначається не тільки хімічним складом і будовою компонентів діелектричної системи, але й морфологічними особливостями плівки.

Виявлено, що в ході термостаріння просоченої плівкової діелектричної системи при температурі 100°C зниження коефіцієнта відносного світлопропускання трансформаторного масла Т-1500 на 20 % відповідає початку падіння короткочасної електричної міцності шорсткої поліпропіленової, а також слабкошорсткої та гладкої поліетилентерефталатної плівок внаслідок невідновних змін структури при частковому розчиненні в просочуючій рідині. Коефіцієнт відносного світлопропускання разом із короткочасною електричною міцністю плівки та коефіцієнтом дестабілізації рідкого діелектрика може бути використаний як критеріальний, що відображає інтенсивність термостимульованої взаємодії рідкого діелектрика з полімерною плівкою при проведенні порівняльних випробувань термостабільності плівкової просоченої ізоляції.

Розширено уявлення про роль морфологічних особливостей поверхні та об'єму полімерного матеріалу, як фактора, що впливає на інтенсивність взаємодії компонентів плівково-просоченої ізоляції силових конденсаторів. Показано, що термостабільність діелектрика "поліпропілен - трансформаторне масло Т-1500" при заміні шорсткої плівки звичайної структури на гладку із модифікованою поверхнею зростає в 1,35 раз за короткочасною електричною міцністю і в 1,5 рази за коефіцієнтом дестабілізації.

Показано взаємозв'язок деформаційних характеристик полімерної плівки у вихідному стані з кінетикою електрофізичних властивостей компонентів плівкової просоченої діелектричної системи під дією підвищених температур. Встановлено статистично достовірні, структурно зумовлені відмінності полігонів частот реалізації значень відносного подовження при розриві плівок, які можуть бути використані для діагностики морфологічних особливостей полімерного плівкового матеріалу.

Розроблено основи комплексної методики для визначення ступеня взаємодії плівкового полімеру та просочуючої рідини діелектричних систем силових конденсаторів. Застосування такої методики дозволить здійснювати обґрунтований вхідний контроль полімерних плівок для виготовлення високовольтних імпульсних конденсаторів.

Визначення умов термостабільності експлуатаційних властивостей полімерних діелектричних плівок різного складу і морфології в середовищі електроізоляційних рідких діелектриків під дією підвищених температур дозволить підвищити надійність та довговічність ізоляційної техніки з комбінованим плівковим діелектриком.

# ВПЛИВ ПІДВИЩЕНИХ ТЕМПЕРАТУР НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНИХ ПРОСОЧУЮЧИХ РІДИН КОМБІНОВАНИХ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ ВИСОКОВОЛЬТНИХ КОНДЕНСАТОРІВ

А.П. Малюшевська

Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Николаїв

Розвиток сучасної електротехніки та електроенергетики нерозривно пов'язаний з удосконаленням характеристик силових конденсаторів, у тому числі, і високовольтних імпульсних, які є найважливішою складовою частиною електрообладнання установок, що реалізують розрядно-імпульсні технології. З метою підвищення ресурсу і питомих енергетичних характеристик в конструкціях високовольтних імпульсних конденсаторів широко застосовується діелектрик на основі полімерних плівок, просочений газостійкими діелектричними рідинами. Комбінований поліпропіленово-поліетилентерефталатний просочений діелектрик в умовах експлуатації піддається тривалому впливу електричного і теплового полів. Для підвищення стабільності електрофізичних властивостей компонентів комбінованих плівкових діелектричних систем, а надалі – надійності та техніко-економічних показників високовольтних імпульсних конденсаторів проведені дослідження, що розвивають уявлення про вплив підвищених температур на зміну експлуатаційних властивостей рідких просочуючих діелектриків в присутності твердих компонентів ізоляції високовольтних імпульсних конденсаторів.

Експериментально обґрунтовано вибір критеріальних параметрів, що дозволяють достовірно оцінювати ступінь термостабільності електроізоляційної рідини плівкової просоченої діелектричної системи. Показана доцільність використання методу оцінки термостабільності плівкового просоченого діелектрика, заснованого на аналізі кінетики оптичних властивостей просочуючого складу при термостарінні в контакт з полімерною плівкою. Таким чином, критеріальними параметрами, що дозволяють вивчати процес термостаріння просочуючої рідини комбінованих діелектричних систем високовольтних імпульсних конденсаторів, є тангенс кута діелектричних втрат рідини, коефіцієнт дестабілізації, який враховує одночасно результати термоокисної деструкції самої рідини та її взаємодії з полімерними плівками, коефіцієнт відносного світлопропускання, який фіксує появу і зростання кількості розчиненого в рідині полімеру.

Дослідження проводились на прикладі широкоживаних електроізоляційних рідин: трансформаторного масла марки Т-1500 та поліметилсилоксанової рідини. Встановлено, що коефіцієнт відносного світлопропускання ( $K_{ec}$ ) для трансформаторного масла марки Т-1500, виміряний на довжині хвилі 750 нм, чутливий до присутності розчиненого поліпропілену та поліетилентерефталату. Зниження  $K_{ec}$  ілюструє термостимульоване розчинення полімеру в рідині, наслідком якого і є погіршення електрофізичних характеристик компонентів просоченого плівкового діелектрика. Таким чином, вивчення  $K_{ec}$  є прямим методом оцінки стану діелектричної системи. Аналіз зміни відносного світлопропускання просочуючих рідких середовищ може бути інформативним і практично корисним при порівняльних дослідженнях різних плівкових просочених діелектриків, а також для проведення експрес-діагностики стану плівкової просоченої ізоляції в ході ресурсних випробувань високовольтних імпульсних конденсаторів.

Виявлено істотне зниження короткочасної електричної міцності просочуючих рідин комбінованих діелектричних систем високовольтних імпульсних конденсаторів у результаті термостаріння. Спостерігається загальна тенденція – для поліметилсилоксанової рідини короткочасна електрична міцність знижується в 2,7 разів порівняно з вихідним матеріалом після 300 годин старіння, а середня короткочасна електрична міцність трансформаторного масла зменшується за той же час термовпливу майже в 2 рази. Виявлено, що виникнення електричних розрядів в поліметилсилоксановій рідині є причиною різкого зниження її короткочасної електричної міцності.

Встановлено, що морфологія поверхні поліпропіленової плівки сильно впливає на процес розчинення плівки в електроізоляційній рідині. Наявність на поверхні мікрокапілярної системи (шорстка плівка) робить цей процес більш яскраво вираженим. Розроблено основи методики для оцінювання термостабільності електроізоляційної рідини, застосування якої дозволило виявити перевагу (за термостабільністю властивостей діелектрика "поліпропіленова плівка - трансформаторне масло марки Т-1500") гладкої плівки перед шорсткою та високу термостабільність діелектрика "поліетилентерефталатна плівка - трансформаторне масло Т-1500". Виявлено взаємозв'язок зміни  $K_{ec}$  просочуючої рідини – трансформаторного масла марки Т-1500 зі зміною коефіцієнта дестабілізації при термостарінні, а також із терміном і умовами роботи макетів високовольтних імпульсних конденсаторів з таким просоченням.

Так як запропонований метод оцінювання термостабільності рідкого діелектрика є неруйнуючим і під час стендових випробувань в конструкції корпусу конденсатора можуть бути передбачені спеціальні отвори для відбору проб рідини, то контроль за станом просочуючого складу у запропонований спосіб може здійснюватися безпосередньо в процесі роботи накопичувальних пристроїв.

# РУЙНУВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ПЛІВОК ПІД ВПЛИВОМ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ЗА УМОВ ЗАГЛУШЕННЯ ЧАСТКОВИХ РОЗРЯДІВ

А.П. Малюшевська

Інститут імпульсних процесів і технології НАН України, м. Миколаїв

Вдосконалення технологій виготовлення полімерних ізоляційних матеріалів, просочуючих рідин для плівкових діелектричних систем і виробів з цих компонентів дозволили істотно зменшити можливість виникнення часткових розрядів в діелектрику пристроїв ізоляційної техніки в процесі експлуатації, що пояснює зростання інтересу до електричного руйнування полімеру, не пов'язаного з впливом ерозії, що виникає під час розрядів у газових включеннях всередині ізоляції, проміжках між зразком і електродами, а також поверхневих розрядів. Полімерні діелектричні плівки товщиною близько десятків мікрометрів, що широко використовуються в силовому конденсаторобудуванні, можна розглядати як найбільш зручні та важливі об'єкти досліджень електричного старіння і пробою полімерів, не пов'язаного з частковими розрядами.

Виявлення факторів, що обумовлюють електричне руйнування і пробій плівкової полімерної ізоляції в усталеному електричному полі постійного струму за умов заглушення часткових розрядів, визначення характеру процесу електричного руйнування полімерних плівок є важливим науково-практичним завданням.

Була запропонована методика обмеження часткових розрядів, яка дозволяє одержувати дані про електричну міцність самого полімерного матеріалу, без урахування мікродфектів, що містяться в його об'ємі, і істотно обмежити вплив поверхневих часткових розрядів на процес розвитку передпробійних явищ у полімерному матеріалі. Виключити появу часткових розрядів в обсязі матеріалу або, принаймні, значно зменшити їхню інтенсивність простіше всього, використовуючи як об'єкти випробування плівкові полімерні діелектрики товщиною в кілька мікрометрів, яка характерна, наприклад, для діелектричних систем секцій силових конденсаторів. Істотно зменшити ймовірність потрапляння пори в міжелектродний проміжок можна також, за рахунок зменшення площі електродів. Площа сферичного електрода, у межах якої зберігається висока напруженість електричного поля, є невеликою. Відповідно, малим є і обсяг полімеру, у якому можливий пробій, тому мала й ймовірність потрапляння великої пори або дефекту плівки в цей "небезпечний" обсяг. При проведенні електричних випробувань зразків полімерної діелектричної плівки використовувалися електродні системи типу "сфера-сфера". Як сферичні електроди використовувалися мосяжеві кулі діаметром 5 мм, відполіровані до 12 - 14 класу точності. Якщо розташувати таку електродну систему, із установленим у ній зразком плівки, у рідкому діелектрику, наприклад, трансформаторній оливі, можна повністю усунути крайові розряди.

Використання описаної методики дозволило експериментально підтвердити кінетичний характер пробою полімерних діелектричних плівок мікронної товщини, який обумовлений існуванням підготовчої стадії, що визначає довговічність зразка в електричному полі. Показано, що на цій стадії в локальних областях зразка полімерної плівки, де напруженість електричного поля перевищує середні значення, відбувається розпад макромолекул полімеру, ініційований електричним полем. Визначено кінетичні закономірності електричного пробою різних плівкових полімерних діелектриків у постійному електричному полі за умов обмеження часткових розрядів. Встановлено, що електрична довговічність полімерних плівок мікронної товщини експоненціально зменшується при збільшенні середньої напруженості поля. Оцінка електричної міцності досліджених полімерних плівок на підставі визначення їхньої довговічності дозволяє розглядати плівку поліпропілену, як найбільш електрично міцну в умовах випробувань при заглибленні часткових розрядів.

