

УДК 669.15

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2025.3\(501\).6](https://doi.org/10.15589/znп2025.3(501).6)

INFLUENCE OF RARE EARTH METALS ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF IRON-CARBON ALLOYS

ВПЛИВ РІДКІЗОЗЕМЕЛЬНИХ МЕТАЛІВ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВИХ СПЛАВІВ

Mykola V. Bosyi

bosymv@ukr.net

ORCID: 0000-0002-3090-0427

Olena A. Bosa

bosaoa@ukr.net

orcid: 0000-0001-7621-6631

М. В. Босий,

старший викладач

О. А. Боса,

здобувач вищої освіти

*Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi**Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький*

Abstract. The main materials in the engineering industry are currently iron-carbon alloys – these are technical iron, steels, and cast irons. The phase diagram of the Fe-C system is the basis for studying the processes of alloy structure formation, because the alloy structure determines its properties. It is also important to know which phases and structures will be formed in alloys depending on their composition and temperature. Of course, one must be able to control the process of structure formation to ensure both the operational properties of the alloys and their mechanical properties. In iron-carbon alloys, for example, graphite, unlike cementite, is a stable phase. When melting iron with carbon, we obtain alloys with a variety of structures and properties. With an increased cooling rate of alloys, cementite is naturally formed as a result of the crystallization process. The formation of graphite is observed only in high-carbon alloys in the case of slow cooling or even with some isothermal holding. In alloys with a reduced carbon content, of course, the formation of graphite will be unlikely. In the Fe – Fe₃C system, the following are possible: first, a liquid phase – a solution of iron and carbon, and second, four solid phases: δ and α – solid solutions of ferrite (F); γ – solid solution of austenite (A); and cementite Fe₃C. Liquidus – ABCD and solidus – ANIECF lines. At present, the path of creating high-carbon alloys with the addition of strong nitride formers (Y, Ce, La, Zr), as well as carbide formers that form stable nitrides and carbides, is definitely considered promising. The effect of the interaction of rare earth elements, in particular, cerium, lanthanum, on the impact toughness of the alloy is carried out, of course, during rapid cooling from the liquidus temperature.

Purpose. The purpose of this work is to study the influence of rare earth metals on the structure and properties of an alloy for cast parts.

Method. After melting the main components, the alloy was deoxidized with silicon at a rate of 0.25%, and also microalloyed with cerium, lanthanum, zirconium and yttrium. The samples were usually obtained by vacuum suction of the liquid alloy into quartz tubes with a diameter of 5–12 mm. Therefore, the used technique allows, of course, to quickly obtain sets of compositions, in addition, the samples require almost no additional processing. The method of manufacturing samples from the alloy, which is poured into a mold, was also used.

The results. When 0.1 % cerium is added, the impact toughness increases slightly, of course, this occurs during cerium refining and non-metallic inclusions that are observed in the initial state and are rounded dark-colored inclusions of iron oxide FeO with a very high content will almost completely disappear. The content of 0.2 % cerium of course corresponds to the maximum of microhardness and, accordingly, the minimum of impact toughness values. In the structure of the alloy with 0.2 %, a large amount of flake-like phase is observed, which significantly affects the increase in the hardness of the alloy and the decrease in impact toughness.

Scientific novelty. During the study, it was found that the microalloying interaction, for example, ceria, depends on the crystallization rate. It was also shown that the maximum effect of the interaction of REMs, including ceria, on the impact toughness of the alloy occurs during rapid cooling from the liquidus temperature.

Practical significance. The impact toughness of the studied alloy will certainly decrease when the rate of crystallization of the alloy from the liquid state increases. Rare earth elements, as well as zirconium, are characterized by very limited solubility in iron. Also, microstructural studies of the alloy, of course, with cerium additives, have shown that when they are introduced in an amount, for example, more than 0.6 %, additional phases already appear in the microstructure, these are cerium intermetallics with the main components of the alloy.

Key words: alloy; rare earth metal; structure; properties; impact strength; microalloying; modification.

Анотація. Основними матеріалами в машинобудівній промисловості наразі є залізовуглецеві сплави – це технічне залізо, сталі та чавуни. Діаграма стану системи Fe-C є основою для вивчення процесів формування структури сплаву, тому що структура сплаву визначає його властивості. Важливо знати також, які фази та структури будуть формуватися в сплавах залежно від їх складу і температури. Треба звісно вміти керувати процесом структуроутворення для забезпечення як експлуатаційних властивостей сплавів, так і механічних. В залізовуглецевих сплавах, наприклад, графіт, на відміну від цементиту, є стабільною фазою. При плавленні заліза з вуглецем, відповідно отримуємо сплави з різноманітною структурою і властивостями. При підвищеній швидкості охолодження сплавів у результаті процесу кристалізації звісно утворюється цементит. Утворення графіту спостерігається тільки у високовуглецевих сплавах у випадку при повільному охолодженні або ще при деякій ізотермічній витримці. В сплавах зі зниженим вмістом вуглецю, певна річ, утворення графіту буде мало-ймовірне. В системі Fe-Fe₃C можливі: перше, рідка фаза – розчин заліза й вуглецю та друге, чотири твердих фази: δ та α – тверді розчини ферит (Ф); γ – твердий розчин аустеніту (А); і цементит Fe₃C.

