

## НОВІТНІ ПРОЦЕСИ МГД-ПЛАЗМОВОЇ ОБРОБКИ РІДКИХ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

Повідомлення на офіційному сайті НАНУ <http://nas.gov.ua/UA/Messages/Pages/View.aspx?MessageID=5554>

27 вересня 2019 р. делегація Президії НАН України на чолі з першим віце-президентом НАН України, головою Секції фізико-технічних і математичних наук НАН України, академіком НАН України А.Г. Наумовцем відвідала Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (ФТІМС НАНУ). До складу делегації входили керівник сектора фізико-технічних і математичних наук науково-організаційного відділу Президії НАН України, к. т. н. І.А. Мальчевський та учений секретар сектора, к. т. н. Беспалов С.А.

Метою відвідання було ознайомлення з ходом виконання цільового науково-технічного проекту НАН України «Проривні МГД-плазмові технології одержання нового покоління литих конструкційних та композиційних матеріалів для високотехнологічних галузей техніки», який виконується протягом 2018-2019 рр. за Розпорядженнями Президії НАН України № 440 від 01.08.2018 р. та № 122 від 26.02.2019 р. за напрямом «Підтримка пріоритетних для держави наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок» та фінансується в межах бюджетної програми КПКВК 6541230 «Підтримка розвитку пріоритетних напрямів наукових досліджень».

Акад. А.Г. Наумовець ознайомився з результатами проведених досліджень, які представили керівник проекту – акад. НАНУ, зав. відд. магнітної гідродинаміки ФТІМС НАНУ В.І. Дубодєлов, відповідальні виконавці – чл.-кор. НАН України, директор ФТІМС НАНУ А.В. Нарівський та д. т. н., заст. директора ФТІМС НАНУ А.М. Верховлюк і д. т. н., заст. директора ФТІМС НАНУ М.І. Тарасевич. До виконання мультидисциплінарного проекту за окремими напрямками залучені провідні фахівці інших установ НАН України – чл.-кор. НАНУ, зав. відд. Інституту фізичної хімії (ІФХ) ім. Л.В. Писаржевського НАНУ Стрижак П.Є., д. т. н., зав. лаб. Інституту металофізики (ІМФ) ім. Г.В. Курдюмова НАНУ В.Є. Панарін.



*Перший віце-президент НАНУ, акад. НАНУ А.Г. Наумовець (у центрі), акад. НАНУ, зав. відд. ФТІМС НАНУ В.І. Дубодєлов (ліворуч), чл.-кор. НАНУ, директор ФТІМС НАНУ А.В. Нарівський (праворуч)*

В основу проекту покладено ідею комплексного впливу на металевий розплав термосило-вими діями, зокрема, низькотемпературною плазмою, яка занурена у розплав, та електромагнітними полями, що забезпечують індукційний нагрів і відповідні гідродинамічні режими руху рідкого

металу в умовах впливу магнітогідродинамічних (МГД) чинників. Таке технічне рішення дозволяє руйнувати області мікронеоднорідностей у рідкому сплаві, які є носіями небажаної металургійної спадковості, диспергувати наявні кластери, інтерметаліди, здійснювати синтез зміцнюючих фаз безпосередньо у матричному сплаві. Це досягається унікальним поєднанням оригінального багатофункціонального ливарного магнітодинамічного обладнання і супутніх МГД-технологій з процесами глибокої плазмової обробки металевих розплавів.

Запропонована розробка дозволить суттєво підвищити рівень механічних, технологічних та експлуатаційних властивостей алюмінієвих сплавів для високотехнологічних галузей машинобудування. Дослідження виконуються на двох групах сплавів:

1) до- та заевтектичні силуміни, які є найбільш поширеними ливарними алюмінієвими сплавами для машинобудування. Так, доевтектичні силуміни АК7ч і А356 широко застосовуються у авіабудуванні. Заевтектичний силумін А390 використовується для виготовлення поршнів двигунів внутрішнього згоряння;

2) сплави системи Al-Zn-Mg (деформівні та ливарні) і системи Al-Zn-Mg-Cu (деформівні), що відрізняються найбільш високими показниками міцності серед усіх алюмінієвих сплавів та є вельми затребуваними у високотехнологічній техніці стратегічного призначення. За інформацією фахівців ДП «Антонов», відомо, що сплави АЦ4Мг, В93 та 1933 використовуються у авіабудуванні при виготовленні великогабаритних і масивних поковок та штампвок для силових елементів внутрішнього каркасу літаків. Сплав В95 є основним для виробництва деталей ходової групи (катків) бронетанкової техніки. Зі сплаву В96Ц виготовляються елементи конструкції центрифуг для збагачення урану, деталі авіаційної та ракетної техніки.

Презентації виконавців проекту дозволили висвітлити усі основні аспекти проекту, головні здобутки та перспективи подальших досліджень.