Експериментально перевірена гіпотеза про оборотність змін, що накопичуються під впливом електричного поля в полімерних плівках. Показано, що витримка зразків плівки в постійному електричному полі знижує їх довговічність у випадку подальшої дії поля тієї ж полярності, і підвищує довговічність при наступному впливі на зразки електричного поля протилежної полярності. Це спостереження дозволяє більш детально судити про елементарні процеси, які готують руйнування, і є непрямим підтвердженням гіпотези про формування в полімерному діелектрику об'ємних зарядів. У прикладному аспекті глибоке дослідження явища регенерації дефектів, що накопичуються, може стати основою для методу підвищення працездатності електротехнічних конструкцій.

Для розгляду процесів електричного старіння полімерів необхідним є встановлення залежностей, що зв'язують напруженість внутрішніх локальних електричних полів, які діють на макромолекулу полімеру та ініціюють розрив межмолекулярних зв'язків, з величиною прикладеної до зразка напруги. Вивчення такого взаємозв'язку є завданням подальших досліджень.

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПЛАЗМЫ В ПРОЦЕССЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО РАЗРЯДА В ВОДЕ

В.М. Косенков

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев

**Введение.** Электрический разряд в воде находит широкое применение в различных областях науки и техники. Однако многие его характеристики по-прежнему остаются недостаточно исследованными. Это связано с проблемами их определения, обусловленными кратковременностью происходящих явлений, высоким давлением и температурой, а также мощным электромагнитным импульсом, создающим большие помехи в измерительных приборах. Математическое моделирование электрического разряда в воде позволяет исследовать процессы, происходящие в канале разряда и восполнить пробелы экспериментальных исследований, но требует использования ряда замыкающих физических соотношений. Из них наиболее проблематично определение электропроводности плазмы, заполняющей канал разряда. Электрическое сопротивление канала можно определить по осциллограммам напряжения и силы тока, однако, для вычисления электропроводности плазмы необходимо измерить изменение площади поперечного сечения канала в процессе его расширения, что, как правило, составляет большую проблему.

Существует несколько способов вычисления электропроводности плазмы и электрического сопротивления канала разряда в воде. В большинстве исследований активное сопротивление канала разряда вычисляют как сопротивление проводника с током, используя эмпирические функции от силы тока и времени. В этом случае нет необходимости вычислять электропроводность плазмы и объём канала разряда, но такой подход к моделированию ограничен диапазоном экспериментальных данных, на основе которых эмпирические функции определены. В других исследованиях полагают, что средняя по сечению канала электропроводность плазмы пропорциональна плотности её внутренней энергии. Связь между ними определяют с помощью искровой постоянной. В этом случае увеличивается универсальность полученных соотношений, однако их достоверность ограничивается четвертью периода колебаний тока в цепи. В ряде работ определяют электропроводность плазмы и сопротивление канала разряда. Предполагая, однородность свойства плазмы в объёме канала. Полученные результаты имеют оценочный характер. В ряде работ учитывается радиальная неоднородность плазмы в канале разряда, используя широкодиапазонное уравнение состояния воды и зависимость удельной электропроводности плазмы от её плотности и температуры, но, при этом, не учитывается неравномерность расширения канала вдоль его оси.

Отмеченные недостатки предыдущих исследований свидетельствуют об актуальности дальнейшего совершенствования математической модели электрического разряда в воде. Поэтому целью данной работы было определение уравнений математической модели, адекватно описывающих изменение электропроводности плазмы и сопротивления канала в процессе электрического разряда в воде.

**Постановка задачи.** Ранее активное сопротивление канала разряда вычисляли как сопротивление проводника с током, имеющим постоянную площадь поперечного сечения по его длине ( $S_{ch}$ ). Допущение о постоянстве  $S_{ch}$  вдоль канала справедливо только в начале активной стадии разряда или когда он происходит между электродами с плоскими торцами большого диаметра в результате инициирования проводником очень малого диаметра. В остальных случаях это предположение неоправданно, т.к. канал разряда неравномерно расширяется по его длине, что приводит к существенному изменению его формы и, соответственно,  $S_{ch}$ . В этом случае сопротивление канала можно определить как сумму сопротивлений последовательно соединённых проводников бесконечно малой длины ( $dz$ ).

Канал разряда в воде заполняет плазма, свойства которой существенно отличаются от идеальной. Поэтому невозможно непосредственно воспользоваться известными формулами для определения её удельной электропроводности, такими как формула Спитцера, учитывающая электрон-ионные столкновения в полностью ионизованной плазме и формулой учитывающей электрон-атомные столкновения частиц в неполностью ионизованной плазме. Удельную электропроводность плазмы в канале электрического разряда в воде можно описывать в виде комбинации формул, используя эмпирические функций  $f_{ei}(\Gamma_D)$  и  $f_{ea}(d_i)$ , зависящие от параметра неидеальности плазмы и степени её ионизации. Основная задача данной работы состоит в определении функций  $f_{ei}(\Gamma_D)$  и  $f_{ea}(d_i)$  из условия согласования результатов, полученных с помощью математического моделирования, с экспериментальными данными.

**Математическая модель.** Разработанная математическая модель электрического разряда в воде содержит: уравнение баланса напряжений, полученное по схеме замещения для разрядного контура; уравнения баланса частиц плазмы в канале разряда; уравнения Саха, используемое для вычисления концентрации электронов; уравнение состояния плазмы в приближении идеального газа; уравнение баланса энергии в канале разряда и уравнения гидродинамики сжимаемой жидкости в потенциальном приближении. Определение функций  $f_{ei}(\Gamma_D)$  и  $f_{ea}(d_i)$  выполнено на основе сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными.

**Заключение.** Полученные результаты свидетельствуют, что разработанная математическая модель адекватно описывает изменение электропроводности плазмы, и сопротивления канала в процессе электрического разряда в воде, с учётом существенного отличия формы канала разряда от цилиндрической.

# ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕСКОЛЬКИХ ВОДНЫХ РАЗРЯДНЫХ ПРОМЕЖУТКОВ СОЕДИНЕННЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО

В.М. Бычков, А.В. Иванов

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев

Оказывать воздействие на объект обработки при электрогидравлическом эффекте возможно перемещая электродную систему в пространстве. Если система многоэлектродная, тогда можно воздействовать единичными импульсами, меняя очередность срабатывания электродных пар. В литературе приводятся различные схемы реализации многоэлектродных систем, одной из которых является подключение нескольких каналов разряда последовательно к одному генератору импульсных токов. В работах приводятся описания различных устройств с последовательно соединенными каналами разряда: для электрогидравлической штамповки, прессования порошков, получения высоких и сверхвысоких давлений.

В рассмотренных работах не приведены энергетические характеристики каналов разряда, что не позволяет разрабатывать научно-обоснованные рекомендации к проектированию, разработке и созданию разрядно-импульсных технологий на основе последовательных электродных систем. Поэтому, актуальной научно-технической задачей является исследование энергетических характеристик нескольких водных разрядных промежутков соединенных последовательно.

Цель работы: экспериментально определить возможность целенаправленного распределения энергетических характеристик разряда на три электродные системы, соединенные последовательно.

Описание экспериментального стенда и оборудования

Эксперименты были проведены на стенде с тремя последовательными промежутками соединенными последовательно. Напряжение измеряли тремя емкостными делителями, а силу тока коаксиальным шунтом. Индуктивность контура на трех разрядных промежутках составила 7,5 мкГн. Емкость конденсаторной батареи составляла 1 и 2 мкФ. Напряжение заряда составляло от 25 до 27,5 кВ. Для регистрации сигналов использовали четырехканальный осциллограф Tektronix TDS 2024В подключенный через источник бесперебойного питания.

Длины разрядных промежутков для различных серий опытов составляли: три по 3 мм, один разрядный промежуток длиной 9 мм. Также были рассмотрены варианты с длинами каналов разряда 5 мм, 4 мм, 3 мм и 3 мм, 4 мм, 5 мм. Использована электродная система стержень плоскость. Разряд не инициировался. Диаметр электрода составлял 3 мм, диаметр плоскости 10 мм, выступающая часть электрода составляла 1 мм.

После регистрации осциллограмм тока и напряжения обработка результатов проводилась в пакете Microsoft Excel. Выделившаяся энергия подсчитывалась путем численного интегрирования кривой мощности.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Была проверена возможность реализации разряда на двух последовательных каналах разряда. После получения предварительных данных были проведены эксперименты на трех последовательных разрядных промежутках.

Эксперименты показали, что энергия, которая выделяется на трех последовательных разрядных промежутках по 3 мм сопоставима с энергией, которая выделяется на одном разрядном промежутке длиной 9 мм (157 и 169 Дж соответственно). Энергия в трех каналах начинает выделяться одновременно.

На третьем канале наблюдается самое меньшее выделение энергии при использовании схем 5-4-3 и 3-3-3, при этом в первом и втором каналах разряда выделялось приблизительно одинаковое количество энергии. При схеме 3-4-5 наименьшее количество энергии выделялось в первом и в третьем разрядных промежутках.

Выводы

Экспериментально определена возможность целенаправленного распределения энергетических характеристик разряда на три электродные системы, соединенные последовательно, что расширяет технологические возможности процессов обработки материалов в разрядных камерах сложной геометрии.

При различных вариантах длин последовательно соединенных разрядных промежутков электрические характеристики разнятся. При этом сумарные потери на формирование каналов практически одинаковые и равны потерям при разряде на один канал, длина которого равна сумме длин трех промежутков.

При схеме 3-4-5 наименьшее количество энергии выделялось в первом и в третьем канале разряда. В схеме 5-4-3 наименьшее количество энергии выделялось в третьем канале разряда, тогда как в первом и втором канале разряда количество выделившейся энергии сопоставимо.

# ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ КАЛИБРОВКЕ

Н.В. Старков, Л.И. Стрелковская

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев

Высокопрочные стали в последние годы стали предметом исследования как предприятий их использующих, так и научных учреждений, которые изучают их свойства в технологических процессах обработки и, особенно, в листовой штамповке. Это можно объяснить тем, что наибольшее распространение эти стали нашли в листоштамповочном производстве, для которого они собственно и создавались.

Одной из особенностей этих сталей считается их значительное деформационное упрочнение и, как следствие, возникающее после деформирования деталей упругое пружинение, которое часто превышает допустимые для каждого конкретного случая значения.

Исследования процесса ЭГ калибровки проводились на деталях, относящихся к классу кузовных автомобильных деталей, которые после сборки автомобиля обеспечивают его общую прочность и жёсткость.