Лінії ліквідус – ABCD та солідус – ANIECF. Натепер перспективним безумовно вважається шлях створення високовуглецевих сплавів з додаванням сильних нітридоутворювачів (Y, Ce, La, Zr), а також карбідоутворювачів, які утворюють стійкі нітриди та карбіди. Ефект взаємодії РЗМ зокрема, церія, лантана, на величину ударної в'язкості сплаву здійснюється авжеж при швидкому охолодженні від температури ліквідуса.

Мета. Метою даної роботи є дослідження впливу рідкісноземельних металів на структуру та властивості сплаву для литих деталей.

Методика. В лабораторній печі ємністю тигля біля 1,5 кг виконували плавку сплаву. Після плавлення основних компонентів сплав розкисляли відповідно кремнієм із розрахунку 0,25 %, а також мікролегували церієм, лантаном, цирконієм та ітрієм. Зразки звичайно одержували вакуумним всмоктуванням рідкого сплаву відповідно в кварцеві трубки діаметром 5–12 мм. Отже, використовувана методика дозволяє звісно швидко одержувати набори складів, крім того, зразки майже не вимагають додаткової обробки. Застосовувався також метод виготовлення зразків з сплаву, який заливається у форму.

Результати. При введенні 0,1 % церію незначно збільшується ударна в'язкість, звісно, це відбувається при рафінуванні церієм і майже зовсім будуть зникати неметалеві включення, які спостерігаються у вихідному стані і є округлі темного кольору включення закису заліза FeO з дуже великим вмістом. Вміст 0,2 % церію звісно відповідає максимуму мікротвердості та відповідно мінімуму значень ударної в'язкості. У структурі сплаву з 0,2 % спостерігається велика кількість пластівцеподібної фази, яка суттєво впливає на підвищення твердості сплаву та на зменшення ударної в'язкості.

Наукова новизна. При проведенні дослідження з'ясовано, що мікролегувача взаємодія, наприклад, церія залежить від величини швидкості кристалізації. Показано також, що максимальний ефект взаємодії РЗМ, в тому числі і церія, на величину ударної в'язкості сплаву має місце при швидкому охолодженні від температури ліквідусу.

Практична значимість. Ударна в'язкість досліджуваного сплаву буде зменшуватися певна річ, коли збільшується швидкість кристалізації сплаву з рідкого стану. РЗМ, а також цирконій характеризуються дуже обмеженою розчинністю в залізі. Також мікроструктурні дослідження сплаву звісно з присадками церію показали, що при введенні їх у кількості, наприклад, більше 0,6 % у мікроструктурі вже з'являються додаткові фази, це інтерметаліди церію з основними компонентами сплаву.

Ключові слова: сплав; рідкісноземельний метал; структура; властивості; ударна в'язкість; мікролегування; модифікування.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Наразі використовують високовуглецеві сплави заліза, в яких вміст вуглецю становить від 0,6 % до 2,14 % та зазвичай містять також додаткові легуючі елементи, такі як хром, марганець, нікель, молібден та інші. Вони відрізняються високою твердістю, зносостійкістю та міцністю, що робить їх придатними для виробництва інструментів, деталей машин та інших виробів, що зазнають значних навантажень. В цілому, високовуглецеві сплави є важливим конструкційним матеріалом, який широко використовується в різних галузях промисловості завдяки своїм унікальним властивостям [1–7].

Високовуглецеві сплави піддаються термообробці (гартуванню та відпуску), що дозволяє досягти оптимальних властивостей для конкретного застосування.

Натепер актуальним завданням є вивчення впливу РЗМ (церія, лантана, ітрія, цирконія) на структуру і пластичні властивості залізовуглецевих сплавів [1–7].

Отже, наразі застосування РЗМ для дослідження їх впливу на структуру і властивості залізовуглецевого сплаву є звісно актуальним напрямком.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Рідкісноземельні метали (РЗМ) звісно впливають на властивості та структуру сплавів, зокрема, на їх міцність, пластичність, електропровідність, а також теплопровідність. РЗМ можуть значно впливати на механічні властивості металів, наприклад,

збільшувати їх міцність та твердість або ж сприяти пластичній деформації.

Розглянемо вплив РЗМ на властивості металів. Межі зерен у багатокристалічних металах діють як бар'єри для дислокацій, що збільшує їх міцність та твердість. Зменшення певна річ розміру зерен буде призводити до збільшення міцності та пластичності металу [8, 9].

