

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з наукової роботи
Національного технічного університету України
"Київський політехнічний інститут
ім. Ігоря Сікорського"
Віталій ПАСІЧНИК



АНОТОВАНИЙ ЗВІТ
про виконану роботу у 2021 році в рамках реалізації проєкту
із виконання наукових досліджень і розробок
«Нові високопластичні надміцні сталі Fe-Mn-Al-C: вплив технологічних параметрів на
формування їх структури та фізико-хімічні властивості»

Назва конкурсу: «Підтримка досліджень провідних та молодих учених»
Реєстраційний номер Проєкту: 2020.02/0283

Підстава для реалізації Проєкту з виконання наукових досліджень і розробок 2020.02/0283
«Нові високопластичні надміцні сталі Fe-Mn-Al-C: вплив технологічних параметрів на
формування їх структури та фізико-хімічні властивості»

Рішення наукової ради Національного фонду досліджень України щодо визначення переможця конкурсу «Підтримка досліджень провідних та молодих учених» протокол від «16-17» вересня 2020 року № 21

1. ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ПРО ПРОЄКТ

Загальна тривалість виконання проєкту 2020 рік – 2022 рік
Тривалість виконання Проєкту у 2021 році
Початок – 15 червня 2021 рік
Закінчення – 15 грудня 2021 рік

Загальна вартість Проєкту,
3,664,419 грн (три мільйони шістьсот шістьдесят чотири тисячі чотириста дев'ятнадцять гривень)
Вартість Проєкту по роках, грн.
1-й рік 513,819 грн (п'ятсот тринадцять тисяч вісімсот дев'ятнадцять гривень)
2-й рік 1,468,200 грн (один мільйон чотириста шістьдесят вісім тисяч двісті гривень)
3-й рік 1,682,400 грн (один мільйон шістьсот вісімдесят дві тисячі чотириста гривень)

2. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ВИКОНАВЦІВ ПРОЄКТУ

до виконання Проєкту залучено 4 виконавця, з них:
доктори наук _____;
кандидати наук _____ 4 _____;
інші працівники _____.

3. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ГРАНТООТРИМУВАЧА ТА ОРГАНІЗАЦІЮ(Ї) СУБВИКОНАВЦЯ(ІВ) ПРОЄКТУ

Грантоотримувач:

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Міністерство освіти і науки України
ЄДРПОУ 02070921

Код КВЕД: 72.19 – Дослідження й експериментальні розробки у сфері інших природничих і технічних наук

Стратегічні напрями наукової діяльності:

1. Фундаментальні наукові дослідження з найбільш важливих проблем розвитку науково-технічного, соціально-економічного, суспільно-політичного, людського потенціалу для забезпечення конкурентоспроможності України у світі та сталого розвитку суспільства і держави. 2. Інформаційні та комунікаційні технології. 3. Енергетика та енергоефективність. 4. Рациональне природокористування. 5. Науки про життя, нові технології профілактики та лікування найпоширеніших захворювань. 6. Нові речовини і матеріали.

Адреса: просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056

Телефон: (+38 044) 204-82-82

Адреса електронної пошти: mail@kpi.ua

Посилання на веб сторінку установи: <http://www.kpi.ua>

Субвиконавці на даному етапі виконання Проєкту не залучались.

4. ОПИС ПРОЄКТУ

4.1. Мета Проєкту

Дослідження впливу легуючих елементів на механізми зміцнення Fe-Mn-Al-C високоентропійних сталей і вибір оптимальної концентрації Mn, Al та C. Забезпечення високих показників міцності, пластичності та корозійної стійкості.

4.2. Основні завдання Проєкту

Дослідження теплових умов кристалізації новітніх високоміцних сталей на основі Fe-Mn-Al-C, ефекту зерноподрібнюючих домішок на процеси кристалізації та формування дрібнозернистої структури сплавів, умов виділення κ-карбідів при охолодженні, впливу термічної обробки на мікроструктуру нано-карбідних виділень у Fe-Mn-Al-C сталі, що головним чином, впливають на деформаційне зміцнення.

