

ПАТОНІВСЬКА МЕТАЛУРГІЯ

Л.Б. Медовар, С.В. Ахонін

5 березня 2020 р. вчені та виробничники в галузі зварювання відсвяткували 150-річчя з дня народження засновника нашого Інституту — Євгена Оскаровича Патона. В цій статті зроблено спробу проаналізувати деякі риси цієї видатної людини, що сприяли виникненню саме металургійної потужної складової в барвистому спектрі наукових напрямків Інституту, а також окреслені перспективи металургійних розробок, що проводять дослідники Інституту сьогодні.

Є.О. Патон був водночас вченим й інженером з надзвичайно широкими інтересами в різних галузях людської діяльності. Відповідним був і його кругозір. Тому й направив він дослідження свого Інституту на проблему якості сталей, що підлягають зварюванню. Металургія тоді видавалась хоча й спорідненою галуззю науки, але все ж таки достатньо далекою. Сьогодні ж очевидно є тотожність металургійних процесів при отриманні металевих зливок та виливків і зварюванні металів з їх розплавленням і наступним твердінням у зварному шві. Різниця, за виключенням розмірів, практично немає, особливо у випадку зварювання металів одного хімічного складу за допомогою зварювального електроду/дроту того ж хімічного складу, або ж без нього електронним чи лазерним променем. В той же час, у більшості випадків майже вирішальний вплив на якість зварного з'єднання та зварної конструкції в цілому має металургійна якість самих металів, що взаємодіють в процесі зварювання. Тому дослідники Патонівського інституту сміливо взялися за проблему якості сталей для зварювання й почали активно працювати з металом для зварних конструкцій. Найяскравішим прикладом їх зусиль стало створення наприкінці 40-х років минулого сторіття найпоширенішої й сьогодні на теренах колишнього СРСР високоміцної низьколегованої сталі 09Г2С. Зазначимо також, що зварники й металурги за десятиріччя виробництва та використання добре вивчили не тільки позитивні, але й негативні властивості цієї сталі, особливо схильність до утворення т.з. ламелярних або ж шаруватих трісок, що зумовлені ліквациєю кремнію. Тому не дивною була спроба покращити цю сталь, що призвела майже 30 років потому дослідників Інституту до створення сталі 09Г2СЮЧ.

Ми підкреслюємо тут роль зварювальників тому, що зазвичай створенням нових сталей займаються металознавці й металурги, іноді ливарники. В той же час саме подібність металургійних процесів при литті, зварюванні та власне металургії доводить вірність наукової позиції Євгена Оскаровича Патона, який не допускав обмеження наукового та інженерного пошуку. Прямо з цієї точки зору та з огляду на сучасні тенденції розвитку науки видається нагальним припинити штучний поділ наук на фундаментальні та прикладні. Наука єдина і якщо порівняти в застарілих, на наш погляд, термінах її фундаментальні та прикладні, тобто інженерні складові з природою, то це два рівно значущих крила могутнього птаха (недарма ж ще знання геометри елліністичного світу відзначались й видатними інженерними досягненнями). Без перебільшення ми можемо сказати, що дуже різні досягнення цивілізації, як, наприклад, унікальні літаки, мобільні телефони, хмарочоси і комп'ютери з'явилися тільки завдяки поєднанню досягнень науки та інженерії.

Повернемось все ж таки до сталі 09Г2СЮЧ, яка в деяких зразках давала дуже вдалі показники механічних властивостей у порівнянні зі сталлю 09Г2С. Але в цьому випадку якраз відсутність тісної взаємодії з металургами нашкодила зварювальникам. Вони не взяли до уваги багаторічний досвід металургів в зусиллях використати легування рідкоземельними елементами, що свідчив про неможливість досягнення стабільних позитивних результатів при легуванні великих об'ємів металу. Знову ж таки з причин схильності легуючих рідкоземельних елементів до ліквациї. Ми навели ці два приклади для ілюстрації одного з напрямків металургійних пошуків патонівців — створення нових конструкційних матеріалів для зварних конструкцій. Цей шлях продовжується і розвивається і зараз. Наведемо ще два приклади, які стосуються принципових для металургії напрямків, а саме створення й використання високоміцних низько- й середньолегованих сталей. Перш за все торкнемося проблеми використання т.з. карбонітридного зміцнення сталей, яке зазвичай базується на легуванні сталей ванадієм, ніобієм, титаном та азотом. Найвідомішою й найпоширенішою сталлю цього типу є сталь 16Г2АФ. Механічні властивості цієї сталі щонайменше на 20 % перевищують властивості сталі 09Г2С. Але з самого початку широкого впровадження цієї сталі, особливо в вигляді товстолистового прокату для відповідальних конструкцій, саме зварники патонівського інституту першими зрозуміли вади цієї сталі в зварних з'єднаннях, особливо при значних перерізах, що проявились в ліквациї азоту при розплавленні основного металу. В той же час сталі з карбонітридним зміцненням чудово проявили й проявляють себе в литому вигляді й там, де зварювання непотрібне, широко використовуються для виготовлення різноманітного лиття відповідального призначення.