Это в основном детали в виде длинного рифта, который в поперечном сечении имеет «Ω» образный профиль. Такие детали отличаются значительным пружинением как в поперечном, так и в продольном направлениях, устранение которого представляет собой сложную технологическую задачу.

Теоретический анализ процессов калибровки раскрывает механизм изменения напряжённо-деформированного состояния материала под действием импульсной нагрузки. Однако теоретически трудно предвидеть результат калибровки, особенно, если используются разные технологические схемы процесса. Различные технические решения при создании оборудования, штамповой оснастки или схем реализации процесса могут дать результаты, которые будут сильно отличаться между собой. По этой причине представляет интерес выполнить анализ наиболее используемых и новых технологических и технических решений, определить их эффективность в разных условиях ЭГ калибровки.

Полученные ранее результаты ЭГ калибровки деталей из высокопрочной стали СР800 использовали схему прямого импульсного нагружения деталей в разрядной камере малого объёма с высокой удельной энергией разряда в жидкости, которая достигала 40 Дж/см<sup>3</sup>. Такая, и даже большая энергия, достижима в современных ЭГ установках, но вопрос состоит в том, что эта энергия быстро разрушает инструмент, с помощью которого она выделяется в разрядной камере – рабочий электрод.

По этой причине нельзя идти по пути увеличения энергии разряда, а необходимо искать такие технологические и конструктивные решения, которые позволяют калибровать детали из высокопрочных сталей при относительно низкой энергии разряда, сохраняя при этом работоспособность инструмента.

Опытные образцы, которые использовались в исследованиях, имели сложную пространственную конфигурацию и представляли собой листы с продольными рифтами разной глубины. Для таких деталей представляют интерес технологические схемы, которые предусматривают калибровку прямым импульсным воздействием на деталь, калибровку с метанием жидкости и калибровку с малой пластической деформацией. Следует заметить, что ни одна из схем не является универсальной по отношению к деталям, которые отличаются формами и размерами.

Задача этих исследований состояла в том, чтобы экспериментальным путём оценить эффективность этих схем процесса калибровки и выбрать такую, при которой качество процесса достигается при меньших энергетических затратах.

В результате исследований удалось установить, что наиболее эффективной является схема ЭГ калибровки с малой, до 1%, пластической деформацией, позволяющей в 2,2 раза снизить энергию разряда и повысить точность процесса. Эта схема на практике может быть реализована, если ввести корректировку формы детали, учитывающей дополнительную пластическую деформацию при ЭГ калибровке.

Две другие схемы могут использоваться в тех случаях, когда ЭГ калибровка достигается при однократном разряде, что во многих случаях вполне достаточно и осуществимо.

# ИЗМЕРЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ДАВЛЕНИЙ, ГЕНЕРИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ВЗРЫВОМ В ЖИДКОСТИ, С ПОМОЩЬЮ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДНОГО ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ

В.Г. Жекул, А.П. Смирнов, Э.И. Тафтай, О.В. Хвощан, И.С. Швец  
Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины г. Николаев

Электрический взрыв в жидкости уже давно эффективно используется в разнообразных сферах человеческой деятельности: нефтедобывающей промышленности, машиностроении, металлургии и для утилизации, при обработке материалов, для получения новых материалов с заданными свойствами и в других областях. Для большинства электроразрядных технологий основным фактором, определяющим ее эффективность, является волна давления, которая генерируется электрическим взрывом в жидкости. Поэтому для оценки и повышения эффективности использования электроразрядных технологий, выбора технологических режимов работы электроразрядных установок необходимо предварительно проводить экспериментальные исследования, которые включали бы в себя и определения параметров волн давления. Это невозможно без использования датчиков импульсного давления.

Проведенный анализ показал, что датчики импульсного давления при электрическом взрыве в жидкости помимо соответствия датчика по своим техническим характеристикам (по амплитуде и временным характеристикам исследуемого сигнала) должны удовлетворять ряду специфических требований к основным из которых следует отнести: устойчивость к "токовой помехе", возникающей из-за электромагнитных наводок от высоковольтного контура; возможность его применения при повышенных гидростатических давлениях (особенно актуально при проведении исследований связанных с электроразрядной технологией интенсификации добычи нефти) и в закрытых объемах жидкости (так как многие электроразрядные технологии реализуются именно в закрытых объемах жидкости), что в свою очередь накладывает ряд требований на его конструктивное исполнение.

Выполненный маркетинговый анализ показал, что на современном рынке импульсных датчиков давления отсутствует продукция, которая полностью удовлетворяла бы всем вышеперечисленным требованиям. В связи с этим в Институте импульсных процессов и технологий был разработан пьезоэлектрический волноводный датчик импульсного давления ДТХ-1, с пьезоэлементом выполненным из ЦТС-19, ГОСТ 13927-74. Отличительной особенностью разработанного датчика давления является большая чувствительность, благодаря которой датчиком генерируется полезный сигнал амплитудой от десятков до сотен вольт (примерно на два порядка больше в сравнении с серийно выпускаемыми датчиками давления DPX 101-5K ("OMEGA", США) и PS-02(ООО "ГлобалТест", Россия)). Благодаря этому уровень полезного сигнала более чем на порядок превышает уровень "токовых наводок". Так как сигнал такой амплитуды представляет опасность для регистрирующего осциллографа, то для снижения его уровня был разработан специальный измерительный тракт.

Конструкция и схемное решение датчика допускает его использование в диапазоне гидростатических давлений (0,1-20) МПа, температур (10-80) °С. Кроме того, благодаря использованию прокладки из вибродемпфирующего материала происходит ослабление амплитуды волны давления. Это допускает измерение волн давления с амплитудой до 150 МПа. А использование прокладки из диэлектрического материала с высокой электрической прочностью позволяет избежать электрического контакта между корпусом датчика с приемным доньшком-мембраной и пьезоэлементом. В качестве материала для вибродемпфирующей прокладки использовался паронит ПМБ ГОСТ 481-80, а в качестве диэлектрического материала -полиэтилентерефталат ПЭТ-Э ГОСТ 24234-80. В свою очередь конструкция корпуса датчика давления ДТХ-1 допускает его размещение на стенке герметичных разрядных камер, что позволяет его использование при исследованиях в закрытых объемах.

Тарировка разработанного датчика давления ДТХ-1 осуществлялась путем сравнения тарировочных (опорных) импульсов давления с сигналами, полученными с помощью датчика ДТХ-1. По результатам сравнения выполнялся расчет коэффициента чувствительности датчиков. В качестве тарировочных импульсов давления использовались данные, полученные с помощью вторичного эталона (датчика давления DPX 101-5K) при следующих параметрах установки: зарядное напряжение конденсаторной батареи – 15 кВ; емкость конденсаторной батареи - 2,26 мкФ; индуктивность цепи – 4,29 мкГн. При данных параметрах контура удалось отделить во времени "токовую помеху" и полезный сигнал датчика DPX 101-5K. Инициирование разряда осуществлялось медным проводником диаметром 0,14 мм и длиной 50 мм, что повышало стабильность амплитуды волны давления. Гидростатическое давление в камере поддерживалось на уровне 10 МПа, что исключало наличие в жидкости газовых включений.

Разработанный датчик давления ДТХ-1 прошел апробацию при выполнении ряда международных научно-исследовательских работ. При этом с его помощью исследовались волны давления, которые генерировались как "свободным" искровым электрическим разрядом в жидкости, так и волны давления, источником которых служил электрический взрыв металлического проводника. Образец датчика для измерения давления воздействующего на породы-коллектора нефтяных скважин с целью изменения структуры и фильтрационных свойств был поставлен исследовательскому центру во Франции.

# ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ ПЕРЕХОДНОЙ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОЙ ЗОНЫ $\text{CuAl}_2$ НА ТВЕРДОСТЬ МАТЕРИАЛА СИСТЕМЫ Al-Cu

А.Д. Зайченко, Н.С. Присташ

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины г. Николаев

Во всем мире большое внимание уделяется металлургии алюминия, его сплавам и композитам системы Al-Cu. По масштабам добычи и применения алюминий занимает второе место после железа, а сплавы на основе алюминия с добавлением Cu, полученные литьем, имеют высокие показатели электропроводности, твердости и прочности благодаря образующейся интерметаллидной фазе  $\text{CuAl}_2$ , и хорошо работают в условиях жидкого трения при высоких нагрузках и больших скоростях, однако технология их изготовления имеет определенные трудности, которые можно преодолеть применяя методы порошковой металлургии.

В литературных источниках рассматривают возможность синтеза композита системы Al-Cu методом изостатического прессования при температуре  $400^\circ\text{C}$  и давлении 40 МПа с дальнейшей выдержкой при температуре 500 -  $600^\circ\text{C}$  в течении 360 минут. Синтезированный композиционный материал рекомендуют к использованию в качестве электроконтактов скольжения.

Также известно, что применение для получения компактов системы Al-Cu метода искро-плазменного спекания (ИПС) позволяет уменьшить время и температуру консолидации. Так же исследования фазовых превращений в смеси состава 78 % Al - 22 % Cu при консолидации в диапазоне температур 400 -  $525^\circ\text{C}$  в течении 10 мин при давлении 30 МПа показали возможность синтеза интерметаллида  $\text{CuAl}_2$ . Однако кинетика структурообразования материалов систем Al - Cu в условиях искро-плазменного спекания, а также влияние толщины переходной интерметаллидной зоны  $\text{CuAl}_2$  на твердость материала изучены не достаточно.

В качестве элементарных порошков для изучения влияния толщины переходной интерметаллидной зоны  $\text{CuAl}_2$  на твердость материала использовались порошки Al, Cu (60 % частиц менее 20 мкм) в смеси состава 75 % Al - 25 % Cu.

Консолидацию выполняли в вакууме на универсальном экспериментальном комплексе "ГЕФЕСТ", который основан на пропускании через порошок суперпозиции постоянного и пульсирующего тока с частотой 10 кГц при рабочем напряжении  $U = 2 \text{ В}$ .

Спекание осуществляли в матрицах из графита МПГ 6 с внутренним диаметром 10 мм, куда засыпали 2 г порошковой смеси. Порошок засыпали послойно для исследования интерметаллидного переходного слоя. Измерение температуры образца осуществлялось на стенке матрицы ( $\Delta T$  между наружной поверхностью матрицы и образцов варьировалась в диапазоне от 150 до  $250^\circ$ ) при помощи стандартной термопары К-типа. Давление подпрессовки составляло ~ 30 МПа, а давление спекания ~ 60 МПа.

Температура консолидации составляла 500 -  $600^\circ\text{C}$ , время выдержки - 20, 40, 80 и 120 мин при давлении 60 МПа для изучения кинетики образования переходного слоя при твердофазном спекании двухкомпонентных порошковых смесей.