4.3. Детальний зміст Проєкту:

Сучасний стан проблеми

Визначено, що актуальним для дослідження є властивості високоміцних сталей на основі заліза, марганцю і алюмінію легованих C та Si. Поєднання механічних властивостей таких сталей, а саме високої міцності на розрив одночасно з високою пластичністю робить ці сплави привабливими для застосування в медицині, автомобільній, військовій, аерокосмічній та гірничій промисловостях.

Новизна Проєкту

Головним завданням проєкту є дослідження впливу хімічного складу і ролі легуючих елементів на механізми деформаційного зміцнення високоентропійних сталей в системі Fe-Mn-Al-C. Проєкт передбачає також вивчення впливу теплових умов кристалізації аустенітних сталей з високим вмістом марганцю, легованих рідкоземельними елементами, на утворення дрібнозернистої структури злитків.

Методологія дослідження

Дослідження поділено на три етапи. В двох перших етапах дослідження проводяться за участю розплаву: вибір метода та розробка оснастки для плавки Fe-Mn-Al-C сталей, кристалізація зразків сталей при різних умовах охолодження, рафінування і повторний переплав, механічні і корозійні випробування. На третьому етапі дослідження зразки сталі різного хімічного складу будуть термо-механічно оброблені та досліджені за допомогою растрової електронної мікроскопії. За хімічним складом заплановано виплавити три сплави, що головним чином відрізняються вмістом алюмінію, вуглецю і легуючих елементів.

5. ОТРИМАНІ НАУКОВІ АБО НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ в поточному році:

5.1. Опис наукових або науково-технічних результатів, отриманих в рамках виконання Проєкту

5.1.1. Дослідження властивостей сплавів у литому стані.

Проаналізовано мікроструктуру та фазовий склад Fe-Mn-Al-C сталей. Встановлено, що висока концентрація алюмінію < 12 мас.-% і вуглецю $< 1,5$ мас.-% в сплаві при 20 % мас.- Mn сприяє утворенню стабільних та малорозчинних при термічній обробці феритних дендритів (рис. 1 а), що негативно впливає на механічні властивості. Оптимальний вміст Al у сплаві становить $\sim 10 \pm 1$ % мас., Mn на рівні 25 % мас., а вуглецю близько 1 % мас. Сплави такого складу мають аустенітну структуру зміцнену к-карбідами (рис. 1 б) під час старіння і демонструють високий комплекс механічних властивостей та схильність до ефективної термічної обробки.

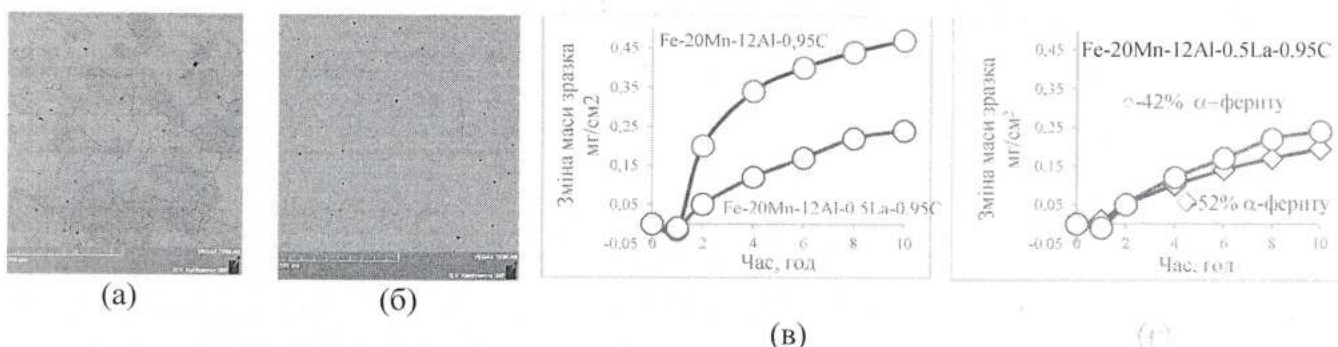


Рисунок 1. Мікроструктура сплавів Fe-20,7Mn-12,2Al-0,95C (а) та Fe-25,4Mn-9,2Al-0,92C (б) після гартування та старіння. Вплив La на корозійну стійкість і фазовий склад Fe-20Mn-12Al-0.1La-0,95C при 900°C (в,г)

5.1.2. Дослідження високотемпературної корозійної стійкості зразків та загальна обробка результатів досліджень металу у литому стані.