При перетворенні металу з однієї кристалічної фази в іншу, або утворення різних фаз у сплавах може значно впливати на його властивості. Наприклад, перехід від феритної до мартенситної фази в сталі значно підвищує її міцність та твердість. Також наявність сторонніх атомів у металевій решітці може звичайно зміцнювати метал, але також може і зменшувати його пластичність.

Розглянемо вплив РЗМ на структуру металів. РЗМ впливають на процес росту зерен під час кристалізації сплаву та сприяють утворенню анізотропної структури, де властивості сплаву відрізняються в різних напрямках. РЗМ також можуть визначати і фазовий склад сплаву, при впливу на розмір та форму різних фаз у сплаві [10, 11].

Загалом, дослідження впливу РЗМ на структуру та властивості сплаву є ключовим для розробки нових матеріалів згідно з заданими характеристиками.

При дослідженні ливарних, механічних та спеціальних властивостей сталей з високим вмістом хрому та алюмінію було встановлено, що відповідно такі матеріали здатні працювати як тривалий час в умовах надвисоких температур, так і в агресивних середовищах, тобто згідно в екстремальних умовах та використовуються для виготовлення жаростійких деталей способами лиття. Сплави з високим вмістом хрому та алюмінію в повній мірі відповідають вимогам, які до них пред'являються: тобто мають високі температури плавлення та згідно жаростійкість, а також задовільні ливарні властивості, вони є недорогими та недефіцитними. Відкритим є питання щодо з'ясування впливу процесів мікролегування і модифікування на властивості сплавів цієї групи. За літературними даними ці процеси можуть підвищувати характеристики сплавів на основі заліза. Проте інформація відносно впливу процесів мікролегування та модифікування на властивості сплавів з високим вмістом хрому та алюмінію практично на тепер відсутня. Отже, дослідження в цьому напрямку є завданням досить актуальним у теперішній час [12, 13].

Згідно вивчення впливу процесів мікролегування і модифікування жаростійких сталей з високим вмістом хрому та алюмінію і вибір оптимального хімічного складу сталей для виробництва литих деталей, що працюють в екстремальних умовах, є доцільним. Тому також досліджується хімічний склад, ливарні, механічні, спеціальні властивості і структура жаростійких сталей з різним вмістом хрому та алюмінію.

У виробничих умовах авжеж використовуються три методи покращання властивостей сплавів на основі заліза: це – легування, мікролегування і модифікування [14, 15].

Легування – це коли додають в розплав, а також розчинення або розплавлення в ньому легуючих елементів для одержання сплаву згідно заданого хімічного складу, який буде забезпечувати високі фізико-хімічні і механічні властивості сплаву у виготовлених деталях.

Мікролегування – це процес, коли відбувається введення в розплав невеликих за розміром, наближено до 0,1 %, присадок легуючих елементів для зміни властивостей сплаву в рідкому стані та у деталях, оскільки це ефективно впливає, перш за все, на чистоту меж зерен та згідно зменшує шкідливий вплив легкоплавких домішок. Модифікування в сучасному ливарному виробництві відіграє суттєву роль, оскільки при цьому процесі визначається характер кристалізації сплаву, ступінь його гранулювання, це важливо відповідно для високолегованих сталей, та комплексу їх механічних і спеціальних властивостей [16].

Процес плавки досліджуваних сталей виконували методом переплавлення недефіцитних шихтових матеріалів та феросплавів в індукційній печі марки ІСТ-0,06 з основною футеровкою ємністю тигля 60 кг. Для проведення визначення ливарних, механічних властивостей, структури, кінетики окиснення жаростійких сплавів та їх окалиностійкості використовувалися новітні методики. Металографічні дослідження сплавів здійснювались на мікроскопі МІМ – 8 та з використанням комп'ютера.

Досліджено вплив РЗМ на ливарні, механічні й спеціальні властивості сталі 35ХГ. Встановлено, що присадка до 0,26 % РЗМ у хромоалюмінієву сталь значно підвищує її рідкотекучість внаслідок процесів дегазації, дефосфорації і десульфурзації розплаву, при цьому згідно РЗМ переводять неметалеві краплини з гострокутної форми в глобулярну. Присадка РЗМ у межах 0,25...0,37 % також позитивно впливає на лінійну усадку і тріщиностійкість сплаву.

Для мікролегувальних присадок в якості модифікаторів застосовують такі як: ітрій – до 0,55 %; кальцій – до 0,11 %; ванадій і цирконій – до 0,27 %.

Добрі ливарні, механічні і експлуатаційні властивості має хромоалюмінієва сталь після оброблення її ітрієм згідно у кількості 0,12...0,27 % за присадкою: рідкотекучість сталі підвищується на 33...42 %, лінійна усадка буде знижуватися з 2,2 до 1,81 %, а тимчасовий опір розриванню згідно підвищується з 342 до 438 МПа [17, 22]. Окалиностійкість сталі буде авжеж підвищуватися вже після присадки ітрію по всьому дослідженому діапазоні, але суттєва його дія буде згідно – до 0,36 %.