Анализ микроструктуры полученных компактов проводился согласно ДСТУ ISO 643:2009 на микроскопе "БИОЛАМ-И". Для выявления зеренной структуры алюминия применяли реагент Келлера (1 %-ный раствор NaOH и 0,5 %-ный раствор плавиковой кислоты). Для выявления фазы  $\text{CuAl}_2$  применяли 20 %-ный водный раствор  $\text{HNO}_3$ .

Для компактов проводилось исследование твердости по Виккерсу при нагрузке 5 кг, согласно ДСТУ ISO 6507-1:2007, а поскольку полученные материалы имели отчетливую переходную зону между частицами Al и Cu, был применен метод определения микротвердости, который позволил оценить твердости отдельных фаз Cu, Al и  $\text{CuAl}_2$  согласно ГОСТ 9450-76 на приборе ПМТ-3.

В результате консолидации порошковой смеси состава 75 % Al - 25 % Cu в течение 20 мин было установлено, что в выбранном режиме между частицами алюминия и меди начинают происходить диффузионные процессы, которые приводят к образованию двухслойной области переходной зоны: эвтектики  $\alpha$  (Al) -  $\text{CuAl}_2$  и интерметаллид  $\text{CuAl}_2$ . Толщина зоны  $\text{CuAl}_2$  зависит от времени выдержки и увеличивается с 1 мкм до 6 мкм при 80 минутах консолидации. Дальнейшее увеличение времени выдержки приводит к растворению  $\text{CuAl}_2$  в алюминии и уменьшению толщины его слоя до 2 мкм при 120 мин выдержки.

Микротвердость слоя  $\text{CuAl}_2$  составляет ~ 5 ГПа, микротвердость алюминия ~ 0,4 ГПа, а меди ~ 0,5 ГПа очевидно, что увеличение толщины слоя интерметаллида оказывает влияние и на общую твердость всего компакта. Так увеличение толщины слоя  $\text{CuAl}_2$  с 1 мкм до 6 мкм, позволяет увеличить твердость компакта по Виккерсу с 330 МПа до 870 МПа.

## ЭРОЗИЯ АНОДОВ ЭЛЕКТРОДНЫХ СИСТЕМ ПРИ ВЫСОКОВОЛЬТНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ РАЗРЯДЕ В ВОДЕ

В.Г. Жекул, В.В. Литвинов, А.П. Смирнов, Э.И. Тафтай, О.В. Хвошан, И.С. Швец  
Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины г. Николаев

Электроразрядные технологии используются во многих отраслях хозяйственной деятельности: получение новых материалов, электрогидроимпульсная штамповка, повышение дебита добывающих скважин, обработка материалов и других. Для их реализации используются различные электроразрядные устройства. Одним из наиболее важных элементов электроразрядных устройств является электродная система. Ее стабильная работа на заданном технологическом режиме обеспечивает эффективное, долговечное и безаварийное функционирование всего устройства в целом и его элементов в частности.

Работа электродной системы сопровождается электроискровой эрозией ее анода. В результате происходит увеличение рабочего межэлектродного промежутка. Это отрицательно сказывается на эффективности электроразрядного воздействия на различные материалы, так как приводит к отклонению от оптимальных режимов обработки. Кроме того увеличение межэлектродного промежутка может привести к выходу из строя электроразрядного устройства или его элементов. В связи с этим работы по исследованию эрозии анода электроразрядных устройств имеют практическое и научное значение. Их результаты позволяют спрогнозировать эрозию анода в процессе работы для его своевременной замены. Особенно это важно и актуально для электроразрядных устройств обработки призабойных зон скважин с целью повышения их дебита, которые работают в условиях повышенных гидростатических давлений. Поэтому целью данной работы является определение влияния параметров разрядного контура и рабочей среды на массовую эрозию анода при высоких давлениях, соответствующих условиям нефтедобывающих скважин.

Для достижения поставленной цели использовался метод физического моделирования. Была разработана методика проведения экспериментальных исследований массовой эрозии анода при высоковольтном разряде в воде. Под массовой эрозией анода понималась потеря массы анода за один электрический разряд в воде. Использование разработанной методики позволило определить основные факторы, определяющие массовую эрозию анода, при электрическом разряде в воде и исследовать влияние различных параметров разрядного контура (зарядного напряжения, запасенной энергии, длины межэлектродного промежутка) и внешних условий (гидростатическое давление, удельная электропроводность рабочей жидкости) на ее величину. Экспериментальные исследования проводились на анодах выполненных из стали марки Ст 20, а также меди марки М2 и сплава АМг6 при следующих начальных параметрах: емкость конденсаторной батареи 2 мкФ и 5 мкФ; зарядное напряжение 26 кВ и 30 кВ, гидростатическое давление от 0,1 МПа до 20 МПа; удельная электропроводность жидкости от 0,5 См/м до 0,2 См/м; межэлектродный промежуток 18 мм, 24 мм и 30 мм; диаметр анода 4 мм.

Выполненный корреляционный анализ полученных экспериментальных результатов позволил установить, что основным фактором, который определяет величину массовой эрозии анода конкретного материала при электрическом разряде в воде, являются интеграл модуля разрядного тока - отмечается сильная теснота связи с коэффициентом корреляции 0,915. Также было отмечено влияние на величину эрозии среднего значения разрядного тока (коэффициент корреляции 0,733), максимальной мощности (0,707), полезной энергии разряда (0,818) и переноса заряда (0,825).

Изменение параметров разрядного контура и внешних условий приводит к изменению формы разрядного тока, что в свою очередь приводит к изменению интеграла модуля разрядного тока.

Так анализ экспериментальных результатов показал, что:

- увеличение межэлектродного промежутка и повышение удельной электропроводности рабочей жидкости приводит к уменьшению величины массовой эрозии анода при электрическом разряде в воде с неизменными параметрами разрядного контура;

- увеличение запасенной энергии разряда приводит к повышению величины массовой эрозии анода;

- при повышении гидростатического давления до определенного уровня (примерно 5 МПа) происходит уменьшение массовой эрозии анода. Последующий рост гидростатического давления не оказывает существенного влияния на массовую эрозию анода.

Сравнение величины массовой эрозии анодов, выполненных из разного материала показало, что при одинаковых начальных условиях эксперимента наибольшей эрозионной стойкостью обладает стальной анод (в сравнении с анодами, выполненными из сплавов М2 и АМг6).

На основании полученных экспериментальных результатов в дальнейшем планируется разработка полупырической расчетной методики, которая позволит оценить массовую эрозию анода в зависимости от начальных параметров разрядного контура и внешних условий.

# ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ З КОМБІНОВАНИМ РЕЖИМОМ РОБОТИ ДЛЯ СИНТЕЗУ НАНОВУГЛЕЦЮ З ГАЗОПОДІБНИХ ВУГЛЕВОДНІВ

Д.В. Вінниченко, А.В. Золіна, Н.С. Назарова  
Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв

Отримання нановуглецевих матеріалів є дуже важливою проблемою, тому що вуглецеві наноматеріали мають унікальні властивості, які зумовлені впорядкованою структурою їх нанофрагментів. Саме через це дослідження способів синтезу нановуглецю з заданою структурою або з заданою чистотою отриманого продукту і т.п. є актуальними. Більшість існуючих методів отримання нановуглецевих структур мають недоліки за якістю і продуктивністю. На сьогодні інтенсивно розвиваються способи отримання вуглецевих наноматеріалів за допомогою електророзрядної обробки вуглецевмісних газів.

В Інституті імпульсних процесів і технологій НАН України розроблено високочастотний метод синтезу нановуглецю при безпосередньому впливі на газоподібні вуглеводні високовольтними імпульсними розрядами з частотою проходження в кілогерцовому діапазоні. При цьому методі, завдяки великій швидкості введення енергії в плазмовий канал, забезпечуються високі градієнти температур і тисків, які є необхідними умовами синтезу.

Метою роботи є розробка джерела живлення з комбінованим режимом роботи, яке зможе підтримувати пробій міжелектродного проміжку та розряд із стабілізованим струмом, які необхідні для синтезу нановуглецю з газоподібних вуглеводнів.

Проведено аналіз особливостей побудови високовольтних високочастотних джерел живлення. На початку проектування імпульсного джерела живлення вибрали базову топологію, яка забезпечить високу потужність (більше 1 кВт). Тому у даному джерелі живлення запропоновано для використання мостову (full-bridge) схему та гальванічну розв'язку первинних та вторинних кіл, в якій максимальна напруга досягає одиночного рівня напруги живлення між силовими електродами навантаження, що знизить струми на силових електродах транзисторів та знизить вдвічі максимальну напругу на силових ключах, при тій же потужності, у порівнянні з пуш-пульною та напівмостовою схемами.

Проведено дослідження залежності пробивної здатності джерела живлення від довжини розрядного проміжку в середовищі газоподібних вуглеводнів. Для розрахунку параметрів джерела живлення потрібно дізнатися яку вихідну напругу воно має забезпечувати. Аналізи експериментальних даних та експериментів показали, що у газовому середовищі пробивна здатність джерела живлення повинна складати не менше 2 кВ/мм і що робоча напруга на каналі розряду в газовому середовищі значно менша ніж напруга, яка потрібна для пробію міжелектродного проміжку.

Використано високовольтний імпульсний трансформатор як елемент розрядного кола у кілогерцовому діапазоні розрядної частоти. В роботі досліджено поведінку двухобмоточного високовольтного імпульсного трансформатора на основі повної та спрощеної математичної моделі. Дослідження власної частоти високовольтного трансформатора показали, що вона знаходиться в кілогерцовому діапазоні. Тобто на власних параметрах трансформатора можна побудувати резонансний контур, а розрядне навантаження приєднується паралельно паразитній ємності трансформатора. Вихідна характеристика такого джерела живлення при резонансній частоті комутації ключів інвертора повинна відповідати характеристиці джерела струму. Таке джерело живлення буде забезпечувати стабілізований струм, а при великому опорі навантаження – велику напругу.

Виконано моделювання характеристик розрядного струму за допомогою імітаційної моделі. Розроблено імітаційну модель системи живлення, в середовищі LTSpice IV на основі мостового інвертора напруги, як джерела прямокутної напруги для випадку резонансної частоти і коефіцієнта приведенного навантаження  $0,5 < k < 4$ . Мостовий інвертор напруги складається з ключів (S1-S4) та зворотно паралельних ним діодів (D1-D4). Послідовний резонансний контур складається з 5 дискретних індуктивностей (L4-L8), індуктивності розсіювання трансформатора (L2) та еквівалентної ємності вторинної обмотки (C1). З метою дослідження роботи перетворювача на різних частотах керування силовими ключами мостового інвертора напруги, використовуються індуктивності L4-L8.

Результати моделювання показали стабілізацію струму при зміні коефіцієнта приведенного навантаження в широких межах, а також підвищення напруги до рівня пробію газового проміжку, що підтверджує теоретичні результати.