Високоміцних марганцеві сплави Fe-20Mn-12Al-0,95C і Fe-20Mn-12Al-0,5La-0,95C у литому стані показали високу корозійну стійкість при 700°C. Легування сплаву лантаном підвищує його корозійну стійкість при 900°C (рис 1 в, г). Кінетика окислення відповідала параболічному закону, що пов'язано з дифузією компонентів у сплаві та транспортом кисню через окалину. Було показано, що швидкість охолодження розплаву суттєво впливає не тільки фазовий склад сталі з високим вмістом Mn і Al, але також покращує його корозійну стійкість, особливо легованого La (рис. 1 г). Встановлено, що у продовж окислення литих сплавів під окалиною, відбувається фазове перетворення аустеніт→ферит, обумовлене переважним окисленням марганцю і виділенням к-карбідів. Оксидна плівка при температурах 700-900°C має складну будову: зовнішній шар в основному містить Mn_2O_3 , а внутрішній шпінель – $MnFe_2O_4$. Суцільний шар Al_2O_3 утворюється в зоні внутрішнього окислення на кордоні з новоутвореними зернами феритної фази. Таким чином Al_2O_3 , підвищує корозійну стійкість дуплексних сталей Fe-20Mn-12Al-0,95C при температурах 700-900°C. При термічній обробці, аустенітних сталей в технічних газах N_2 -H або Ar- H_2 за даними FactSage, pO_2 може коливатись в межах 10^{-20} - 10^{-6} атм в залежності від температури і кількості домішок кисню і парів води. MnO_2 і Mn_2O_3 , як і Fe_2O_3 стабільні лише в умовах високого pO_2 . Таким чином, $MnFe_2O_4$ і Al_2O_3 , є основними компонентами окалини, що утворюється при термічній обробці аустенітних Fe-Mn-Al-C сталей.

Висновки:

1. Встановлено хімічний склад аустенітних TRIPLEX-сталей, зміцнених к-карбідами, які демонструють високий комплекс механічних властивостей.
2. Fe-Mn-Al-C сталь, легована добавками La, демонструє хорошу корозійну стійкість при температурах до 700-900°C.
3. Показано що термічну обробку Fe-Mn-Al-C сталей доцільно проводити в суміші Ar-3% H_2 , у якій домішки вологи не перевищують 10 ppm.

5.1.3. Електрошлаковий переплав (ЕШП) модельних Fe-Mn-Al-C сплавів. Дослідження лікації за густиною, хімічного складу і мікроструктури сплавів, неметалевих включень в злитках, отриманих різними методами.

Проаналізована мікроструктура і хімічний склад модельних сплавів Fe-25Mn-12Al-1,5C (№11), Fe-25Mn-10Al-1C (№12), та Fe-25Mn-10Al-1C-1La (№13), що були виплавлені індукційною плавкою (ІП) і ЕШП (рис 2). Досліджені сплави мали аустенітну структуру з κ-карбідами, що формуються на границях між δ-феритом і γ-Fe (рис. 2).