Кальцій у кількості до 0,11 % буде сприяти збільшенню рідкотекучості, міцності і зниженню лінійної

усадки. Маючи високу спорідненість до кисню, сірки і азоту, кальцій відповідно буде змінювати кількість, форму та морфологію неметалевих включень, це покращує структуру сплаву і підвищує міцність та термостійкість деталей. Присадки до 0,22 % ванадію трохи підвищують рідкотекучість хромо-алюмінієвої сталі, а от до 0,11 % – будуть знижувати лінійну усадку та суттєво підвищують також тимчасовий опір розриванню і термостійкість, а також незначно підвищують окалиностійкість сплаву. Суттєвий вплив як на рідкотекучість, міцність і експлуатаційні характеристики хромоалюмінієвої сталі будуть мати присадки цирконію в кількості до 0,21 % [18, 22].

Отже, серед вивчених мікролегованих та модифікованих присадок ітрію звісно найсуттєвіше впливає на властивості хромоалюмінієвих сталей, оптимальна присадка становить 0,14...0,27 %.

Дослідженнями встановлено, що добрі технологічні та спеціальні властивості має жаростійкий сплав на основі заліза із вмістом 26...34 % хрому та 1,55...3,2 % алюмінію, а вміст вуглецю не повинен перевищувати 0,25 %. Звісно шкідливий вплив вуглецю на окалиностійкість частково або повністю усувається легуванням сталі титаном у кількості 0,25...0,61 % [19, 22].

Для виготовлення деталей, наприклад, нескладної конфігурації, які будуть виконувати роботу в умовах високих температур, наприклад, до температури 1200 °С, можна використовувати результати досліджень і рекомендації сплаву вже іншого хімічного складу та з іншим діапазоном вмісту елементів: С = 0,26...0,37 %; Cr = 23...31 %; Al = 1,1...2,9 %; Ti = 0,26...0,61 % [20].

При виготовленні складних за геометрією литих деталей з жаростійких сталей необхідно буде провести мікролегування і модифікування ітрієм, ванадієм, і кальцієм з відповідним діапазоном концентрацій.

Одержані експериментальні дані стосовно ливарних, механічних і спеціальних властивостей жаростійких сталей з хромом та алюмінієм показали, що можна застосовувати сталь 33Х для виготовлення як тонкостінних, так і великогабаритних литих деталей, які звісно виконують роботу при температурі до 1300 °С, а при виготовленні простих за конфігурацією литих деталей, які будуть виконувати роботу при температурі до 1150...1250 °С використовують сталь 20Х [21, 22].

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Вплив модифікування рідкісноземельними сплавами на кристалізацію металу та характер процесу структуроутворення є загальним для всіх досліджуваних сплавів. Церій має складний вплив на властивості сплавів та їх структуру, також процеси кристалізації і перетворення в твердому стані, це обумовлено

великою спорідненістю церія як до кисню, так і сірки, а також його вплив і на активність вуглецю. Модифікування церієм до відповідного вмісту буде підвищувати температуру евтектоїдного перетворення, що впливає на збільшення в структурі кількості фериту та звісно зменшення перліту.

Використання рідкісноземельних металів таких як церій, лантан, празеодим, ітрії в комплексних модифікаторах для сплавів вказує на суттєвий результат, при цьому звісно підвищується їх міцність на 10–30 %, а також в приблизно 1,5–2,0 раза будуть збільшуватися пластичні властивості. Вивчення взаємодії РЗМ на мікроструктуру та кристалізацію сплаву в залежності від умов охолодження є актуальним питанням. При збільшенні домішки РЗМ час евтектичної кристалізації буде збільшуватися і має максимальне значення для ітрію при введенні його 0,1–0,3 %, а для лантана при введенні близько 0,5 %. На основі цих уявлень про вплив РЗМ на процес формування графітних включень звісно можна пояснити різними формами самого графіту, а також його трансформацію в процесі росту в сплаві, які модифіковані різними домішками ітрія [2, 3, 18–22].

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою статті є дослідження впливу РЗМ на структуру та властивості залізівуглецевих сплавів.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Методи дослідження. Для дослідження впливу РЗМ на структуру та властивості залізівуглецевих сплавів використовували дослідні плавки у тиглі ємністю 1,5 кг в лабораторній печі. Використовували також метод виготовлення зразків із сплаву з добавками церія, лантана, цирконія, ітрія.

Об'єктом дослідження є рідкісноземельні метали та їх вплив на залізівуглецеві сплави.

Предметом дослідження є дослідження впливу РЗМ на структуру та властивості залізівуглецевих сплавів.

Для проведення дослідження було вибрано залізівуглецевий сплав, легований комплексом елементів, які забезпечують високу корозійну стійкість та технологічність.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Першим етапом дослідження є з'ясування впливу РЗМ, таких як церій, лантан, ітрії, цирконій на структуру та властивості сплаву.