**Висновки.** В електричному колі навантаження мостового інвертора трансформатор утворює резонансний контур, що доцільно використовувати для забезпечення необхідного для синтезу нановуглецю комбінованого режиму роботи джерела живлення. Результати моделювання роботи перетворювача на основі мостового інвертора напруги з підвищуючим трансформатором показали стабілізацію струму при зміні коефіцієнта приведенного навантаження в широких межах, а також підвищення напруги до рівня пробію газового проміжку, що підтверджує теоретичні результати. В результаті проведених досліджень розроблено джерело живлення з комбінованим режимом роботи, яке зможе підтримувати пробій міжелектродного проміжку та розряд із стабілізованим струмом, які необхідні для синтезу нановуглецю з газоподібних вуглеводнів.

# ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫМ ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ ИСТОЧНИКОМ ПИТАНИЯ ГАЗООЧИСТНЫХ КОМПЛЕКСОВ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Л.З. Богуславский, Л.Е. Овчинникова, С.С. Козырев  
Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев

Действующие на данный момент в Украине газоочистные системы тепловых электростанций и других промышленных объектов не обеспечивают соблюдения европейских нормативных требований по уровню выбросов твердых частиц. Отсутствует также очистка от таких вредных газовых выбросов, как  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{CO}_x$ , превышающих нормы ЕС во много раз. Энергопотребление действующих систем электрофильтрации в 5-6 раз превосходит аналогичные показатели развитых стран. Для обеспечения выполнения европейских требований к газовым выбросам и повышения эффективности существующих электрофильтров без их капитальной реконструкции разработан способ, использующий дополнительные импульсные высоковольтные высокочастотные источники питания, формирующие импульсы напряжения специальной формы, которые обеспечивают как осаждение пыли, в результате дозарядки, так и эффективную деструкцию экологически опасных составляющих газовых выбросов. Комплексные системы электрофильтрации экологически опасных промышленных выбросов могут обеспечить эффективное осаждение высокоомных пылей и деструкцию экологически опасных газовых выбросов с помощью дополнительных управляемых импульсных источников питания, генерирующих высоковольтные высокочастотные импульсы, количество и параметры которых должны соответствовать количеству и величине долей весомых составляющих промышленных выбросов. Для обеспечения такого соответствия необходима разработка интеллектуальной системы управления импульсными источниками питания.

Целью работы является исследование экологически опасных промышленных газовых выбросов как объекта обработки а также импульсных высоковольтных высокочастотных источников питания как объекта управления для определения координат вектора состояния, выбора информационных входных координат и каналов управляющих воздействий с целью создания интеллектуальной системы управления, позволяющей варьировать параметры импульсов напряжения в процессе осаждения разноимпедансных пылевых частиц и деструкции экологически опасных составляющих в зависимости от текущего состава и весовых долей промышленных газовых выбросов.

Проведены экспериментальные исследования экологически опасных промышленных газовых выбросов как объекта обработки и импульсного высоковольтного высокочастотного источника питания как объекта управления, состоящего из  $N$  генераторов высоковольтных импульсов с наносекундным фронтом. На основании проведенных исследований определены информационно эффективные и аппаратно определяемые выходные координаты генератора высоковольтных импульсов: амплитуда импульса, длительность импульса, крутизна фронта импульса, частота следования импульсов. В качестве каналов управляющих воздействий определены входы регуляторов напряжения и формирователей импульсов генераторов высоковольтных импульсов, входящих в состав дополнительного высоковольтного импульсного источника питания системы электрофильтрации. В результате построена архитектура интеллектуальной системы управления процессом очистки газовых выбросов.

База знаний интеллектуальной системы управления может быть сформирована по результатам экспериментальных исследований на созданных макетных образцах высоковольтного оборудования комплексных систем электрофильтрации. Для получения множества законов управления необходимо установить значения параметров импульсов, необходимые для осаждения разноимпедансных пылевых частиц и деструкции экологически опасных составляющих промышленных выбросов, при различных сочетаниях составных элементов и их весовых долей, что является основой для синтеза адаптивного алгоритма управления и формирования базы знаний.

Разработан адаптивный алгоритм работы интеллектуальной системы управления импульсным высокочастотным источником питания системы электрофильтрации, обеспечивающий управление параметрами импульсов генераторов, входящих в состав источника питания, в соответствии с текущим составом промышленных газовых выбросов. Это дает возможность генерировать высоковольтные импульсы с параметрами, позволяющими вести эффективную деструкцию всех экологически опасных весомых составляющих и осаждение разноимпедансных пылевых частиц в процессе обработки промышленных газовых выбросов при минимальных энергозатратах.

Реализовать синтезированный алгоритм возможно на промышленных контроллерах фирмы Atmel серии Mega (AtMega16, AtMega8535) или на контроллерах STM 32 с ядром ARM, которые обеспечивают необходимое быстродействие управления элементами системы и имеют полный набор используемых функций, дополнительные подсистемы индикации и панели ввода информации.

При обеспечении возможности изменения базы знаний созданная интеллектуальная система управления является универсальной и позволяет осуществлять адаптивное управление импульсными высоковольтными высокочастотными источниками питания комплексных систем электрофильтрации, гарантируя эффективную деструкцию всех весомых составляющих разноимпедансных газовых выбросов при минимальных энергозатратах.

## ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ КОРОННОГО РАЗРЯДА НА ПОВЕДЕНИЕ ЭЛЕКТРОДА-СТРУНЫ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРАЦИИ

Л.З. Богуславский, С.В. Чущак, В.В. Куниженков  
Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев

Проблемы пылегазоочистки промышленных выбросов с целью защиты атмосферы от загрязнения экологически опасными веществами являются актуальными. В последнее время все более широко применяется коронный объемный разряд в системах комплексной электрофильтрации. Установлено, что для возбуждения коронных объемных разрядов в электрофильтрах большое значение имеют конструктивные особенности электродных систем. При исследовании различных электродных систем, используемых в газоочистных комплексах, были выявлены различные отрицательные эффекты такие как неоднородная обработка всего объема газа в системе, обрыв электрода-струны в месте пробоя и образования дугового разряда. Для предотвращения их влияния на результаты работы газоочистных комплексов необходимо проведение дополнительных исследований этих явлений. В данном случае рассматривается недостаточно изученная коаксиальная цилиндрическая электродная система, которую в последнее время начали применять в комплексных системах газоочистки.

Целью работы является изучение особенностей использования коронного объемного разряда в коаксиальной цилиндрической системе электрофильтрации промышленных газовых выбросов, а также исследование влияния конструкции коаксиальной цилиндрической электродной системы и электромеханических процессов, воздействующих на электродную систему, в частности реактивной тяги коронного разряда, на электрод-струну и режимы электрофильтрации.

С целью проведения более глубоких исследований поведения коаксиальной цилиндрической электродной системы при ее использовании в комплексных системах электрофильтрации разработан экспериментальный стенд, который состоит из электрода-струны, выполненного из медной или нихромовой проволоки (катод) и металлического цилиндра (анод), подключенных к высоковольтному высокочастотному импульсному источнику питания. Трансформатор ГВВИ имеет коэффициент трансформации равный 277.

При подаче напряжения на коаксиальную цилиндрическую электродную систему, в пространстве цилиндра вокруг электрода-струны образуется объемный коронный разряд. При дальнейшем поднятии напряжения на электроде-струне в местах микронеровностей образуются стримеры, которые по аналогии с ионным двигателем, передают ей импульс. Идет раскачка электрода-струны с постепенным нарастанием амплитуды. Колебания электрода-струны превращаются во вращение с эллипсоидной траекторией. Кроме того, эллипс также вращается вокруг оси своего центра (оси крепления проволоки). Данный эффект был замечен при испытаниях разных типов коаксиальных цилиндрических электродных систем электрофильтров. Длина электрода-струны в электродной системе экспериментального стенда является постоянной и равна 1000 мм, однако она может меняться из-за теплового расширения. При смене полярности электродов, эффекта колебания и вращения электрода-струны не наблюдалось.

Колебания электрода-струны возникают в результате воздействия на него реактивной тяги, создающейся каждым отдельным стримером, что приводит его в колебательное движение. Однако из-за стохастичности расположения стримеров по всей рабочей поверхности электрода-струны и разнонаправленности векторов силы воздействия, колебания переходят во вращение.

В системах электрофильтрации эффект вращения электрода-струны коаксиальных цилиндрических электродных систем является паразитным, так как при больших площадях электрофильтров может возникать множество коронных стримерных разрядов, что приведет к "раскачке электрофильтра". При этом межэлектродное расстояние будет уменьшаться, что приведет к пробоям межэлектродного промежутка и образованию дугового разряда. В некоторых цилиндрических конструкциях коаксиальных электродных систем электрофильтрации, данный эффект наоборот является положительным, так как позволяет обрабатывать больший объем проходящего газа через систему, путем увеличения обрабатываемой площади поперечного сечения. Так же создаёт турбулентные потоки в системе, что позволяет, путём перемешивания газов, избавиться от эффекта "расслоения" обрабатываемого газа, когда со стороны одного электрода газ очищен, а со стороны противоположного электрода он остаётся загрязнённым.

Было проведено исследование зависимости амплитуды вращения от амплитуды подаваемого напряжения и материала электрода-струны. Результаты проведенных исследований необходимо учитывать при проектировании электродных систем электрофильтрационных газоочистных комплексов для устранения эффекта колебания и вращения электродов, который является паразитным в коаксиальных системах фильтра, так как влияет на устойчивость, работоспособность и ресурс электрофильтра.

**Выводы:** В результате проведенных исследований влияния коронного разряда на электрод-струну в системах электрофильтрации были определены зависимости амплитуды вращения электрода-струны от подаваемого напряжения и материала проволоки. Использование полученных результатов при проектировании электродных систем электрофильтров позволит избежать эффекта раскачивания электрода-струны, который отрицательно влияет на поддержание стабильного стримерного коронного разряда в применяемых конструкциях. В усиленных конструкциях коаксиальных систем исследованный эффект раскачивания электрода может существенно усилить эффективность электрофильтрации.

## УМОВИ ЗАПАЛЮВАННЯ ОБ'ЄМНОГО РОЗРЯДУ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОФІЛЬТРАЦІЇ ШКІДЛИВИХ ГАЗОВИХ ВИКИДІВ

Л.З. Богуславський, С.В. Чушак

Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв

Об'ємний розряд широко застосовується в системах комплексної пилогазоочистки екологічно небезпечних промислових об'єктів. Для збудження об'ємних розрядів у великих об'ємах в електрофільтрах необхідно перенапруження електричного поля, частота проходження імпульсів в кілогерцовому діапазоні й наносекундний фронт імпульсів. Багато питань по запаленню і підтримці стабільного об'ємного розряду на розгалужених площах вістрійкових електродів, що використовуються в промислових електрофільтрах, на сьогоднішній день залишаються відкритими і потребують проведення додаткових досліджень.

