

## РОЗВИТОК В ІЕЗ ім. Є.О. ПАТОНА ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ СТВОРЕННЯ НОВИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОКРИТТІВ

З середини ХХ століття необхідність підвищення технічних характеристик (надійності, потужності, експлуатаційного ресурсу та ін.) авіаракетних двигунів, газових турбін, устаткування атомної енергетики стала каталізатором для створення нових матеріалів, захисних покриттів та технологій їх отримання. Б.Є. Патон ще з 1950-х років приділяв велику увагу дослідженням фізичних процесів взаємодії потоку прискорених електронів великої потужності з металами та сплавами з метою розробки нових технологій для зварювання та отримання нових матеріалів.

Починаючи з цього часу в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона (ІЕЗ) розпочалися розробки електронно-променевих технологій: зварювання (Г.В. Криштаб, В.Є. Локшин, Ю.М. Ланкін, В.І. Чалов, О.К. Назаренко), переплаву для рафінування металів та сплавів, випаровування (атомізації) з наступним фізичним осадженням парової фази у вакуумі (ЕВ-РВД — Electron Beam-Physical Vapor Deposition).

У 1961 р. в ІЕЗ створено відділ № 13 електронно-променевих парофазних технологій, який в період 1961–1994 рр. очолював Б.О. Мовчан. В 1962 р. введена в дію установка, призначена для випаровування та конденсації неорганічних речовин у вакуумі.

Великий вплив на подальший інтенсивний розвиток цих напрямків надала зустріч Б.Є. Патона з

головним конструктором ракетно-космічних систем С.П. Корольовим, що відбулася в кінці 1962 р., на якій обговорювались проблеми зварювання та створення нових конструкційних матеріалів та покриттів.

Використання електронно-променевої технології для випаровування металевих та неметалевих (оксиди, карбіди, бориди) речовин з наступною конденсацією парової фази у вакуумі відкрили можливості створення нових матеріалів та покриттів з унікальними властивостями, які неможливо отримати іншими методами. Парова фаза не має обмежень у взаємній розчинності компонентів, а парові потоки легко модулювати та розподілити в просторі по заданому закону. Тому випаровуванням та конденсацією можливо отримувати статистично гомогенні тверді розчини в широкому інтервалі концентрацій компонентів, дисперсні, мікрочарові та аморфні матеріали.

Протягом 1960–1970 рр. проведено систематичні дослідження структури та властивостей (міцність, пластичність, повзучість, мікротвердість, жаростійкість) одно- та двофазних матеріалів на основі заліза, нікелю, кобальту, міді, хрому, молібдену та ін., з добавками оксидів та карбідів інших металів, при кімнатній та високій температурі.

Б.О. Мовчаном та О.В. Демчишиним встановлено схематичну залежність структури конденсованого матеріалу від гомологічної температури його осадження, яка стала класичною та визнана у всьому світі.

У 1964 р. в ІЕЗ прибув президент АН СРСР М.В. Келдиш, який цікавився можливістю плакування ванадієм сталевих корпусів ядерних реакторів і паливних елементів. У реакторах, охолоджуваних рідкими металами, ванадій і його сплави практично не взаємодіють із ядерним паливом, а при температурах 1000...1200 К мають високу стійкість проти корозії в рідкометалевих теплоносіях.

Б.Є. Патон за пропозицією М.В. Келдиша організував при Президії АН СРСР Наукову раду з проблеми «Нові процеси отримання і обробки металевих матеріалів», яка об'єднала вчених академічних установ із фахівцями багатьох інших відомств і сприяла розвитку науки про матеріали. У 1964 р. Б.О. Мовчана було обрано членом-кореспондентом, а 1978 р. — академіком НАН України.

У 1971–1974 рр. досліджено процеси електронно-променевого напилення та властивості вакуумних конденсатів на основі заліза, тугоплавких оксидів, карбідів та боридів, розроблено жаростійкі покрит-



На фото ліворуч: М.В. Келдиш, Б.О. Мовчан, Б.Є. Патон (1964 р.)

тя, створено апаратуру та технологію нанесення покриттів та отримання композитних матеріалів (Б.Є. Патон, Б.О. Мовчан).

Паралельно з науковими дослідженнями та розробкою нових технологій у відділі № 13 проводили конструкторські розробки та виготовлення електронно-променевих установок, поліпшували їх висковольтні джерела живлення та системи керування електронним променем. Для цього до складу відділу було включено групу конструкторів (Ю.М. Кривошликов, П.А. Кучеренко), які тісно співпрацювали з науковими співробітниками (О.Л. Тихоновський, А.В. Демчишин). Технологія електронно-променевого рафінування металів та сплавів дозволила покращити їх властивості та почала впроваджуватись у виробництво. Вже у 1965 р. вступила в дію перша промислова установка В-270 для отримання рафінованих зливків ніобію та танталу діаметром 150 мм на Донецькому хіміко-металургійному заводі (м. Волноваха). В 1969 р. була прийнята в експлуатацію установка И-254 на металургійному заводі «Електросталь» (м. Електросталь) для отримання зливків жароміцних сплавів діаметром до 380 мм.