Плавку проводили в лабораторній печі ємністю тигля 1,5 кг. Після сплавлення основних компонентів сплав розкисляли кремнієм із розрахунку 0,25 % та мікролегували церієм, лантаном, цирконієм, ітрієм. Зразки отримували вакуумним всмоктуванням рідкого сплаву в кварцеві трубки діаметром 5–12 мм. Використовувана методика дозволяє швидко

отримувати набори складів, крім того, зразки майже не вимагали додаткової обробки. Застосовувався також метод виготовлення зразків з сплаву, який заливали у форму.

Ударна в'язкість круглих зразків діаметром 6 мм залізвуглецевого сплаву з різними добавками Ce, La, Zr, Y, отримана після випробування зразків, які кристалізуються з великою швидкістю (наведено на рис. 1).

РЗМ та цирконій характеризуються дуже обмеженою розчинністю в залізі. Мікроструктурні дослідження сплаву з присадками церію показали, що при введенні їх у кількості більше 0,6 % у мікроструктурі з'являються додаткові фази, наприклад, інтерметаліди церію з основними компонентами сплаву. На в'язкість сплаву сприятливо позначається добавка такої кількості активних елементів, яка зв'язує переважну більшість домішок впровадження (азот, кисень, вуглець) і, тим більше, не призводить до утворення хімічних сполук з основними компонентами сплаву. Для зазначених умов виплавки та виготовлення зразків з сплаву оптимальна величина добавок елементів з точки зору їх сприятливого впливу на в'язкість при кімнатній температурі була наступна: Ce – 0,6 %; La – 0,18 %; Zr – 0,25 %.

Ітрій незначно впливає в даному випадку. На зразках першої серії, отриманих методом вакуумного всмоктування, значення ударної в'язкості для вихідного стану без мікролегування < 0,10 кГм/см². При низьких швидкостях кристалізації, при заливанні металу у форму ударна в'язкість металу лежить в межах не більше 2,55–5,58 кГм/см². Це свідчить про те, що азот у твердому розчині виявляє набагато більший хрупкий ефект, ніж азот у вигляді виділень нітридів, якщо ці виділення не розташовані безперервною сіткою по межах зерен. Дійсно в першому випадку, в умовах швидкого охолодження рідкого стану, майже весь азот знаходиться в твердому стані не встигаючи виділитися у вигляді нітридів. Зміна швидкості кристалізації вказує на зміну характеру впливу добавок РЗМ на структуру та властивості сплаву.

На рис. 2 показано зміну мікротвердості та ударної в'язкості сплаву залитого в піщано-глинисту форму під впливом мікролегуючих добавок церію.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

При визначеній величині присадки значення ударної в'язкості сплаву досягає максимуму, потім вона зменшується практично до нуля. Для кожного елемента звісно маємо різну ударну в'язкість, тобто величина добавки, визначається в основному розчинністю даного елемента в сплаві.

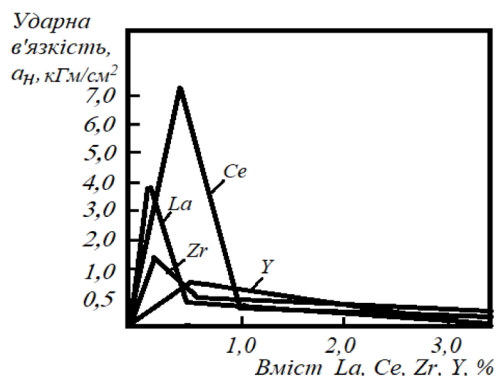


Рис. 1. Залежність ударної в'язкості сплаву X35 від вмісту La, Ce, Zr, Y при високій швидкості кристалізації

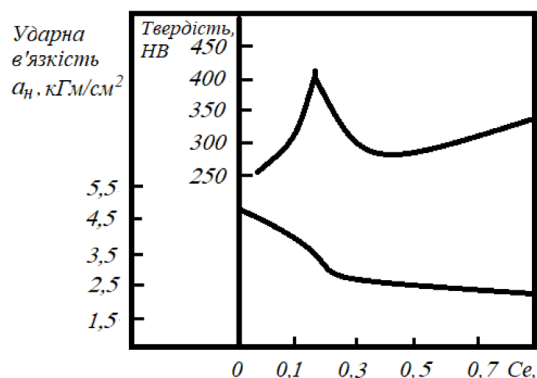


Рис. 2. Залежність мікротвердості й ударної в'язкості сплаву X35 від вмісту Ce при повільній кристалізації

При введенні 0,11 % церію незначно збільшується ударна в'язкість за рахунок рафінуючого впливу церію і майже зовсім зникають неметалеві включення спостерігаються у вихідному стані і є округлі темного кольору включення закису заліза FeO з великим вмістом. Вміст 0,21 % церію відповідає максимум мікротвердості та природно, мінімум значень ударної в'язкості. У структурі сплаву з 0,21 % спостерігається велика кількість пластівцеподібної фази, яка суттєво впливає на підвищення твердості сплаву та на зменшення ударної в'язкості.