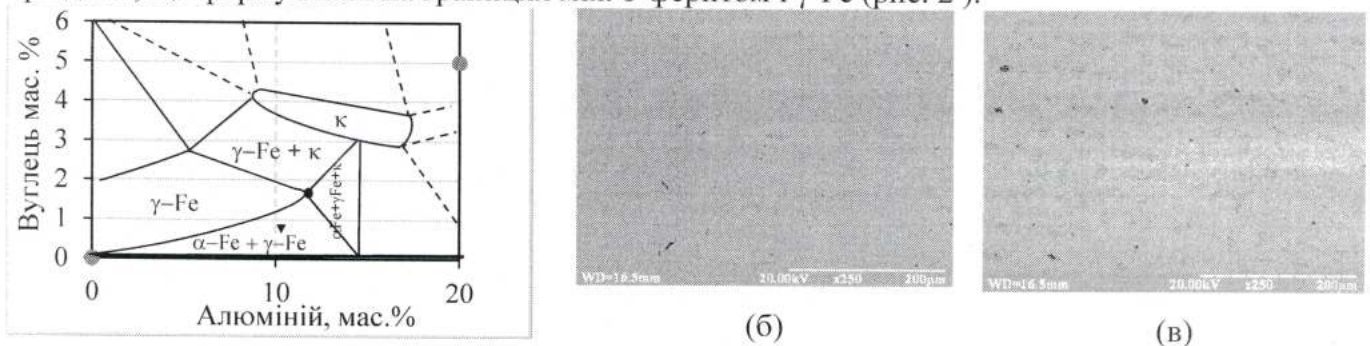


Рис. 2. Проекція поверхні солідус для сталей Fe-25Mn-xAl-yC (а), (●) - №11 та (▼) - №12, 13). Макроструктура сплаву №11 після індукційного переплаву (б) та сплаву №11 після ЕШП (в)

Рентгено-флуоресцентний аналіз литих зразків сплавів №11-13 показав помітну ліквідацію вмісту Al в злитках після індукційного переплаву, а особливо в злитку після ЕШП. В структурі злитків присутня значна кількість неметалевих включень, які складаються з фосфідів, сульфідів та помітну кількість оксидів, нітридів та оксинітридів. Після рафінуючого ЕШП основною фазою в сплаві Fe-25Mn-12Al-1,5C залишається аустеніт і κ-карбіди, кількість яких є значно більшою і розподілені вони більш рівномірно, ніж у вихідному зразку. Кількість неметалевих включень значно більша, а їх розмір перевищує розміри аналогічних виділень у литому сплаві. В основному це оксиди та фосфіди. В складі неметалевих включень після ЕШП помітно зменшалась кількість азоту та сірки. Встановлено, що індукційне плавлення TRIPLEX-сталей з подальшим розливанням забезпечує рівномірний розподіл і оптимальний розмір неметалевих включень. Сплави мають незначну кількість фосфідів і сульфідів, але помітну кількість оксидів і нітридів

5.1.4. Рафінування Fe-Mn-Al-C сталей добавками лантану.

Сплав Fe-25Mn-10Al-1C-1La, містив основні фази, γ-аустеніт, δ-ферит і κ-карбіди, а також велику кількість рівномірно розподілених дрібних включень >1 мкм, залишками La₂O₃, що утворився під час індукційної плавки. SEM/EDX не виявив нітридних, фосфідних та сульфідних неметалевих включень. У порівнянні з сплавами, які були виготовлені вакуумно-дуговим переплавом або ЕШП, модифікований La сплав має більш однорідну та рівномірну будову феритних дендритів, а розмір їх при цьому є трохи меншим. Це вказує на здатність лантану не лише до рафінування, але й до модифікування високо марганцевих TRIPLEX-сталей.

Висновки:

1. TRIPLEX-сталі, концентрація алюмінію у яких більше 10 % мас., схильні до ліквідацій за густиною елементів. ЕШП не здатен нівелювати ліквідаційну картину вихідного злитку.
2. ЕШП суттєво зменшенню вміст азоту і сірки в складі неметалевих включень TRIPLEX-сталей.
3. В сплаві Fe-25Mn-12Al-1,5C після ЕШП неметалеві включення мають значно більші розміри і містять у своєму складі фосфор.
4. Індукційне плавлення TRIPLEX-сталей забезпечує рівномірний розподіл і оптимальний розмір неметалевих включень, які містять незначну кількість фосфідів і сульфідів, але помітну кількість оксидів і нітридів.
5. Ефективне рафінування TRIPLEX-сталей при індукційному плавленні можливо за рахунок легування їх лантаном. У сплаві Fe-25Mn-10Al-1C-1La не виявлено нітридних, фосфідних та сульфідних включень.