*Доповіді основних виконавців проекту –  
акад. В.І. Дубодєлова (ліворуч) та чл.-кор. А.В. Нарівського (праворуч)*

Так, керівник проекту акад. В.І. Дубодєлов доповів про принципову технологічну схему процесу, експериментальне обладнання і технологічну оснастку. Він повідомив про численні модельні та натурні експерименти на рідкому металі з використанням дослідно-промислового ливарного магнітодинамічного обладнання, сучасні методів й прилади для дослідження структури та властивостей литого металу в ІМФ ім. Курдюмова НАНУ.

Акад. В.І. Дубодєлов також навів результати проведених експериментальних досліджень процесів обробки експериментальних доевтектичних силумінів аргоновою плазмою в умовах МГД-дії та керованого електромагнітного перемішування. Після такої обробки розплаву диспергуються структурні складові сплаву аж до виродження евтектики в них. Як наслідок, змінюється процес зміцнення сплавів у межах евтектичної колонії: замість композиційного, характерного для вихідного стану, реалізується механізм дисперсійного зміцнення, що сприяє збільшенню пластичності сплаву. Такі структурні зміни в сплавах під дією плазми є нерівноважними, але можуть бути стабільними в часі.

Чл.-кор. А.В. Нарівський ознайомив з математичним моделюванням процесів МГД-плазмової обробки алюмінієвих сплавів у МДУ, що виконано під керівництвом д. т. н., заст. директора ФТІМС НАНУ М.І. Тарасевича. Одержані результати дозволили визначити раціональні температурні, часові і гідродинамічні параметри обробки, а також встановити відповідні співвідношення розмірів реакційної камери для випаровування компонентів сплавів.

Також чл.-кор. А.В. Нарівський доповів про технології одержання композиційних та конструкційних матеріалів з використанням плазмово-кінетичних і високотемпературних реагентних дій на глибинні шари рідкометалевих та інших систем і фазові перетворення в них. Такі процеси обробки можуть здійснюватися в звичайних умовах або у вакуумі з одночасною подачею композитних добавок через плазмотрон, що занурений у рідкий метал. Створені технології та обладнання не мають аналогів у світі, дозволяють нагрівати сплави в процесі обробки та скоротити вміст у них газів (більш ніж на 80%) і неметалевих включень (до 60%). При плазмово-кінетичних діях на алюмінієвий розплав відбуваються зміни в його рідкій будові – зменшується більш ніж у 2 рази середній розмір мікрогруповань (з 26,8 нм до 11,2 нм) і диспергується структура сплавів у твердому стані. В результаті цього досягається підвищення міцності виливків з силуміну на 25-30%, а відносно видовження зростає у 1,7-1,8 рази, що свідчить про можливість поєднання процесів плазмового рафінування та модифікування сплавів без використання спеціальних реагентів.

Акад. В.І. Дубодєлов надав інформацію про проведене фахівцями ІФХ ім. Л.В. Писаржевського НАНУ під керівництвом чл.-кор. НАНУ, зав. відд. П.Є. Стрижака дослідження щодо формування нанокластерів кремнію у газовій фазі в умовах дії плазмового нагріву. Підхід заснований на оцінці константи рівноваги кожної стадії формування кластерів з використанням термодинамічних розрахунків в заданих умовах і дозволяє оцінити рівноважну їх концентрацію у системі. Встановлено, що розмір та розподіл кремнієвих кластерів можна регулювати шляхом зміни температури нагріву і парціального тиску кремнію в газовій фазі. Одержані результати можуть бути застосовані для синтезу наночастинок кремнію у розплавах силумінів, а загалом це представляє значний інтерес в різних областях, зокрема, у мікроелектроніці та металургії.

Акад. В.І. Дубодєлов повідомив, що проведена обробка експериментального сплаву АЦ4Мг дозволила забезпечити високу дисперсність включень зміцнюючої фази ( $Mg_2Si$ ) – до нанорозмірів ( $\leq 100$  нм), рівномірно розподілити їх в  $\alpha$ -твердому розчині, суттєво підвищити рівномірність розподілу легуючих компонентів (Cu, Zn, Mg, Mn, Si, Fe) в алюмінієвій матриці і зменшити розміри їх угруповань. Особливістю ливарного сплаву АЦ4Мг є необхідність застосування термообробки на заключній стадії його одержання і передбачений стандартом широкий інтервал показників міцності сплаву (216-265 МПа), а також досить невисокі значення відносного видовження (2%). Відпрацювання раціональних технологічних режимів комплексної обробки розплаву забезпечило при випробуваннях механічних властивостей литого сплаву суттєве скорочення інтервалу коливань значень міцності, підвищення її максимальних значень над стандартними на 20%, а відносного видовження – у 3 рази. Подальше дослідження впливу МГД-плазмової дії на розплав дозволить визначити потенційні можливості нових технологій для підвищення механічних властивостей сплаву АЦ4Мг, зокрема, в умовах роботи при підвищених температурах, а також для зменшення схильності до утворення гарячих тріщин. У перспективі це забезпечить здешевлення виробництва сплавів та виробів з них, подовження терміну їх експлуатації.

Термодинамічна оцінка структурних складових сплаву В96Ц, проведена під керівництвом д. т. н., заст. директора ФТІМС НАНУ А.М. Верховлюка та д. т. н., пр. н. с. О.А. Щерецького, дозволила визначити вплив легуючих компонентів на виникнення гарячих тріщин, утворення інтерметалідних фаз і легкоплавких евтектик.