В 1974 р. колективу авторів була присвоєна державна премія УРСР в галузі науки і техніки за розробку та впровадження електронно-променевих технологій та обладнання для отримання чистих металів і сплавів (Б.О. Мовчан, О.Л. Тихоновський, В.О. Тимашов, Ю.М. Кривошликов).

Були сконструйовані та запатентовані прості та надійні в експлуатації плоскопроменеві електронні гармати (Б.О. Мовчан, В.О. Тимашов). Наступні модифікації цих електронно-променевих гармат відрізняються лише незначними змінами та успішно експлуатуються по цей час.

У 1979 р. розроблено електронно-променевий метод отримання мікрошарових композиційних матеріалів типу метал/метал або метал/окис з товщиною шару порядку 1 мкм, вивчено основні механічні властивості цих матеріалів та встановлено явище надпластичності (Б.Є. Патон, Б.О. Мовчан).

У 1978–1983 рр. розроблено наукові основи електронно-променевої технології одержання пористих металокерамічних матеріалів з широкою гамою фізико-механічних властивостей. Завершено дослідження фізичного механізму виявленого явища максимальної пластичності двофазних матеріалів за умови рівності середнього розміру зерна середній вільній відстані між частинками другої фази. Отримані результати дозволили створити нові конструкційні матеріали на основі металевих матриць (Б.Є. Патон, Б.О. Мовчан).

Розроблено композиційні теплозахисні покриття та електронно-променеву технологію їх осадження на ло-

патки турбін та інші вузли і деталі високотемпературної техніки, що дозволило збільшити їх надійність і підвищило ресурс експлуатації в 5...10 разів (Б.О. Мовчан, І.С. Малашенко). У 1979–1982 рр. вступили в дію 15 промислових багатокамерних установок типу УЕ-137 та УЕ-175 для нанесення металевих і керамічних покриттів на лопатки авіаційних газотурбінних двигунів та енергетичних установок на заводах Мінавіапрому, Мінсудпрому та Мінгазпрому (Москва, Самара, Пермь, Рибінськ, Литкаріно, Миколаїв, Камишин, Глазов, Вороніж). Було розроблено та передано замовникам відповідні технології нанесення захисних покриттів на вироби нової техніки. Слід зазначити, що завдяки тісній співпраці вчених відділу № 13 з двигунобудівними КБ ім. М. Кузнецова вперше у світі здійснено політ літака з авіаційним газотурбінним двигуном, який мав лопатки з теплозахисним керамічним покриттям.

Цикл цих робіт у 1984 р. був оцінений присудженням співробітникам відділу № 13 Ленінської премії за нові матеріали та покриття (Б.А. Мовчан, І.С. Малашенко). У 1983 році вийшла друком книга Б.А. Мовчана та І.С. Малашенка «Жаростійкі покриття, що осаджуються у вакуумі». Продовженням робіт зазначеного напрямку були дослідження І.С. Малашенко, М.І. Гречанюка, В.В. Грабіна, В.І. Топала, К.Ю. Яковчука, що дозволили підвищити надійність захисних покриттів та їх робочу температуру.

У Московському науково-виробничому об'єднанні «Астрофізика» успішно застосовувалася електронно-променева технологія нанесення покриттів на дзеркала силової металооптики.

У 1989 р. за цикл робіт «Структура і властивості неорганічних матеріалів, осаджених із парової фази у вакуумі» Б.А. Мовчану присуджено премію ім. Є.О. Патона АН УРСР.

У 1987–1992 рр. розроблялася та була запропонована до промислового застосування технологія намерзання заготовок з жаростійких матеріалів для подальшої термомеханічної обробки та виготовлення важконавантажених дисків роторів газових турбін (В.А. Пання).

У 1988–1992 рр. успішно розроблялася електронно-променева технологія легування зварювальних дротів рідкоземельними елементами (В.І. Ульянов, І.В. Гуляєв, А.Ф. Манулик, Є.В. Онопрієнко).