Інший приклад вдалого створення нових сталей патонівцями є винайдення товстолистової сталі 03X20H16AG6 для елементів надпровідних магнітних систем термоядерного реактору проекту ITER, промислова реалізація технології її виплавки й отримання великогазових листових зливок, їх прокатки на товстий лист й подальшого електрошлакового зварювання. Робота ця безумовно націлена на перспективу й має знайти своє місце при поновленні участі України в роботах за міжнародним проектом створення повномасштабного ТОКОМАКу.

Цей напрям металургійних досліджень вдало доповнюють роботи, що націлені на створення нових титанових сплавів з підвищеними експлуатаційними характеристиками. Характерною рисою цих сплавів є те, що вони добре зварюються.

Перші дослідження, виконані в ІЕЗ ім. Е.О. Патона з метою створення нових більш ефективних сплавів на основі титану, були спрямовані на розробку сплавів для зварювального дроту. Задача полягала в тому, щоб підвищити ступінь легування дроту і таким чином при зварюванні середньо- і високолегованих сплавів збільшити міцність швів, не знижуючи показників пластичності. За результатами цих досліджень було розроблено титановий сплав марки СП15 системи $Ti-5Al-2Mo-2V-3,5Nb-1Zr$. Застосування дроту з цього сплаву при зварюванні середньо- і високолегованих титанових сплавів забезпечує найкраще сполучення міцності і пластичності швів у порівнянні з дротами, передбаченими закордонними стандартами.

Подальші дослідження показали, що сплав СП15 має комплекс характеристик, що дозволяють застосовувати його не тільки у вигляді зварювального дроту. У литому стані сплав СП15 за показниками міцності і пластичності перевищує усі відомі ливарні сплави. Тому він дуже ефективний для великогабаритного фасонного литва, зокрема силових елементів виробів відповідального призначення. Не менш важливою особливістю сплаву СП15 є його висока корозійна стійкість в агресивних середовищах, що перевищує стійкість технічного титану, міцність якого вдвічі нижче, ніж сплаву СП15. Тому сплав СП15 є дуже ефективним і для хімічного машинобудування.

Для потреб авіаційної промисловості України в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона розроблено високоміцний титановий сплав Т110 ($Ti-5Al-1Mo-1V-4Nb-2Fe-0,5Zr$), який має межу міцності не менш як 1100 МПа і за своїми механічними характеристиками, в тому числі втомними, перевищує показники одного з найкращих радянських титанових сплавів авіаційного призначення ВТ22 ($Ti-5Al-5Mo-5V-1Fe-1Cr$). На листи зі сплаву Т110 оформлено технічні умови України ТУУ 27.4.05416923.071. Цей сплав використовують на практиці для бронезахисних елементів у конструкціях літальних апаратів.

Серед останніх розробок Інституту слід відзначити новий високоміцний двофазний ($\alpha+\beta$)-титановий сплав на основі восьмикомпонентної системи легування $Ti-5Al-3Mo-2V-4Nb-1Cr-1Fe-2,5Zr$ (умовна марка Т120) з межею міцності не меншою за 1200 МПа та відносним подовженням не менш як 12 %. На цей сплав у 2016 р. отримано патент України.