Окремо було зазначено, що в ході комплексних металографічних досліджень зразків одержаних експериментальних сплавів, які проводилися в Інституті металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАНУ під керівництвом д. т. н., зав. лаб. В.Є. Панаріна, було зафіксоване невідоме раніше явище утворення аморфних плівок на зломах зразків з алюмінієвого сплаву АЦ4Мг. Такий феномен потребує подальших досліджень, у т. ч. на інших сплавах систем Al-Zn-Mg і Al-Zn-Mg-Cu, що має велике значення для металовиробів, які виготовляються методом пластичної деформації або піддаються їй у процесі експлуатації.



*Обговорення результатів виконання проекту*

На технологічній дільниці відділу магнітної гідродинаміки в присутності акад. А.Г. Наумовця був проведений експеримент по комплексній МГД-плазмовій обробці рідкого алюмінієвого сплаву А390 масою 150 кг у дослідно-промисловій магнітодинамічній установці (МДУ). Попередньо сплав був підданий рафінуючій обробці – дегазація від водню шляхом продувки розплаву аргонном з видаленням неметалевих включень фільтрацією через пінокерамічний фільтр в умовах дії змінного електричного струму, електромагнітних полів і МГД-чинників. Ці розробки є новітніми, захищені патентами та забезпечують дегазацію металу на рівні вакуумування (вміст водню складає  $0,05 \text{ см}^3/100 \text{ г}$  сплаву) і видалення до 80% неметалевих включень. Головною метою подальшої МГД-плазмової обробки є суттєве зменшення розміру часток первинного (не більше 20 мкм) і евтектичного кремнію, а також підвищення властивостей сплаву, особливо відносного видовження.

В іншому експерименті показано можливості МДУ для електромагнітного розливання алюмінієвого сплаву широким плоским потоком, що необхідно для технологій валкового лиття-прокатування листової металопродукції. Зацікавленими у таких технологіях є ряд стратегічних вітчизняних машинобудівних компаній, наприклад, КБ «Південне».



*Перший віце-президент НАНУ, акад. НАНУ А.Г. Наумовець на технологічній дільниці відділу магнітної гідродинаміки ФТІМС НАНУ*



*Робота плазмотрону з випарною реакційною камерою в холостому режимі (ліворуч) та процес МГД-плазмової обробки рідкого алюмінієвого сплаву А390 в ливарній магнітодинамічній установці (праворуч)*

На технологічній дільниці відділу процесів плавки і рафінування сплавів акад. А.Г. Наумовцю продемонстрували плазмове обладнання для глибинної обробки рідкого металу в атмосферних умовах та у вакуумі. Також був показаний процес обробки алюмінієвого сплаву А390 плазмотроном, зануреним у розплав.



*Перший віце-президент НАНУ, акад. НАНУ А.Г. Наумовець на технологічній дільниці відділу процесів плавки та рафінування сплавів ФТМС НАНУ*



*Плазмотрон (ліворуч) та глибинна плазмове рафінуюча обробка алюмінієвого розплаву (праворуч)*

За результатами виконання проекту, оприлюднено 10 наукових праць, у т. ч.: - підготовлено заявку на міжнародний патент, що перебуває у стадії експертизи; - опубліковано 5 наукових статей у провідних фахових виданнях, зокрема, у високорейтинговому журналі “Chemical Physics Letters”; - представлено 4 доповіді на науково-практичних конференціях, серед яких – 11-та Міжнародна конференція з фундаментальної та прикладної магнітної гідродинаміки RAMIR-2019 (м. Реймс, Франція).

Одержані зразки металевих матеріалів, а також створювані новітні технології та обладнання, що не мають аналогів у світі, забезпечать підвищення механічних, технологічних та експлуатаційних властивостей алюмінієвих сплавів, які широко використовуються для виготовлення відповідальних конструкцій у високотехнологічних галузях промисловості. Зацікавленість в зразках експериментальних сплавів, розроблених технологіях та обладнанні виявляли провідні вітчизняні підприємства та компанії, зокрема, КБ «Прогрес» ім. Івченка, ДП «Антонов», КБ «Південне», ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект», ДП «КБ ім. Морозова», ДП «Завод ім. Малишева», АТ «Мотор-Січ», ДП «Укрзалізниця».

Подальше дослідження впливу МГД-плазмової дії на розплав дозволить визначити потенційні можливості нових технологій для підвищення механічних властивостей алюмінієвих сплавів, зокрема, в умовах роботи при підвищених температурах, а також для зменшення схильності до утворення гарячих тріщин. У перспективі це забезпечить здешевлення виробництва сплавів та виробів з них, подовження терміну їх експлуатації.

Перший віце-президент НАНУ, акад. НАНУ А.Г. Наумовець поставив численні питання стосовно особливостей проведених експериментів, механізму складних процесів МГД-плазмової обробки металевих розплавів, оцінки одержаних результатів досліджень, виказав багато цінних порад, які будуть обов'язково враховані виконавцями проекту.