

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РОЗПАДУ ПЕРЕСИЧЕНОГО ТВЕРДОГО РОЗЧИНУ АУСТЕНІТНОЇ СТАЛІ

*Сергій Анатолійович Божко*

ORCID <https://orcid.org/0009-0006-0736-4968>

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро

*Юрій Валентинович Ткачов*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1556-2463>

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро

Останнім часом в машинобудуванні, зокрема, ракето- та авіабудуванні все більше поширюється використання аустенітних сталей типу «ферманал» системи  $Fe - Mn - Al$ , які не містять відносно дефіцитних компонентів — хрому й нікелю. Такі сплави стали темою, що представляє значний інтерес також для оборонної та автомобільної промисловості, тому що вони можуть зберігати високу міцність і пластичність, а також сприяють зменшенню ваги в конструкційних застосуваннях. До того ж ці матеріали придатні для виготовлення порошків, що використовують для виробництва деталей із застосуванням адитивних технологій [1]. Стабільність аустеніту в широкому діапазоні температур досягається введенням до 30% марганцю та до 10% алюмінію. Такі сталі характеризуються підвищеними показниками ударної в'язкості, міцності, а також здатністю до твердіння під час наклепу. Дослідження [2] констатують високу пластичність цих сплавів у поєднанні з підвищеною міцністю у разі збільшення вмісту марганцю, що свідчить про гарні технологічні властивості стосовно оброблюваності таких матеріалів. Необхідний високий рівень характеристик міцності досягається завдяки виділенню частинок другої фази під час термічної обробки [3]. Проте процеси розпаду пересиченого твердого розчину в цих сталях вивчені недостатньо, а відомі режими термічної обробки не дозволяють повною мірою реалізувати високий потенціал, закладений розробниками цих матеріалів.

З огляду на вищезначене актуальним завданням є визначення залежності механічних властивостей таких аустенітних сталей, що не містять нікелю, від температури та тривалості ізотермічної витримки. Розробка рекомендацій за результатами вивчення механізмів зміцнення без сумніву матиме певне практичне значення стосовно призначення режимів термічної обробки.

Для детального вивчення кінетики зміцнення спочатку були визначені температурно-часові інтервали протікання процесів виділен-

ня вторинної фази за допомогою методів диференційного термічного аналізу [4] та вимірювання питомого електроопору. Рентгенівський фазовий аналіз показав, що розпад пересиченого твердого розчину відбувається з виділенням  $R$ -фази, яка є складним карбідом типу  $(Fe, Mn)_3Al, C_x$ . Механічні властивості — твердість  $HRC$  і ударну в'язкість  $a_n$  (МДж/м<sup>2</sup>) визначались після ізотермічної витримки за різних температур (табл. 1, 2).

Таблиця 1 — Твердість  $HRC$  після старіння

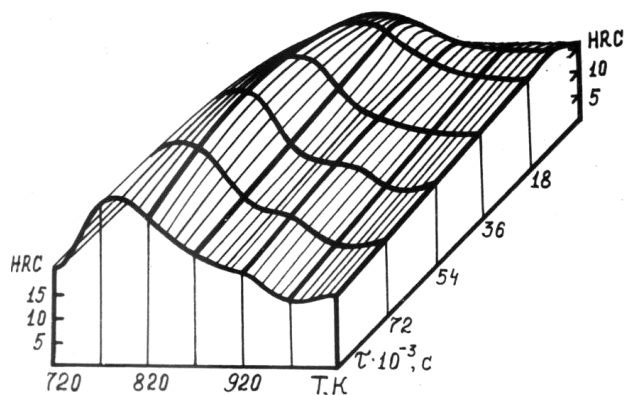
		Температура, К						
		720	770	820	870	920	970	1020
Час витримки, с	3600	16,0	19,0	22,0	22,0	18,0	17,5	18,0
	9000	16,0	21,0	26,0	25,0	21,0	20,0	20,0
	18000	16,0	23,0	29,0	27,5	22,0	19,5	19,0
	36000	16,0	25,5	33,5	26,0	21,0	18,5	18,0
	54000	17,0	28,0	36,0	25,0	21,0	17,0	17,0
	72000	17,5	30,0	34,0	24,0	20,0	15,0	16,0
	90000	19,0	32,0	30,0	23,0	13,5	14,0	15,0