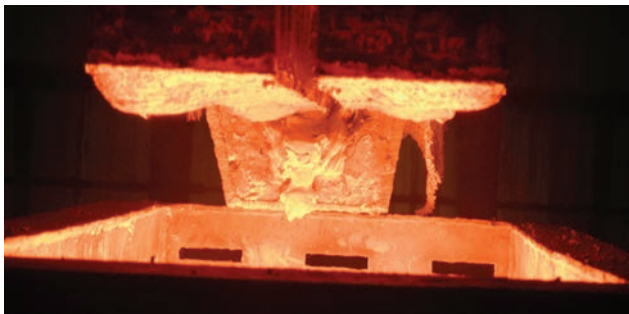
Для виробництва титанових сплавів в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона розроблено технологію електронно-променевої плавки з проміжною ємністю (ЕПП). Технологія ЕПП забезпечує гарантоване видалення тугоплавких включень високої і низької густини. Плавка здійснюється у вакуумі 0,1...0,01 Па, що практично виключає додаткове забруднення титану газовими домішками, що дозволяє використовувати в якості вихідної шихти до 100 % брухту і губчастий титан зниженої якості без його попереднього пресування в електрод, що витрачається. Технологія ЕПП також дозволяє виплавляти зливки як круглого, так і квадратного перетинів, а також зливки-сляби.



Електронно-променева установка для виплавки титанових зливок діаметром до 1100 мм та масою до 20 т



Зливки жароміцного титанового сплаву ВТ3-1 діаметром 840 мм та довжиною 3000 мм



Плавлення витратних електродів при виплавці листового зливка ЕШП

ненайкращі часи свого життя, Інститут вражає обладнанням своїх лабораторій та дослідно-промислових виробництв, в нашому випадку — наявністю металургійних печей для отримання багатотонних зливок сталей та сплавів різних металів.

Найвідомішим успіхом металургійної діяльності Інституту стало створення нових переплавних процесів спеціальної електromеталургії та проведення всебічних досліджень цих процесів, якості переплавленого металу, створення відповідного обладнання та впровадження цих розробок в промисловість, або ж, як тепер кажуть, інноваційна діяльність. Почалось все ще за життя Євгена Оскаровича, коли відкриття явища проходження електричного струму через розплавлений шлак, що не є провідником електричного струму в твердому стані, стало основою для створення не тільки нового способу зварювання — електрошлакового, але й нового способу плавлення металів — електрошлакового переплаву (ЕШП). Перший в світі зливок ЕШП було отримано в лабораторії Інституту ще у 1952 р. Зазначимо також, що приблизно через 15 років в Інституті було розроблено ще один процес спеціальної плавки металів — це плазмово-дуговий переплав (ПДП). Тобто, з чотирьох основних переплавних процесів спеціальної електromеталургії (вакуумно-дугового, електрошлакового, плазмово-дугового та електронно-променевого) половину створено саме в Патонівському інституті. Сьогодні ми продовжуємо дослідження цих процесів, створюємо нові системи автоматичного керування плавленням та твердінням зливоків. Більш того, вперше в Україні налагоджене серійне виробництво титанових зливоків



ЕШП листового зливка

В даний час головні авіабудівні фірми США використовують електронно-променевий титан для деталей відповідального призначення тільки після переплаву з проміжною ємністю.

Особливо відзначимо, що ці сплави пройшли весь шлях від винаходу і лабораторних випробувань до промислового виробництва в самому Інституті. Підкреслюємо це тому, що поширена сьогодні на всіх континентах структура наукових центрів, що об'єднує наукові лабораторії, конструкторів та виробництво, вперше в світі була реалізована саме Євгеном Оскаровичем Патonom. Навіть сьогодні, в

електронно-променевим переплавом, в тому числі безпосередньо з кричного блоку титанової губки. Особливу увагу дослідники приділяють і пошуку шляхів використання адитивної природи поступового плавлення та пошарового твердіння при переплавних процесах. Останнім часом в орбіту наших інтересів і досліджень увійшов і вакуумно-дуговий переплав.

Саме поєднання досліджень процесів зварювання та металургійних переплавних процесів отримання сталей та сплавів найвищого гатунку дозволяло й дозволяє нині патонівцям утримуватись на вістрі науково-технічного прогресу.

Автори сподіваються, що їм вдалося окреслити ті риси Євгена Оскаровича Патона, які зумовили появу наукового центру принципово нового типу з поєднанням наукових лабораторій, конструкторів обладнання та дослідного виробництва. Саме такий симбіоз дозволяє мінімізувати час між дослідженнями в лабораторіях вчених та реалізацією нових знань виробництвом найскладнішої техніки й матеріалів, згуртовує воедино науку і інновації.