Метою роботи є вивчення особливостей використання об'ємного розряду в комбінованих системах електрофільтрації промислових викидів, дослідження впливу конструкції електродних систем, газодинамічних процесів в плазмі, зокрема швидкості газового потоку, на умови запалювання і підтримку стабільного об'ємного розряду.

При проведенні досліджень для реалізації об'ємного струменного розряду були запропоновані електроди типу "щітка". При заміні стандартного вістрійкового електрода на електрод типу "щітка" в розрядному проміжку реалізується об'ємний розряд. При малих проміжках між щіткою і осаджувальним електродом (до 80 мм) реалізується тільки об'ємний розряд. У разі збільшення проміжку одночасно спостерігається як об'ємний розряд, так і коронний розряд на паралельних електродних системах. Об'ємний розряд запалюється не миттєво з подачею напруги на проміжок, а протягом деякого часу від 30 до 60 с, в залежності від довжини розрядного проміжку. Найкращий стабільний результат при запалюванні розряду спостерігався, коли амплітуда імпульсу напруги наростала поступово за той же проміжок часу від 30 до 60 с.

Симетричне розташування електрода типу "щітка" щодо осаджувальних електродів дозволяє отримати об'ємний розряд, який займає весь об'єм електродної системи. Напруга запалювання такого розряду 55 кВ при частоті проходження імпульсів 1–3 кГц. Найбільш інтенсивне світіння об'ємного розряду спостерігалось при величині робочої напруги приблизно від 58 до 60 кВ. При такій нарузі в діапазоні частот проходження імпульсів від 1 до 3 кГц розряд підтримувався досить тривалий час (в даних експериментах до 30 хв.). При цьому спостерігався дуже високий вихід озону (спостерігалось потемніння ідентифікаційного фільтра). На даній електродній системі вдалося генерувати загальний об'єм плазмового утворення до 10 л. Споживана з мережі середня потужність на підтримку стабільного об'ємного розряду в даному об'ємі становила 0,8 кВт.

Були проведені дослідження впливу швидкості потоку повітря на запалювання і підтримку стабільного об'ємного розряду. Дослідження проведені на макеті електродної системи типу "щітка" з продувкою повітря. Швидкість потоку повітря регулювалася в діапазоні від 0 до 20 м/с. Результати експериментальних досліджень показали, що при швидкості 20 м/с, спостерігається здування плазми із зони розряду (темна область в правій нижній частині міжелектродного проміжку). В цьому випадку спостерігалася і тимчасова затримка запалювання розряду на час від 40 до 50 с. При швидкостях потоку менше 20 м/с плазмова область розряду і час затримок запалювання залишалися ідентичними варіанту без потоку повітря.

Проведені експериментальні дослідження об'ємного розряду показали необхідність врахування газодинамічних процесів в плазмі. Першим необхідно вирішити питання про вплив газодинамічних процесів на стійкість розряду. Згідно з наведеними експериментальними даними потік швидкістю до 20 м/с зовні не впливає на запалювання і підтримку стабільного розряду, проте в плазмі можливе виникнення різного роду нестійкостей, які можуть призводити до контракції розряду або здування плазми. Самі параметри об'ємної плазми, створюваної стаціонарними розрядами з конвективним охолодженням, обмежені нестійкостями, що розвиваються в плазмі. Основними фізичними причинами, що обмежують значення граничної частоти проходження імпульсів розрядного струму, є адиабатичне розширення області нагрітого розрядом газу, наявність градієнтів щільності газу в розрядному об'ємі за рахунок акустичних коливань і розвиток перегрівно-акустичної нестійкості.

**Висновки.** Проведені дослідження впливу конструкції електродних систем на умови запалювання і підтримки стабільного об'ємного розряду показали, що для отримання об'ємного розряду, що займає весь міжелектродний об'єм, необхідне застосування електродної системи типу "щітка" з симетричним розташуванням щодо осаджувальних електродів. Напруга запалювання такого розряду 55–60 кВ при частоті проходження імпульсів від 1 до 3 кГц. На даній електродній системі вдалося генерувати загальний об'єм плазмового утворення до 10 л. Споживана з мережі середня потужність на підтримку стабільного об'ємного розряду в даному об'ємі становила 0,8 кВт. Дослідження впливу газодинамічних процесів на стійкість об'ємного розряду показали, що швидкість газового потоку до 20 м/с зовні не впливає на запалювання і підтримку стабільного розряду, проте в плазмі можливе виникнення різного роду нестійкостей, які можуть призводити до контракції розряду. Для недопущення причин виникнення контракції мінімальна частота проходження імпульсів  $f_{\min}$  повинна бути пропорційна швидкості потоку газу  $v$  і обернено пропорційна довжині каналу  $l_0$  прокачування газу. У цьому випадку за час між імпульсами іонізовані молекули газу будуть видалені з міжелектродного об'єму, що усуне вплив газодинамічних нестійкостей на розряд.

# СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ВИСОКОЧАСТОТНИМ СИНТЕЗОМ ВУГЛЕЦЕВИХ НАНОПОКРИТТІВ НА МЕТАЛЕВИХ ПОВЕРХНЯХ З ВУГЛЕЦЕВОВМІСНИХ ГАЗІВ

Л.З. Богуславський, Д.В. Вінниченко, Н.С. Назарова, Л.Є. Овчиннікова  
Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв

Вуглецеві нанопокриття знаходять застосування в багатьох областях науки, промисловості, техніки і інженерії. Вони використовуються для підвищення міцності матеріалів, поліпшення антикорозійних властивостей, створенні антифрикційних матеріалів, для захисту від різних видів випромінювання.

Метод високочастотного електророзрядного синтезу вуглецевих наноматеріалів на металевих поверхнях з вуглецевовмісних газів, розроблений в ІПТ НАН України, дозволяє одночасно синтезувати нановуглець з onion-like структурою і формувати на його основі наноструктуровані покриття. Для впровадження даного методу в промислове виробництво і забезпечення ефективності електророзрядного синтезу необхідно забезпечити керованість технологічного процесу синтезу нановуглецю на металевих поверхнях на всіх його стадіях.

Метою роботи є побудова системи керування режимом розряду в процесі електророзрядного синтезу нановуглецю на металевих поверхнях з вуглецевовмісних газів для підтримки продуктивного режиму синтезу вуглецевих наночастинок з onion-like структурою на металевій поверхні.

За результатами проведених досліджень встановлено, що значення параметрів нерівноважної плазми, що забезпечують продуктивний режим синтезу вуглецевих наноматеріалів з onion-like структурою, залежать від потужності, введеної в канал розряду. Таким чином, продуктивний режим синтезу обмежується певним значенням потужності в каналі розряду.

При постійній напрузі на вході електротехнічної системи, межі продуктивного режиму синтезу будуть визначатися інтервалом значень вхідного струму, що відповідає обраному інтервалу довжини міжелектродного проміжку. Наявність меж значень струму продуктивного режиму синтезу, при фіксованій напрузі живлення, дозволяє накласти обмеження на поточну величину струму для запобігання виходу з продуктивного режиму синтезу вуглецевих наноматеріалів з onion-like структурою. Розроблена система керування режимом розряду в газовому середовищі реакційного об'єму забезпечує підтримку значень струму в заданому діапазоні. Таким чином забезпечується отримання достатньої кількості плазми для утворення вуглецевих наноструктурних матеріалів з onion-like структурою, а також підтримуються електродинамічні і термодинамічні характеристики нерівноважної плазми, які необхідні для створення вуглецевих нанопокриттів заданої наноструктури з малим статистичним розсіюванням їх розмірів.

Окрім цього синтез вуглецевих наноматеріалів з вуглецевовмісних газів на металевих поверхнях вимагає забезпечення рівномірності покриття поверхні шаром синтезованого нановуглецевого матеріалу. При статичному нерухомому взаєморозташуванні електрода і оброблюваної поверхні забезпечити рівномірність покриття неможливо, оскільки формування каналу розряду є стохастичним процесом, що провокує утворення ущільнень в непередбачуваних місцях.

З метою забезпечення рівномірності нановуглецевих покриттів запропоновано реалізувати керування рівномірним переміщенням оброблюваного зразка поверхні відносно електрода в процесі синтезу нановуглецю з вуглецевовмісних газів. Для забезпечення руху зразка оброблюваної поверхні відносно електрода розроблено автоматичну мікроконтролерну систему керування виконавчим механізмом, яка забезпечує зворотно-поступальний рух зразка по координаті  $X$  і його покрокове переміщення по координаті  $Y$  відносно електрода. У процесі отримання нановуглецевих покриттів металеву поверхню зразка переміщують відносно електрода із заданою швидкістю по заданій траєкторії, формуючи тим самим шар покриття необхідної товщини і якості.

**Висновки.** Створена система керування режимом розряду в газовому середовищі реакційного об'єму, дозволяє підтримувати величину струму в діапазоні продуктивного режиму і забезпечує отримання достатньої кількості плазми для утворення вуглецевих наноструктурних матеріалів, а також дозволяє забезпечити електродинамічні і термодинамічні характеристики нерівноважної плазми, які необхідні для створення вуглецевих нанопокриттів з onion-like структурою і малим статистичним розкидом їх розмірів.

Розроблено систему керування рухом заготовки оброблюваної поверхні відносно електрода, що забезпечує рівномірність покриття металеві поверхні шаром нановуглецевого матеріалу в процесі електророзрядного синтезу нановуглецю з вуглецевовмісного газу, за рахунок запобігання випадкових ущільнень покриття через стохастичний характер формування каналу розряду.

# АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ СИНТЕЗОМ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ С ONION-LIKE СТРУКТУРОЙ

Л.З. Богуславский, Н.С. Назарова, Л.Е. Овчинникова  
Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев

В ИИПТ НАН Украины разработан метод высокочастотного электроразрядного синтеза углеродных наноматериалов из углеродосодержащих газов, который позволяет синтезировать наноуглерод с onion-like структурой. Для обеспечения управляемости процесса синтеза наноуглерода необходимо разработать алгоритм управления.

Координатами вектора состояния режима разряда в реакционном объеме, которые обеспечивают технологический результат синтеза наноуглерода, руководствуясь исследованиями электрофизических характеристик высоковольтной обработки газообразных углеводородов, можно считать следующие параметры:  $U_p$  - рабочее напряжение синтеза;  $I_{\text{раз}}$  - разрядный ток;  $P$  - потребляемая мощность,  $l$  - длина разрядного промежутка и  $T$  - температура в реакционном объеме.

По результатам проведенных исследований установлено, что значения параметров неравновесной плазмы, обеспечивающих продуктивный режим синтеза углеродных наноматериалов с onion-like структурой, зависят от мощности, введенной в канал разряда. Таким образом, продуктивный режим синтеза ограничивается определенным значением мощности в канале разряда.