ІЕЗ спільно з такими провідними спеціалізованими організаціями України як Запорізький моторобудівний завод ім. П.І. Баранова (тепер АО «Мотор Січ»), «Запорізьке машинобудівне конструкторське бюро «Прогрес», Південний турбінний завод (тепер ДП «Науково-виробничий комплекс газотурбобудування «Зоря»–«Машпроект»»), Сумський машинобудівний завод ім. М.В. Фрунзе, Сумський завод важкого компресорного будування (тепер Публічне

Акціонерне Товариство «Сумське НВО») проводили дослідницькі та дослідно-промислові роботи зі створення ремонтних технологій з метою продовження ресурсу газотурбінних двигунів та технологій отримання суцільнозварних моноблоків газотурбінних установок (ГТУ) із перспективних матеріалів. Продовження ресурсу ГТУ передбачало багаторазове відновлення експлуатаційних характеристик соплових та робочих лопаток, елементів дисків, жарових камер, ущільнювальних елементів та інших високонавантажених деталей та вузлів, у тому числі із жароміцних нікелевих сплавів.

У 1988 р. здійснено комплекс фізико-хімічних досліджень біметалевих матеріалів системи сталь-нікель, на основі яких розроблено технологію електронно-променевого нанесення захисних нікелевих покриттів на низьковуглецеві сталеві стрічки для корпусів хімічних джерел струму (А.В. Демчишин).

У 1990 р. були сконструйовані та виготовлені для ВО «Катіон» (м. Хмельницький) дві електронно-променеві установки для отримання алюмінієвої катодної фольги з великою питомою площею (Б.О. Мовчан, М.І. Гречанюк, Г.М. Гордієнко, С.М. Рязанцев), що дозволило значно збільшити питому ємність і зменшити габарити серійно вироблених електролітичних конденсаторів.

У 1991 р. була розроблена електронно-променева технологія синтезу товстих (10...500 мкм) надпровідних плівок системи Y–Ba–Cu–O шляхом випаровування вихідної кераміки з одного джерела (Б.О. Мовчан, М.І. Гречанюк, В.В. Грабін, С.Є. Литвин).

У тому ж році розроблено методи високошвидкісного випаровування металів та багатокомпонентних сплавів, що дозволили у 2...10 разів підвищити швидкість їх випаровування (Б.А. Мовчан, М.І. Гречанюк, В.І. Топал, А.В. Корж, В.А. Осокін). Сучасні електронно-променеві випарники дозволяють виробляти до 10...25 кг металевої пари на годину та здійснювати конденсацію зі швидкістю 10...60 мкм/хв.

У 1992 р. М.І. Гречанюку присуджено Державну премію України в галузі науки і техніки за технологію виготовлення матеріалів для атомної енергетики. Розроблено технологію осадження алмазоподібних покриттів (Ю.Б. Чуйков).

У 1999–2003 рр. розроблена технологія електронно-променевого формування твердих градієнтних покриттів на сталевих підкладках на основі системи TiC–Cu шляхом сумісного випаровування з окремих джерел і осадження в вакуумі карбиду титану та міді. Висока мікротвердість верхніх шарів покриття (20...23 ГПа) обумовлена його композитною мікроструктурою, яка складається з твердої матриці на основі TiC і міді та локалізується на межах зерен. Висока адгезійна міцність покриття досягається

шляхом утворення поблизу підкладки пластичного шару з підвищеною концентрацією міді, в яких мікротвердість знижується до 6...13 ГПа.

Для прискореного впровадження в промисловість результатів наукових і технологічних досліджень на території ДП «Дослідного заводу спецелектрометалургії ІЕЗ» у 1983 р. було створено цех електронно-променевих технологій.

У 1993 р. на базі цього цеху було створено спільний Українсько-Американський дослідницький центр «Пратт і Уїтні-Патон», який виконував роботи з нанесення захисних покриттів на лопатки авіаційних двигунів літаків японських, американських та сингапурських авіаліній.

В 1995 р. за угодою Національної академії наук України та Пенсільванського Університету (США) створена лабораторія електронно-променевого випаровування і осадження в Пенсільванському Університеті.

На базі відділу № 13 ІЕЗ у 1994 р. створено Державне науково-дослідне та проектно-конструкторське підприємство «Міжнародний центр електронно-променевих технологій ІЕЗ ім. Є.О. Патона» (МЦ ЕПТ). Розширилися дослідження фундаментальних та прикладних наукових процесів, що відбуваються при випаровуванні речовин електронним променем у вакуумі, розробок нових матеріалів та захисних покриттів, отримуваних за допомогою технологій електронно-променевого випаровування та конденсації, а також для створення та виготовлення нового електронно-променевого обладнання. Під науковим керівництвом Б.О. Мовчана та з 2003 р. К.Ю. Яковчука МЦ ЕПТ досяг міжнародного визнання як у галузі розробок та досліджень нових варіантів аморфних, нанокристалічних, дисперсно-зміцнених, шаруватих, пористих матеріалів та захисних покриттів, осаджуваних з парової фази у вакуумі, так і в реалізації розроблених технологічних процесів та експериментальних зразків електронно-променевого обладнання потужністю 120...250 кВт.