Огляд діяльності Патонівського інституту безумовно потребує доповнення розповіддю про вплив Бориса Євгеновича Патона на його металургійну складову, про деталі якого не завжди можна про-

читати в його книгах та статтях. Зокрема про те, що саме він був ініціатором розвитку в Інституті не тільки електронно-променевого зварювання, а й переплаву. Безумовно, що визначну роль тут відіграла його унікальна наукова та інженерна інтуїція, яка була притаманна й Євгену Оскарівичу. Більш того, впродовж значного часу саме Борис Євгенович був, так би мовити, позаштатним радником керівників країни з питань металургії. Йому повинні бути вдячні Молдова та Білорусь, бо саме Б.Є. Патон ще за часів СРСР став ініціатором створення в цих країнах міні-металургійних заводів, які відіграють значну роль в економіці обох країн.

Підсумовуючи основні металургійні напрями досліджень та розробок Інституту, їх можна поділити на чотири складові:

- розробка нових металевих матеріалів та технологій їх виробництва від плавки до термічної обробки;
- дослідження металургійних явищ плавлення, рафінування та тверднення металів і сплавів, в тому числі в переплавних процесах та при формуванні зливків;
- розробка відповідного обладнання та ефективних технологій;
- прогностичні дослідження розвитку металургії.

Оскільки Патонівська школа передбачає націленість на нове, спробуємо окреслити перспективи по кожному з чотирьох напрямів. Безумовно, буде розширене використання найновіших комп'ютерних методів створення нових металевих матеріалів та аналізу фізико-хімічних процесів при їх виплавці та рафінуванні й продовжено вдосконалення власних математичних моделей процесів кристалізації. Нагальною задачею є також опанування деяких типів сталей та сплавів, що в силу численних причин вже широко застосовують в світі, але, на жаль, залишились поза колом наукового пошуку в Україні. Мова йде перш за все про інтерметаліди титану та заліза й так звані «суперсплави» на нікелевій основі типу Inconel для сучасних парових та газових турбін з супер надкритичними параметрами. Окрім цього потребують досконалого вивчення сталі японських металургів з торговою маркою HTUFF®. Завдяки особливостям мікролегування оксидами магнію ці сталі є стійкими до перегріву в зоні термічного впливу при зварюванні, що дозволило повернути в будівництво електрошлакове зварювання, оскільки зварні з'єднання таких сталей не потребують термічної обробки. Додамо до цього переліку ще й високоміцні надлегкі сталі з комплексним легуванням марганцем і алюмінієм, що мають питому вагу менше 7 т/м³.

В дослідженнях металургії переплавних процесів нагальним завданням є розширення існуючих математичних моделей для прогнозування ліквідаційних процесів при кристалізації високолегованих сталей і сплавів та утворення тих чи інших типів фаз в них. Такі моделі мають бути залучені до систем автоматичного керування переплавними процесами, що дозволить підняти рівень якості готових металів та сплавів. На найближчий час це видається головним в розробці нового обладнання й нових технологій.

Останній напрямок потребує сьогодні особливої уваги. На думку авторів в сучасних умовах так званої циркулярної економіки процеси спеціальної електрометалургії можуть й мають відіграти суттєву роль на шляху створення мікрометалургійних виробництв з річним обсягом випуску металу до 50 000 т шляхом переплаву відпрацьованих деталей з високолегованих сталей та сплавів для повернення їх в обіг з мінімальними втратами. Вважаємо, що саме ЕШП та холодноподові переплави, тобто ЕПП та ПДП, будуть затребувані для рециклінгу високолегованих сталей та сплавів. Слід акцентувати також, що переплавні процеси є вільною від CO₂ металургією.

Таким чином, вчені Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона ведуть дослідження для вирішення двох типів наукових й інженерних проблем сучасної спеціальної металургії — свого роду традиційних, які ми в більших, чи менших деталях окреслили, а також займаються перспективними напрямками, що пов'язанні з народженням на наших очах металургії майбутнього. В металургії переплавних процесів ми очікуємо появу промислових гібридних технологій, що поєднують відомі позитивні результати дугового й шлакового плавлення, а також ведення таких процесів у вакуумі. Видається також перспективним поєднання нагріву променем чи плазмою, характерних для холодноподових переплавів, із залученням додаткових джерел, наприклад, індукційного нагріву. Певні, ми є свідками радикальної трансформації металургії з реальним переходом від традиційного доменного процесу до водневого відновлення з компактними модулями виплавки, розливки й прокатки по типу ESP (endless strip production — безкінечне виробництво листового металу). В тісній творчій співпраці зі зварювальниками й матеріалознавцями Патонівська металургія має гарне майбутнє, безліч завдань й широке поле наукового й інженерного пошуку.