При стабилизированном разрядном токе  $I_{\text{раз}}$ , и линейном характере зависимости рабочего напряжения синтеза  $U_p$  от длины разрядного промежутка  $l$ , вводимая в канал разряда мощность будет пропорционально зависеть от длины канала разряда  $l$ .

При постоянном напряжении на входе электротехнической системы, границы продуктивного режима синтеза будут определяться интервалом значений входного тока  $I \in \Delta I_{\text{пр}}$ , соответствующим выбранному рабочему интервалу длины межэлектродного промежутка. Наличие границ значений тока продуктивного режима синтеза, при фиксированном напряжении питания, позволяет наложить ограничения на текущую величину тока для предотвращения выхода из продуктивного режима синтеза углеродных наноматериалов с onion-like структурой.

С целью определения оптимального закона управления и критерия оптимальности проведено исследование функции потерь режима разряда в газовой среде реакционного объема в процессе синтеза углеродных наноматериалов. Необходимым условием синтеза является нахождение значения тока в диапазоне  $I \in \Delta I_{\text{пр}}$ , который обеспечивает продуктивный режим. При невыполнении этого условия синтез не происходит и потери равны энергии в разрядном импульсе  $W$ .

На основе исследования функции потерь с учетом стохастичности объекта принято минимаксный критерий оптимальности системы автоматического управления. Такой критерий обеспечивает минимум максимального риска, в нашем случае максимально возможных потерь энергии, и требует максимальной скорости возврата системы к продуктивному режиму, то есть система управления должна быть оптимальной по быстродействию. Основным принципом оптимального управления по быстродействию является принцип максимума Понтрягина. В соответствии с принципом максимума при отклонении от производительного режима, когда значение тока выходит из допустимого диапазона  $I \in \Delta I_{\text{пр}}$ , управляющая функция должна мгновенно принимать максимальное значение, что может обеспечить релейный закон управления.

Количество образовавшегося наноуглерода почти пропорционально зависит от мощности источника питания, то есть от величины потребляемого тока. Таким образом, для обеспечения наибольшего выхода наноуглерода, необходимо поддерживать значение среднеквадратического тока в заданном диапазоне  $I \in \Delta I_{\text{пр}}$ . Толщина покрытия зависит от продолжительности обработки поверхности.

Полученная эмпирическая зависимость тока  $I(l)$  от длины межэлектродного промежутка имеет линейный характер, что позволяет в качестве канала управляющего воздействия использовать величину межэлектродного промежутка  $l$ .

Алгоритм работы системы управления режимом разряда в газовой среде реакционного объема заключается в отслеживании величины разрядного тока и при выходе значения тока из зоны  $I \in \Delta I_{\text{пр}}$ , соответствующей продуктивному режиму, включении релейного элемента системы управления, подающего сигнал на привод электродной системы, изменяя таким образом величину разрядного промежутка до того момента, когда величина разрядного тока войдет в зону продуктивного режима, после чего привод электродной системы отключается.

Таким образом, реализация разработанного алгоритма управления режимом разряда в газовой среде, который построен по минимаксному критерию оптимальности, позволит поддерживать разрядный ток в заданном диапазоне  $I \in \Delta I_{\text{пр}}$ . Это обеспечит продуктивный режим синтеза углеродных наноструктурных материалов с onion-like структурой.

**Выводы.** Разработан алгоритм управления режимом разряда в газовой среде реакционного объема, реализующий минимаксный критерий оптимальности, который позволяет поддерживать величину тока в диапазоне производительного режима  $I \in \Delta I_{\text{пр}}$  и обеспечивает образование углеродных наноструктурных материалов с onion-like структурой.

**СПИСОК УЧАСНИКІВ ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ НАУКОВОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ  
«СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ»**

<i>№</i>	<i>ПІБ</i>	<i>Стор.</i>	<i>№</i>	<i>ПІБ</i>	<i>Стор.</i>
1	Агаєв Р.А.	26	49	Куніженков В.В.	65
2	Адамчук Ю.О.	23	50	Кускова Н. І.	24,34,35
3	Амелін М.Ю.	28	51	Кушнір В.В.	41
4	Андрєєв В.І.	30	52	Лавриненко В.І.	14
5	Базалій Г.А.	14	53	Липян Є.В.	22,50
6	Безбах О.М.	28	54	Литвиненко Д.С.	27
7	Бичков В.М.	47,58	55	Литвинов В.В.	62
8	Блащенко О.Д.	12	56	Лобанов Л.М.	51
9	Бобров М.М.	45	57	Лобачова Г.Г.	17
10	Богуславський Л.З.	23,64,65,66,67,68	58	Макруха Т.О.	45
11	Бугаєнко Б.В.	27	59	Малюшевська А.П.	54,55,56
12	Букетов А.В.	28	60	Марініч М.А.	14
13	Букетова Н.М.	29	61	Миходуй О.Л.	51
14	Бутурля Е.А.	27	62	Назарова Н.С.	63,67,68
15	Вінниченко Д.В.	63,67	63	Наконечний С.О.	42
16	Вовченко О.І.	10,11,12	64	Негруца Р.Ю	28
17	Воробйов Ю. С	31	65	Овчарова Н. Ю.	31
18	Гумененко М.К.	21,40	66	Овчиннікова Л.Є.	64,67,68
19	Гунько В.І.	19	67	Олійник Н.О.	14,49
20	Гурська В.М.	17	68	Онацька Н.О.	11,18
21	Дьогтев Ю.Н.	40	69	Пасічний О.О.	14
22	Демиденко Л.Ю.	10,11,12,18	70	Пацин М.О.	51
23	Денисюк Т.Д.	9,15,16,18	71	Перков О.М.	13
24	Дмитрішин О.Я.	19,20	72	Петриченко С.В.	7,8,24
25	Дубовенко К.В.	24	73	Петров С.С.	46
26	Дубовий О.М.	45	74	Півторак В.А.	51
27	Жекул В.Г.	60,62	75	Пригунова А.Г.	46
28	Зайцева І. М.	14	76	Присташ М.С.	21,50,61
29	Зайченко А.Д.	21,50,61	77	Присташ С.Ф.	25
30	Золіна А.В.	63	78	Прищепов О.Ф.	30
31	Іванов А.В.	21,37,38,39,40,58	79	Пріхна Т.О.	14
32	Іващенко Є.В.	17	80	Рачков О.М.	9,15,16,36
33	Ільницька Г.Д.	14	81	Рудь А.Д.	50
34	Карпеченко А.А.	45	82	Сапронова А.В.	29
35	Квасницький В.В.	27	83	Сизоненко О.М.	14,22,49,50
36	Квасницький В.Ф.	27	84	Сінчук А.В.	23,37
37	Клименко Л.П.	30	85	Случак О.І.	30
38	Клюєв Є.С.	26	86	Смірнов О.П.	60,62
39	Коваленко О.О.	49	87	Смоквина В.В.	14
40	Козирєв С.С.	53,64	88	Старков І.М.	14,36
41	Коломійцева Л.П.	48	89	Старков М.В.	59
42	Кондратенко І.П.	51	90	Стрелковська Л.І.	59
43	Корзинова А. М.	35	91	Танасова О.Д.	19
44	Косенков В.М.	47,48,57	92	Тафтаї Е.І.	60,62
45	Кошелєв М.В.	46	92	Тищенко Ф.М.	47
46	Кременчутський О.С.	43	94	Топоров С.О.	19,20
47	Кузьмичов В.М.	13	95	Торпаков А.С.	50
48	Кулініч А.Г.	28	96	Фесенко А.Н.	44

97	Фесенко М.А.	44	107	Чушак С.В.	65,66
98	Хайнацький С.О.	5,6,35	108	Шведов Л.П.	5,32
99	Харитоновна Т.Г.	40	109	Швець І.С.	60,62
100	Хвошан О.В.	60,62	110	Шугай В.В.	30
101	Христо О.І.	5,52	111	Юркова О.І	41,42,43
102	Цолін П.Л.	36	112	Ющишина Г.М.	33,34,35
103	Цуркін В.М.	21,37,38,40			
104	Челпанов Д. І.	34,35			
105	Чернявський В.В.	41,42,43			
106	Честних М.В.	21,40			

1.	<b>100-РІЧЧЮ НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ ПРИСВЯЧУЄТЬСЯ.....</b>	3
	<b><i>I. Новітні технології та обладнання для обробки і синтезу матеріалів.</i></b>	5
2.	Хайнацкий С.А., Христо А.И., Шведов Л.П. Методы и технологии электроразрядной очистки воды .....	5
3.	Хайнацкий С.А. Особенности электрического взрыва проводников в оптимальных режимах. Технологические аспекты. ....	6
4.	Петриченко С.В. Електричні характеристики розрядних імпульсів при диспергуванні шару гранул в рідких граничних вуглеводнях та за присутності в рідині ерозійно-генерованого порошку.....	7
5.	Петриченко С.В. Особенности объемного электроискрового диспергування металевих і графітових гранул в рідині.....	8
6.	Денисюк Т.Д., Рачков О.М. Электроразрядные технологии дезинтеграции неметаллических материалов природного и искусственного происхождения.....	9
7.	Вовченко А.И., Демиденко Л.Ю., Старков И.Н. Оптимизация режимов работы оборудования для разрядноимпульсных технологий разрушения и формообразования.....	10
8.	Вовченко А.И., Демиденко Л.Ю., Онацкая Н.А. Нетрадиционные разрядноимпульсные технологии обработки материалов..	11
9.	Вовченко А.И., Демиденко Л.Ю., Блащенко А.Д. Разработка новых принципов повышения эффективности экзотермических превращений в разрядноимпульсных технологиях на базе высоко-вольтного электрохимического взрыва.....	12
10.	Кузьмичев В.М., Перков О.М. Новые технологические схемы производства железнодорожных колес и колесных центров.....	13
11.	Олійник Н.О., Ільницька Г.Д., Марініч М.А., Базалій Г.А., Зайцева І. М., Лавриненко В.І., Пріхна Т.О., Сизоненко О.М., Пасічний О.О., Смоквина В.В. Сучасні технології отримання функціоналізованих вуглецевих нанопорошків.....	14
12.	Денисюк Т.Д., Рачков А.Н. Использование разрядно-импульсных технологий в морских условиях.....	15
13.	Денисюк Т.Д., Рачков А.Н. Электроразряд – екологічно чистий спосіб отримання мінеральних добрив.....	16
14.	Лобачова Г.Г., Івашенко Є.В., Гурська В.М. Створення хромо-титанових електроіскрових покриттів на сталі 40Х13 у рідинних середовищах з порошковими компонентами.....	17
15.	Демиденко Л.Ю., Денисюк Т.Д., Онацкая Н.А. Интенсификация электроразрядного разрушения материалов с использованием высоковольтного электрохимического взрыва.....	18
16.	Гулько В.І., Дмитрішин О.Я., Танасова О.Д., Топоров С.О. Створення високовольтних імпульсних конденсаторів з високими значеннями питомої об'ємної енергії, що запасється, для свердловинних	