Таблиця 2 — Ударна в'язкість  $a_n$  після старіння

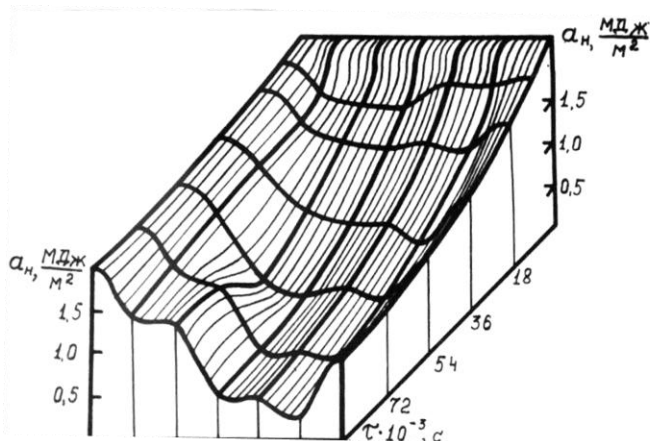
		Температура, К						
		720	770	820	870	920	970	1020
Час витримки, с	3600	2,20	1,75	1,70	1,80	1,85	1,85	2,20
	9000	2,20	1,80	1,71	1,66	1,90	1,91	2,00
	18000	2,10	1,70	1,52	1,42	1,45	1,43	1,75
	36000	2,00	1,65	1,17	0,91	1,05	1,00	1,45
	54000	2,00	1,60	0,92	0,70	0,75	0,70	1,20
	72000	2,00	1,50	1,29	0,60	0,50	0,50	1,05
	90000	2,00	1,40	1,31	0,55	0,40	0,35	1,00

Інформативність результатів досліджень залежить від способу та форми їх подання, тому візуалізація результатів має дуже важливе значення для повного розуміння природи перетворень, що відбуваються під час того, чи іншого досліджуваного процесу. Традиційно результати досліджень процесів старіння подають у вигляді звичайних двокоординатних ізотермічних кривих. Такі залежності є функціями часу витримки за певної постійної температури  $HRC_t = f(\tau)$ . Але для вибору потрібних режимів обробки більш зручним поданням буде

відображення результатів у вигляді тривимірних графіків, як наведені на рис. 1 та 2.



а



б

Рисунок 1 — Твердість  $HRC$  (а) та ударна в'язкість  $a_n$  (б)

На основі існуючих уявлень, процеси розпаду твердого розчину протікають в декілька стадій.

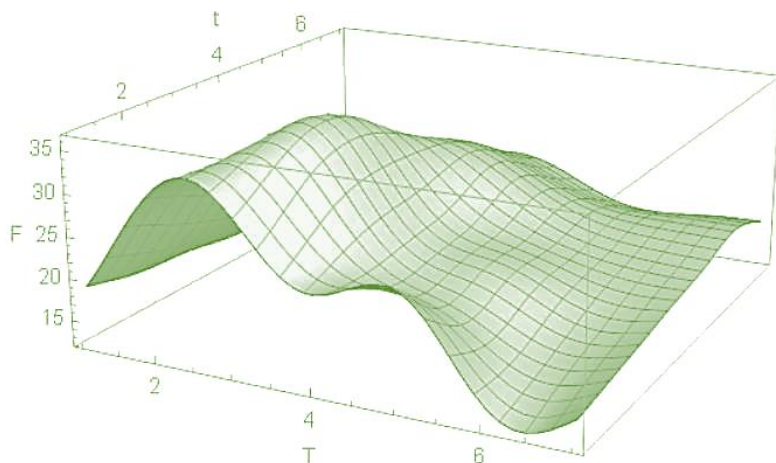
На першій стадії виникають сегрегації елементів, які створюють зміцнювальну фазу. Ці утворення постійно змінюються, але залишаються когерентно пов'язаними з кристалічною решіткою матриці. Міцність підвищується, в'язкість майже не змінюється.