ВИСНОВКИ

1. Ударна в'язкість сплаву зменшується при збільшенні швидкості кристалізації сплаву з рідкого стану.
2. З'ясовано, що мікролегуюча взаємодія церія залежить від величини швидкості кристалізації.
3. Показано, що максимальний ефект взаємодії РЗМ в тому числі, церія на величину ударної в'язкості сплаву має місце при швидкому охолодженні від температури ліквідусу.
4. Встановлено, що при звичайних швидкостях кристалізації характер впливу церія змінюється, ефект взаємодії стає незначним.

REFERENCES

- [1] Kondrashev, P. V. (2023). Materialoznavstvo [Materials science]. Navchalnyi posibnyk. Konspekt lektzii. Pryznachenyi dlia zdobuvachiv stupenia bakalavra za spetsialnistiu 133 Haluzeve mashynobuduvannia usikh form navchannia. KPI im. Ihoria Sikorskoho. 98 p. [in Ukrainian].
- [2] Kutsova, V. Z., Nosko, O. A., & Kovzel, M. A. (2007). Spetsialni splavy, RZM ta blahorodni metaly [Special alloys, rare earth metals and noble metals]. Navchalnyi posibnyk. Dnipropetrovsk: NMetAU. 163 p. [in Ukrainian].
- [3] Pakharenko, V. L., & Marchuk, M. M. (2009). Materialoznavstvo ta tekhnolohiia konstruktsiinykh materialiv (metallurhiia, lyvarne vyrobnytstvo) [Materials science and technology of construction materials (metallurgy, distillery)]. Navchalnyi posibnyk. Rivne: NUVHP. 179 p. [in Ukrainian].
- [4] Synehin, Ye. V., Zhuravlova, S. V., Molchanov, L. S., & Sukhovetskyi, S. V. (2021). Konspekt lektzii do vyvchennia dystsypliny “Teoriia krystalizatsii ta formuvannia vylyvkiv” [Lecture notes before graduating from the discipline “Theory of crystallization and formation of forks”], dlia zdobuvachiv tretoho osvithnoho rivnia, stupeniu vyshchoi osvity doktor filosofii, shcho navchaiutsia za ONP “Metallurhiia”, spetsialnist 136 Metallurhiia. Dnipro: NMetAU. 47 p. [in Ukrainian].
- [5] Kalinina, T. V. (2019). Konspekt lektzii z dystsypliny “Metaloznavstvo” [Lecture notes from the discipline “Metal Science”], dlia zdobuvachiv pershoho (bakalavrskoho) rivnia vyshchoi osvity zi spetsialnosti 136 Metallurhiia vsikh form navchannia. Kam'ianske : DDTU, 80 p. [in Ukrainian].
- [6] Shkurupii, V. H., Novikov, F. V., & Shkurupii, Yu. V. (2008). Systemy tekhnolohii [Technology systems]. Navchalnyi posibnyk. Kharkiv : Vydavnytstvo. KhNEU. 480 p. [in Ukrainian].
- [7] Verkhovliuk, A. M., Narivskiy, A. V., & Mohylatenko, V. H. (2016). Tekhnolohii oderzhannia metaliv ta splaviv dlia lyvarnogo vyrobnytstva [Technologies of retention of metals and alloys for liqueur production]: Navchalnyi posibnyk. Za redaktsiieiu akademika NAN Ukrainy V. L. Naideka. Kyiv : Vydavnychiy dim “Vinichenko”. 224 p. [in Ukrainian].
- [8] Shapoval, S. V. (2017). Konspekt lektzii z dystsypliny “Materialoznavstvo” [Lecture notes from the discipline “Materials Science”]. Kharkivskiy natsionalnyi universytet miskoho hospodarstva im. O. M. Beketova. Kharkiv : KhNUMH im. O. M. Beketova. 122 p. [in Ukrainian].
- [9] Zazymko, O. V., Lopatko, K. H., & Aftandiliants, Ye. H. (2013). Materialoznavstvo [Materials Science]. Pidruchnyk. Kherson : OLDI-PLIUS. 612 p. [in Ukrainian].
- [10] Kotrechko, O. O., Zazymko, O. V., Lopatko, K. H., Aftandiliants, Ye. H., & Hnyloskurenko, S. V. (2013). Praktykum z materialoznavstva [Workshop on materials science]. Navchalnyi posibnyk. Kherson : OLDI-PLIUS. 500 p. [in Ukrainian].
- [11] Dubovyi, O. M., Kazymyrenko, Yu. O., Lebedieva, N. Yu., & Samokhin, S. M. (2009). Inzhenerne materialoznavstvo [Engineering materials science]. Pidruchnyk. Mykolaiv : NUK. 444 p. [in Ukrainian].
- [12] Ivanova, L. Kh., Kolotylo, Ye. V., Khytko, O. Yu., & Terekhin, V. O. (2020). Otrymannia i zastosuvannia kompleksnykh modyfikatoriv z ridskiznozemelnymy metalamy [Separation and stagnation of complex modifiers with rare earth metals]. *Metal ta lyttia Ukrainy*. Tom 28 № 1. pp. 38–41. [in Ukrainian].