Серед замовників на виконання науково-дослідних робіт з електронно-променевої тематики слід відзначити такі відомі компанії, як «Дженерал Електрик», «Пратт і Уїтні», «Хромаллой» (США), «Роллс-Ройс» (Англія), «Ел Джі» (Південна Корея), науково-дослідні інститути та університети інших країн.

МЦ ЕПТ виготовив і поставив зарубіжним (КНР, США, Канада, Індія) та українським замовникам 23 лабораторних, дослідно-промислових та промислових електронно-променевих установок, провів навчання зарубіжних спеціалістів.

Ці установки експлуатуються для промислових та науково-дослідних цілей в таких компаніях, як «Дженерал Електрик», «Ханівелл», Пенсільван-

ський Університет (США), Аерокосмічний дослідний центр (м. Монреаль, Канада), Міжнародний дослідний центр порошкової металургії (м. Хайдарабад, Індія), Пекінський інститут аерокосмічних матеріалів, Пекінський університет астронавтики та аеронавтики, Пекінський інститут авіаційних технологій (КНР) та на багатьох китайських машинобудівних підприємствах. Ліцензії на методи нанесення металевих та керамічних захисних покриттів продано замовникам в США та КНР.

На початку 2000-х років у відділі парофазних неорганічних матеріалів були виготовлені конденсовані матеріали з квазікристалічною структурою (Б.О. Мовчан, А.І. Устинов). Унікальне поєднання властивостей таких матеріалів відкрило нові можливості при створенні на їх основі функціональних матеріалів різного призначення.

Оскільки квазікристалічні структури існують у вузькому концентраційному інтервалі сплавів на основі багатокомпонентних систем (область гомогенності не перевищує  $\pm 1$  ат. %), необхідно було розробити прецизійні методи його електронно-променевого випаровування.

У 2001 р. вперше було отримано товсті покриття з квазікристалічною структурою на основі системи Al–Cu–Fe (А.І. Устинов, В.І. Чаплюк, Т.В. Мельниченко, С.С. Поліщук) та розроблено високошвидкісний процес (до 30 мкм/хв) їхнього осадження. Виявилось, що шляхом зміни умов осадження покриттів їх структуру можна модифікувати, подрібнюючи, наприклад, зерна до нанорозмірного масштабу, створюючи гетерофазні структури на основі кристалічної та квазікристалічної фаз тощо. Це дозволило встановити взаємозв'язок між властивостями покриттів та характеристиками структури. Надалі на основі отриманих закономірностей були розроблені покриття, які істотно збільшували термін служби інструментів (прес-форм для виготовлення виробів з армованих вуглецем пластмас, штампів для виготовлення прецизійних деталей гарячим штампуванням), дозволяли уникнути холодного зварювання деталей вузлів тертя, що працюють в умовах вакууму і т.п. (Демченков С.О. спільно з європейськими партнерами у рамках програми РП7).

З середини 2000-х років почались розробки методів синтезу металоорганічних твердо- та рідкофазних композитів з наночастинками, отриманими електронно-променевим осадженням, з метою їх наступного використання в медицині та фармацевтиці. В цей період спільно з Інститутом експериментальної



Б.О. Мовчан з призом «Відзнака Р.Ф. Банша за новаторські роботи в галузі електронно-променевого осадження та за діяльність керівника та наставника на протязі 60 років на трьох континентах» від американського Advanced Surface Engineering Division (2016 р.)

патології, онкології та радіобіології ім. Р.Є. Кавецького НАН України (м. Київ), розроблений «Спосіб отримання стабілізованого розчину наночастинок магнетиту для адресної доставки протипухлинних препаратів, включно з використанням наночастинок магнетиту в полімерній оболонці».

Спільно з Львівським національним медичним університетом ім. Д. Галицького розроблена технологія виготовлення мазей, гелів, емульсій антимікробної та протизапальної дії для нанесення на шкіру.

У МЦ ЕПТ (2010–2020 рр.) досліджені структури та властивості розробленого варіанту градієнтного термобар'єрного покриття  $\text{CoCrAlY/ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$  для лопаток газотурбінних двигунів; виконано цикл досліджень з оптимізації структури та властивостей градієнтного твердого ерозійно-стійкого та демпфуючого покриття на основі карбиду бора та розроблено основи одностадійної електронно-променевої технології його осадження (Б.О. Мовчан, Ю.Е. Рудой, К.Ю. Яковчук, А.В. Микитчик).

Розробки ІЕЗ захищені патентами США, Європи, КНР та України.

*О.М. Корнієнко*