На другій стадії, з підвищенням температури і тривалості

витримки, дифузійні процеси інтенсифікуються, з'являються частки другої фази, які мають власну кристалічну решітку, відбувається втрата когерентності, міцність підвищується, а ударна в'язкість падає.

На третій стадії, завдяки ще більшому розвитку дифузійного масопереносу, відбувається зростання часток другої фази, які виділяються, в основному, по границях зерен та субзерен. Механічні властивості знижуються, відбувається перестаріння.

Для обробки експериментальних даних був застосований математичний пакет функціонального програмування *Wolfram Mathematica* [5]. Цей продукт може бути використаний для вирішення широкого спектру завдань, включаючи математичний аналіз, обробку даних, символічні обчислення, візуалізацію даних, програмування та моделювання систем.



а

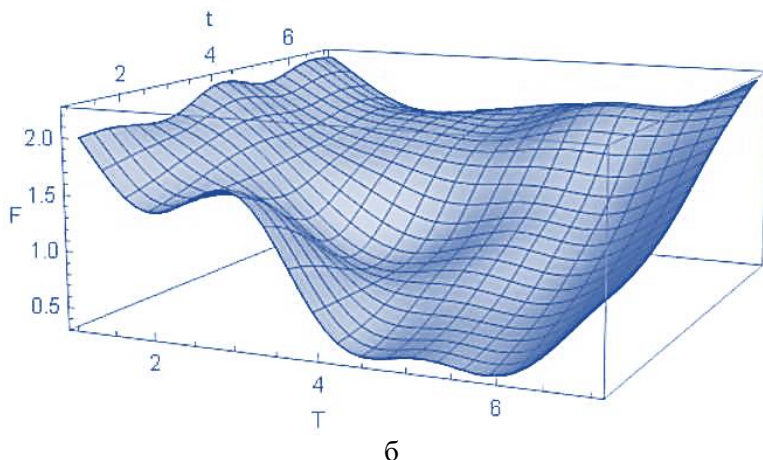


Рисунок 2 — Твердість  $HRC$  (а) та ударна в'язкість  $a_n$  (б)

Графіки побудовано з використанням існуючих у пакеті функцій з шостим ступенем інтерполяції (порядком поліному). Наведені графіки (рис. 2) були одержані шляхом обробки експериментальних результатів, поліномом третього ступеню.

На основі аналізу графічно зображених результатів, можна підбрати режими термічної обробки, з урахуванням висунутих вимог до матеріалу. До того ж, треба зауважити, що за аналізом результатів візуалізації даних можна рекомендувати комбіновані режими старіння, які складаються з двох етапів:

1) попереднього підстарювання за підвищеної температури, з метою отримання максимальної кількості зародишів зміцнюючої фази, когерентно пов'язаних з матрицею;

2) подальшого старіння за нижчих температур із метою одержання максимальної міцності.

Такий режим дозволяє значно скоротити загальний час старіння та зменшити енерговитрати.

Таким чином, дослідження залежності механічних властивостей сталей системи  $Fe - Mn - Al$  від температури та тривалості ізотермічної витримки дали практичні результати, на основі яких можна призначати режими термічної обробки.

## ПОСИЛАННЯ

1. A lightweight Fe–Mn–Al–C austenitic steel with ultra-high strength and ductility fabricated via laser powder bed fusion / Seede R. et al. *Materials Science and Engineering: A*. 2023. Vol. 874. URL: <https://doi.org/>

10.1016/j.msea.2023.145007.

2. The current state and the prospects for the development of high-plasticity ultrastrong Fe-Mn-Al-C steels / O. P. Verzilov et al. *Metal and Casting of Ukraine*. 2021. Vol. 29, no. 2. P. 113–121. URL: <https://doi.org/10.15407/steelcast2021.02.101>.

3. Current state of Fe-Mn-Al-C low density steels /Chen S. et al. *Progress in Materials Science*. 2017. Vol. 89. P. 345–391. URL: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.05.002>.

4. Contributors to Wikimedia projects. Thermal analysis - Wikipedia. *Wikipedia, the free encyclopedia*. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal\\_analysis](https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_analysis).

5. Wolfram Mathematica: Modern Technical Computing. *Wolfram: Computation Meets Knowledge*. URL: <https://www.wolfram.com/mathematica/index.php.en>.