- [13] Ivanova, L. Kh., Kolotylo, Ye. V., Khytko, O. Yu., & Terekhin, V. O. (2022). Vplyv kompleksnykh modyfikatoriv na strukturu chavuniv z riznym vmistom sirky [Infusion of complex modifiers onto the structure of chavuns with different types of syrup]. *Metal ta lyttia Ukrainy*. Tom 30 № 2 (329). pp. 30–34. [in Ukrainian].
- [14] Husachuk, D. A. (2022). Strukturoutvorennia heterofaznykh splaviv na osnovi chavuniv [Structural development of heterophase alloys based on chavuns]. Monohrafiia. Lutsk : LNTU. 177p. [in Ukrainian].
- [15] Hovorun, T. P., Haponova, O. P., & Marchenko, S. V. (2020). Materialoznavstvo ta tekhnolohiia materialiv (u skhemakh i zavdannakh) [Materials science and technology of materials (in diagrams and data)]. Navchalnyi posibnyk. Sumy. Sumskiy derzhavnyi universytet. 163 p. [in Ukrainian].
- [16] Kshniakin, V. S., Opanasiuk, A. S., & Diadiura, K. O. (2015). Osnovy fizychnoho materialoznavstva [Fundamentals of physical materials science]. Navchalnyi posibnyk. v 2 ch. Sumy. Sumskiy derzhavnyi universytet. Ch. 1. 329 p. [in Ukrainian].
- [17] Bodrova, L. H., Kramar, H. M., Kovalchuk, Ya. O., & Koval, I. V. (2023). Tekhnolohiia konstruktsiinykh materialiv ta materialoznavstvo, rozdil Materialoznavstvo [Technology of structural materials and materials science, section Materials science]. Navchalnyi posibnyk. Ternopil: FOP Palianytsia V. A. 157 p. [in Ukrainian].
- [18] Antonova, H. V., Vershkov, O. O., & Matsulevych, O. Ye. (2024). Materialoznavstvo. Tekhnolohiia konstruktsiinykh materialiv. Chastyna I. “Materialoznavstvo” [Materials Science. Technology of Structural Materials. Part I. “Materials Science”]. Navchalnyi posibnyk dlia zdobuvachiv pershoho (bakalavrskoho) rivnia vyshchoi osvity zi spetsialnosti 208 “Ahroinzheneriia”. Zaporizhzhia. 215 p. [in Ukrainian].
- [19] Mazur, V. I., Kutsova, V. Z., Kovzel, M. A., & Nosko, O. A. (2013). Splavy na osnovi zaliza [Iron-based alloys]. Pidruchnyk. Dnipropetrovsk. NMetAU. 500 p. [in Ukrainian].
- [20] Bialik, O. M., & Chernenko, V. S. (2002). Metaloznavstvo [Metallurgy]. Pidruchnyk. 2-he vydannia pererobleno i dopovнено. Kyiv. IVTs “Politekhnik”. 384 p. [in Ukrainian].
- [21] Savuliak, V. I., Shylina, O. P., & Shenfeld, V. Y. (2019). Materialoznavstvo [Materials science]. Orhanizatsiia samostiinoi ta praktychnoi roboty. Navchalnyi posibnyk. Vinnytsia : VNTU. 123 s. [in Ukrainian].
- [22] Bubis, A., & Fedorov, H. (2016). Pidvyshchennia vlastyvostei zharostiikykh stalei dlia roboty v ekstremalnykh umovakh mikrolehuvanniam i modyfikuvanniam [Improving the properties of heat-resistant steels for operation in extreme conditions by microalloying and modification]. Novi materialy i tekhnolohii v mashynobuduvanni (Pratsi Mizhnarodnoi naukovotekhnichnoi konferentsii), (6), pp. 158–159. <https://doi.org/10.20535/2519-450x.6.2015.63405>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Кондрашев, П. В. (2023). Матеріалознавство. Навчальний посібник. Конспект лекцій. Призначений для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування усіх форм навчання. КПІ ім. Ігоря Сікорського. 98 с.
- [2] Куцова, В. З., Носко, О. А., Ковзель, М. А. (2007). Спеціальні сплави, РЗМ та благородні метали. Навчальний посібник. Дніпропетровськ : НМетАУ. 163 с.
- [3] Пахаренко, В. Л., Марчук, М. М. (2009). Матеріалознавство та технологія конструкційних матеріалів (металургія, ливарне виробництво). Навчальний посібник. Рівне : НУВГП. 179с.
- [4] Синегін, Є. В., Журавльова, С. В., Молчанов, Л. С., Суховецький, С. В. (2021). Конспект лекцій до вивчення дисципліни «Теорія кристалізації та формування виливків», для здобувачів третього освітнього рівня, ступеню вищої освіти доктор філософії, що навчаються за ОНП «Металургія», спеціальність 136 Металургія. Дніпро : НМетАУ. 47 с.