5.2. За наявності науково-технічної продукції обґрунтування її переваг у порівнянні з існуючими аналогами

Одержання науково-технічної продукції на даному етапі виконання Проєкту не було заявлено.

5.3. Практична цінність отриманих результатів реалізації Проєкту для економіки та суспільства

Результати, одержані в ході виконання даного етапу проєкту показали, що високомарганцеві TRIPLEX-сталі з вмістом алюмінію більше 10 % мас. схильні до ліквацій за густиною основних компонентів при одержанні з них литих зразків. Навіть повторний електрошлаковий переплав не здатен нівелювати лікваційну картину та зберігає характер розподілу компонентів відповідно до вихідного злитку. Встановлено, що електрошлаковий переплав нових Fe-Mn-Al-C сталей хоча помітно зменшує вміст азоту і сірки в складі неметалевих включень, не спроможний рафінувати сплав від шкідливих фосфідних домішок. Дослідження структурно-фазового стану, характеру розподілу та кількості неметалевих включень у Fe-Mn-Al-C сплавах, показали, що вакуумно-дуговий переплав також не має рафінуючого впливу на розплави TRIPLEX-сталей. Ефективне застосування даного методу для виплавки Fe-Mn-Al-C сталей потребує використання високочистих металів. Традиційне індукційне плавлення на повітрі з подальшим заливанням розплаву у форму є найбільш зручним та економічно вигідним способом одержання Fe-Mn-Al-C сталей. Даний підхід дозволяє забезпечити більшу швидкість кристалізації розплаву та зафіксувати аустенітну структуру одержуваних злитків. Цей метод забезпечує рівномірний розподіл і оптимальний розмір неметалевих включень. Сплави після індукційного плавлення мають незначну кількість фосфідів і сульфідів, але все таки помітну кількість оксидів і нітридів. Показано, що ефективне рафінування TRIPLEX-сталей при індукційному плавленні можливо за рахунок легування їх лантаном. У сплаві, що був легований La не виявлено нітридних, фосфідних та сульфідних неметалевих включень. Лантан здатен не лише рафінувати, але й модифікувати структуру TRIPLEX-сталей, про що свідчить формування більш рівномірної та дрібнозернистої структури, порівняно з не модифікованими аналогами.

Вищезазначені результати сприяють раціональному використанню матеріалів та обладнання для виготовлення стратегічно важливих для України сплавів і, відповідно, підкреслюють роль сучасних лабораторних і промислових досліджень у розвитку металургійної промисловості України.

5.4. Опис шляхів та способів подальшого використання результатів виконання Проєкту в суспільній практиці.

Одержання нових знань про формування кристалічної структури надміцних сталей системи Fe-Mn-Al-C, що є органічною частиною лекційного курсу «Структуроутворення металів і сплавів», який викладається для студентів рівня PhD і є важливою складовою формування майбутнього фахівця в галузі металургії. При виконанні проєкту були апробовані різні методи одержання нових високопластичних і надміцних Fe-Mn-Al-C сталей, як наприклад аргоно-дугова, індукційна плавка на повітрі та повторний електрошлаковий переплав. Досліджено вплив різних методів переплаву на рафінування аустенітних сплавів з високим вмістом марганцю, алюмінію і вуглецю. Означені технології та підходи можуть бути окремо опубліковані в фахових виданнях і використані в подальших дослідженнях не тільки нових сталей, але й інших високоміцних та легких сплавів, до яких також можна віднести нові сплави та основи титану та алюмінію.

Всі наукові результати та методики напрацьовані при виконанні запланованих проєктом досліджень сформулюють підґрунтя для освоєння виробництва найбільш сучасних сплавів для подвійного використання за рахунок чого підвищиться загальний рівень української металургії та значно зросте її конкурентоспроможність.

Науковий керівник Проєкту

Шемет Володимир Жданович



(підпис)