	пристроїв інтенсифікації видобутку нафти і газу .....	19
17.	Дмитришин А.Я., Топоров С.О. Исследование тепловых режимов высоковольтных импульсных конденсаторов для скважинных установок.....	20
18.	Иванов А.В., Цуркін В.М., Честних М.В., Гумененко М.К. Функціональні можливості методів імпульсної обробки металевого розплаву для технологій ливарного виробництва.....	21
19.	Зайченко А.Д., Присташ М.С. Вплив товщини перехідної інтерметалідної зони $\text{CuAl}_2$ на твердість матеріалу системи Al-Cu-S.....	21
20.	Липян Е.В., Сизоненко О.Н. Влияние высоковольтной разрядно-импульсной подготовки шихты на функциональные свойства карбидотитановых твердых сплавов.....	22
21.	Адамчук Ю.О., Богуславский Л.З., Синчук А.В. Нанесение защитных нанокремниевых покрытий на металлические поверхности электродуговым методом.....	23
22.	Kuskova N.I., <u>Dubovenko K.V.</u> , Petrichenko S.V. Electric discharge method for synthesis of carbon nanomaterials.....	24
23.	Присташ С.Ф. Особенности напряжено-деформованого стану тороїдального міцного корпусу виконаного намотуванням із ПКМ.....	25

## ***II. Процеси отримання матеріалів та утилізації відходів***

24.	Агаєв Р.А., Ключев Е.С. Дослідження виділення метану при тепловій дії на тверду вуглецевмісну сировину .....	26
25.	Квасницький В.Ф., Квасницький В.В., Бугаєнко Б.В., Бутурля Е.А., Литвиненко Д.С. Диффузионная сварка композиционного материала на основе алюминия с применением наноструктурной фольги.....	27
26.	Букетов А.В., Кулініч, Р.Ю. Негруца А.Г., Амелін М.Ю., Безбах О.М. Вплив модифікатора на фізико-механічні властивості епоксидних композитів .....	28
27.	Сапронова А.В., Букетова Н.М. Дослідження фізико-механічних властивостей епоксидних композитів, наповнених частками прокатної залізної окалини.....	29
28.	Клименко Л.П., Андрєєв В.І., Прищепов О.Ф., Случак О.І., Шугай В.В. Процеси отримання пористих композитних матеріалів з регульованою термічною стійкістю.....	30
29.	Воробьев Ю. С., Овчарова Н. Ю. Использование скоростного деформирования материала в процессах соединения и разделения элементов конструкции.....	31
30.	Шведов Л.П. Реодинамическая модель СВС – процессов в системе Ti-Al-S.....	32
31.	Ющишина Г.М. Термодинамічний опис хімічних реакцій в системі титан- алюміній – гексаметилентетрамін в умовах самопоширюваного високотемпературного синтезу.....	33
32.	Челпанов Д. И., Ющишина А. Н., Кускова Н. И. Влияние углеродсодержащих прекурсоров на самораспространяющийся высокотемпературный синтез в порошковых системах Ti-Al-S.....	34
33.	Кускова Н. И., Корзинова А. Н., Хайнацкий С. А., Ющишина А. Н., Челпанов Д. И.	

	Утилизация углеродсодержащих отходов методами разрядно-импульсной деструкции и самораспространяющегося высокотемпературного синтеза...	35
34.	Цолін П.Л., Старков І.М., Рачков О.М. Розрядно-імпульсна дезінтеграція як спосіб отримання мікро-дисперсної скляної компоненти новітніх теплоізоляційних матеріалів.....	36
35.	Синчук А.В., Цуркин В.Н., Иванов А.В. Получение металл-интерметаллидных слоистых композиционных материалов Ti-Al <sub>3</sub> Ti.....	37
36.	Цуркин В.Н., Иванов А.В. Интенсификация термодинамических процессов кристаллизации расплава под воздействием электрического тока.....	38
37.	Иванов А.В. Электромагнитные и гидродинамические поля при кондукционной электротокерической обработке расплавов.....	39
38.	Цуркін В.М., Иванов А.В., Гумененко М.К., Дьогтев Ю.Н., Харитонов Т.Г. Отримання високоякісних сплавів системи Al-Sn методом електрогідроімпульсної обробки розплаву.....	40
39.	Цуркін В.М., Иванов А.В., Честних М.В., Гумененко Н.К., Дьогтев Ю.Н., Харитонов Т.Г. Зрівняльний аналіз функціональних можливостей кондукційної електрострумової обробки розплаву доєвтектичного силуміну.....	40
40.	Кушнір В.В., Чернявський В.В., Юркова О.І. Отримання високоентропійних AlCoFeCrVNi та AlCoFeCrVTi сплавів механічним легуванням та спіканням під тиском.....	41
41.	Наконечний С.О., Чернявський В.В., Юркова О.І. Отримання високоентропійного AlNiCoFeCrTi сплаву методом механічного легування та спікання.....	42
42.	Кременчутський О.С., Чернявський В.В., Юркова О.І. Отримання високоентропійного AlNiCoFeCrTi сплаву в процесі механічного легування.....	43
43.	Фесенко М.А., Фесенко А.Н. Формирование дифференцированной структуры и свойств чугуновых отливок модифицированием расплава в литейной форме.....	44
44.	Дубовий О.М., Карпеченко А.А., Бобров М.М., Макруха Т.О. Наноструктурування кристалічних матеріалів передрекристалізаційною термічною обробкою.....	45
45.	Пригунова А.Г., Петров С.С., Кошелев М.В. Управление структурой и свойствами заэвтектических силуминов специальными способами импульсной обработки расплава электрическим током.....	46
46.	Косенков В.М., Бычков В.М., Тищенко Ф.Н. Влияние индуктивности электрической цепи, формирующей разряд в воде, на деформирование пластин.....	47
47.	Косенков В.М., Коломийцева Л.П. Влияние скорости деформации листовых высокопрочных сталей на деформацию их разрушения .....	48
48.	Сизоненко О.Н., Коваленко А.А., Олейник Н.А. Функциональные свойства карбидосталей с включениями микропорошка алмаза.....	49

49.	Сизоненко О.Н., Присташ Н.С., Зайченко А.Д., Торпаков А.С., Липян Е.В. Рудь А.Д. Высокоэнергетический синтез металломатричных композитов, упрочненных мах-фазами системы Ti-Al-C.....	50
<b>III. Системи діагностики і контролю процесів обробки матеріалів.</b>		
50.	Лобанов Л.М., Кондратенко И.П., Пивторак В.А., Пашин Н.А., Миходуй О.Л. Метод электродинамической обработки импульсами тока для оценки и регулирования напряженно-деформированного состояния сварных соединений.....	51
51.	Христо А.И. Особенности процессов передачи энергии в цепях высоковольтных магнитно-полупроводниковых генераторах импульсов.....	52
52.	Козирев С.С. Використання FUZZY-моделювання при синтезі систем керування розрядно-імпульсною обробкою матеріалів.....	53
53.	Малюшевська А.П. Експлуатаційні властивості електроізоляційних полімерних плівок комбінованих діелектричних систем, підданих впливу підвищених температур.....	54
54.	Малюшевська А.П. Вплив підвищених температур на експлуатаційні властивості електроізоляційних просочуючих рідин комбінованих діелектричних систем високовольтних конденсаторів.....	55
55.	Малюшевська А.П. Руйнування полімерних діелектричних плівок під впливом електричного поля за умов заглушення часткових розрядів.....	56
56.	Косенков В.М. Математическое моделирование изменения электропроводности плазмы в процессе высоковольтного разряда в воде.....	57
57.	Бычков В.М., Иванов А.В. Исследование распределения энергетических характеристик нескольких водных разрядных промежутков, соединенных последовательно.....	58
58.	Старков Н.В., Стрелковская Л.И. Повышение точности деталей из высокопрочных сталей при электрогидроимпульсной калибровке.....	59
59.	Жекул В.Г., Смирнов А.П., Тафтай Э.И., Хвощан О.В., Швец И.С. Измерение импульсных давлений, генерируемых электрическим взрывом в жидкости, с помощью пьезоэлектрического датчика давления.....	60
60.	Зайченко А.Д., Присташ Н.С. Влияние толщины переходной интерметаллидной зоны CuAl <sub>2</sub> на твердость материала системы Al-Cu.....	61
61.	Жекул В.Г., Литвинов В.В., Смирнов А.П., Тафтай Э.И., Хвощан О.В., Швец И.С. Эрозия анодов электродных систем при высоковольтном электрическом разряде в воде.....	62
62.	Вінниченко Д.В., Золіна А.В., Назарова Н.С. Джерело живлення з комбінованим режимом роботи синтезу нановуглецю з газоподібних вуглеводнів.....	63
63.	Богуславский Л.З., Овчинникова Л.Е., Козырев С.С. Интеллектуальная система управления импульсным высокочастотным	

высоковольтным источником питания газоочистных комплексов тепловых электростанций.....	64
64. Богуславский Л.З., Чушак С.В., Куниженков В.В. Особенности влияния коронного разряда на поведение электрода-струны в системах электрофльтрации.....	65
65. Богуславський Л.З., Чушак С.В. Умови запалювання об'ємного розряду в системах електрофільтрації шкідливих газових викидів.....	66
66. Богуславський Л.З., Вінниченко Д.В., Назарова Н.С., Овчинникова Л.Є. Система керування високочастотним синтезом вуглецевих нанопокриттів на металевих поверхнях з вуглецевовмісних газів.....	67
67. Богуславский Л.З., Назарова Н.С., Овчинникова Л.Е. Алгоритм управления высокочастотным синтезом углеродных наноматериалов с onion-like структурой.....	68
68. Список учасників конференції.....	69
69. Зміст .....	71

Наукове видання

**«СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ»**

**ВСЕУКРАЇНСЬКА НАУКОВА КОНФЕРЕНЦІЯ**

1-2 листопада 2018 року

Інститут імпульсних процесів і технологій

Національної академії наук України

просп. Богоявленський, 43А, м. Миколаїв

**Матеріали конференції**

(українською, російською та англійською мовами)

---

Підписано до друку 11.10.2018 р.  
Формат 60x84/8. Папір офсетний. Гарнітура Таймс.  
Ум.-друк. Арк..9,50  
Наклад 50 прим. Зам. №5698

---

Надруковано в КП «Миколаївська обласна друкарня»  
54010, м. Миколаїв, вул. Георгія Гонгадзе, 3.  
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру  
ДК № 1339 від 24.04.2003 р.