- [5] Калініна, Т. В. (2019). Конспект лекцій з дисципліни «Металознавство» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти зі спеціальності 136 Металургія всіх форм навчання. Кам'янське : ДДТУ, 80 с.
- [6] Шкурूपий, В. Г., Новіков, Ф. В., Шкурूपий, Ю. В. (2008). Системи технологій. Навчальний посібник. Харків : Видавництво. ХНЕУ. 480 с.
- [7] Верховлюк, А. М., Нарівський, А. В., Могилатенко, В. Г. (2016). Технології одержання металів та сплавів для ливарного виробництва: Навчальний посібник. За редакцією академіка НАН України В. Л. Найдека. Київ : Видавничий дім «Вініченко». 224 с.
- [8] Шаповал, С. В. (2017). Конспект лекцій з дисципліни «Матеріалознавство». Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова. 122 с.
- [9] Зазимко, О. В., Лопатько, К. Г., Афтандіянц, Є. Г. (2013). Матеріалознавство. Підручник. Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС. 612 с.
- [10] Котречко, О. О., Зазимко, О. В., Лопатько, К. Г., Афтандіянц, Є. Г., & Гнилоскурєнко, С. В. (2013). Практикум з матеріалознавства. Навчальний посібник. Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС. 500 с.
- [11] Дубовий, О. М., Казмиренко, Ю. О., Лебедєва, Н. Ю., Самохін, С. М. (2009). Інженерне матеріалознавство. Підручник. Миколаїв : НУК. 444 с.
- [12] Іванова, Л. Х., Колотило, Є. В., Хитько, О. Ю., Терехін, В. О. (2020). Отримання і застосування комплексних модифікаторів з рідкісноземельними металами. *Метал та лиття України*. Том 28 № 1. С. 38–41.
- [13] Іванова, Л. Х., Колотило, Є. В., Хитько, О. Ю., Терехін, В. О. (2022). Вплив комплексних модифікаторів на структуру чавунів з різним вмістом сірки. *Метал та лиття України*. Том 30 № 2 (329). С. 30–34.
- [14] Гусачук, Д. А. (2022). Структуроутворення гетерофазних сплавів на основі чавунів. Монографія. Луцьк : ЛНТУ. 177 с.
- [15] Говорун, Т. П., Гапонова, О. П., Марченко, С. В. (2020). Матеріалознавство та технологія матеріалів (у схемах і завданнях). Навчальний посібник. Суми. Сумський державний університет. 163 с.
- [16] Кшніакін, В. С., Опанасюк, А. С., Дядюра, К. О. (2015). Основи фізичного матеріалознавства. Навчальний посібник. в 2 ч. Суми. Сумський державний університет. Ч. 1. 329 с.
- [17] Бодрова, Л. Г., Крамар, Г. М., Ковальчук, Я. О., Коваль, І. В. (2023). Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство, розділ Матеріалознавство. Навчальний посібник. Тернопіль : ФОП Паляниця В.А. 157 с.
- [18] Антонова, Г. В., Вершков, О. О., Мацулевич, О. Є. (2024). Матеріалознавство. Технологія конструкційних матеріалів. Частина І. «Матеріалознавство». Навчальний посібник для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти зі спеціальності 208 «Агроінженерія». Запоріжжя. 215 с.
- [19] Мазур, В. І., Куцова, В. З., Ковзель, М. А., Носко, О. А. (2013). Сплави на основі заліза. Підручник. Дніпропетровськ. НМетАУ. 500 с.
- [20] Бялік, О. М., Черненко, В. С. (2002). Металознавство. Підручник. 2-ге видання перероблено і доповнено. Київ. ІВЦ «Політехніка». 384 с
- [21] Савуляк, В. І., Шиліна, О. П., Шенфельд, В. Й. (2019). Матеріалознавство. Організація самостійної та практичної роботи. Навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ. 123 с.
- [22] Бубіс, А., Федоров, Г. (2016). Підвищення властивостей жаростійких сталей для роботи в екстремальних умовах мікролегуванням і модифікуванням. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні (Праці Міжнародної науково-технічної конференції)*, (6), С. 158–159. <https://doi.org/10.20535/2519-450x.6.2015.63405>

© Босий М. В., Боса О. А.

Дата надходження статті до редакції: 22.08.2025

Дата затвердження статті до друку: 02.09.2025

Опубліковано: 24.11.2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0