

ЗАСТОСУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ АНАЛІЗІ ДИЛАТОГРАМ МАРТЕНСИТНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ У СТАЛЯХ

Чуйко І. М., Парусов Е.В., Бобирь С. В., Сагура Л. В.

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, Україна

Анотація. У роботі наведено практичний досвід застосування математичного моделювання при аналізі кінетики атермічного мартенситного перетворення у економнолегованій конструкційній сталі 30ХГСА (Fe-0,30C-0,86Si-1,02Mn-0,84Cr, % ваг.) з використанням дилатограми реального процесу гартування. Застосована методика визначення співвідношення фаз забезпечує кореляцію *in situ* з мікроструктурними механізмами, що реалізуються у досліджуваному матеріалі під час термічної обробки. Показано зміну кількості утвореного мартенситу в досліджуваній сталі від температури за безперервного гартувального охолодження.

Ключові слова: моделювання, мартенсит, аустеніт, загартування, дилатограма.

Вступ. Термічне оброблення полягає у використанні температурного впливу для зміни фізичних та/або механічних властивостей матеріалу з метою адаптації його характеристик до вимог конкретного застосування. Серед традиційних видів термічного оброблення сталей гартування є одним з основних і широко застосовується у промисловій практиці, забезпечуючи високі характеристики міцності металовиробів [1]. Мартенситне перетворення у більшості випадків є атермічним, тобто характеризується поступовим збільшенням кількості утвореного мартенситу при безперервному охолодженні від температури початку перетворення до температури його завершення, при цьому швидкість перетворення не залежить від температури, зупинка охолодження в інтервалі його протікання призводить до припинення перетворення, а для його відновлення потрібно продовжити охолодження.

Щоб дослідити перетворення у твердому стані необхідно зареєструвати його еволюцію в залежності від температури та часу [2]. Це ґрунтується на моніторингу певної фізичної властивості, пов'язаної з різними фазовими станами матеріалу (тобто аустеніту та мартенситу у разі мартенситного перетворення у сталі). Прикладами фізичних властивостей, що контролюються

для вивчення перетворень, є: твердість, питома довжина, питомий електричний опір, ентальпія (тобто тепло, що виділяється/поглинається), намагніченість тощо. Для проведення кількісного аналізу фізичні властивості необхідно трансформувати у ступінь реалізації перетворення (або об'ємну частку фази, що зазнала перетворення). Коли об'ємна частка фази, що зазнала перетворення, відображається в залежності від температури або часу, формується крива перетворення, яку можна проаналізувати для отримання певної інформації про механізми самого перетворення.

Розширення металу являє собою безперервну або переривчасту зміну об'єму кристалічної решітки, обумовлену зміною температури або фазовим перетворенням. Ця фізична природа робить дилатометричний аналіз потужним методом вивчення протікання фазових перетворень у металевих сплавах [3–4]. Дилатометричні дані, виміряні чутливим високошвидкісним дилатометром поєднаним з термічним симулятором, можуть надати докладну інформацію щодо характеристик теплового розширення та зміни середнього об'єму кристалічної решітки при перетворенні [5]. Використовуючи спеціальні моделі аналізу, можна визначити кількість фаз як функцію температури або часу з дилатометричної кривої. Ретельний аналіз дилатометричних даних забезпечує кореляцію *in situ* з мікроструктурними механізмами, що реалізуються у досліджуваному матеріалі. Наприклад, при дослідженні сталей фазове перетворення аустеніту в мартенсит призводить до помітного об'ємного розширення, яке можна зареєструвати за змінами лінійних розмірів зразка. Таким чином, деформація (зміна лінійних розмірів) досліджуваного зразка є важливою фізичною властивістю, що пов'язана з різними фазовими станами металічних матеріалів, і широко використовується для аналізу кінетики протікання фазових перетворень.

Матеріал і методи дослідження. У якості матеріалу для досліджень обрано економнолеговану конструкційну сталь 30ХГСА (Fe-0,30C-0,86Si-1,02Mn-0,84Cr, % ваг.) у вигляді прокату діаметром 13 мм промислового виробництва. Для проведення дилатометричних досліджень зі сталевих прокатів були виготовлені зразки у вигляді паралелепіпедів з

перерізом 2 мм × 2 мм і довжиною 10 мм. Дилатометричні дослідження проводили за допомогою гартувально-деформаційного дилатометру LINSEIS L78 RITA (Німеччина) з комп'ютерним управлінням. Математичне моделювання і аналіз кінетики мартенситного перетворення проводили з використанням персонального комп'ютеру за допомогою табличного процесору Microsoft Excel та програмного пакету OriginPro.

Результати дослідження. Дилатограма процесу гартування сталі 30ХГСА до кімнатної температури з аустенітної області (нагрівання до 890 °С) і критичні температури відповідних перетворень наведена на рис. 1 а.

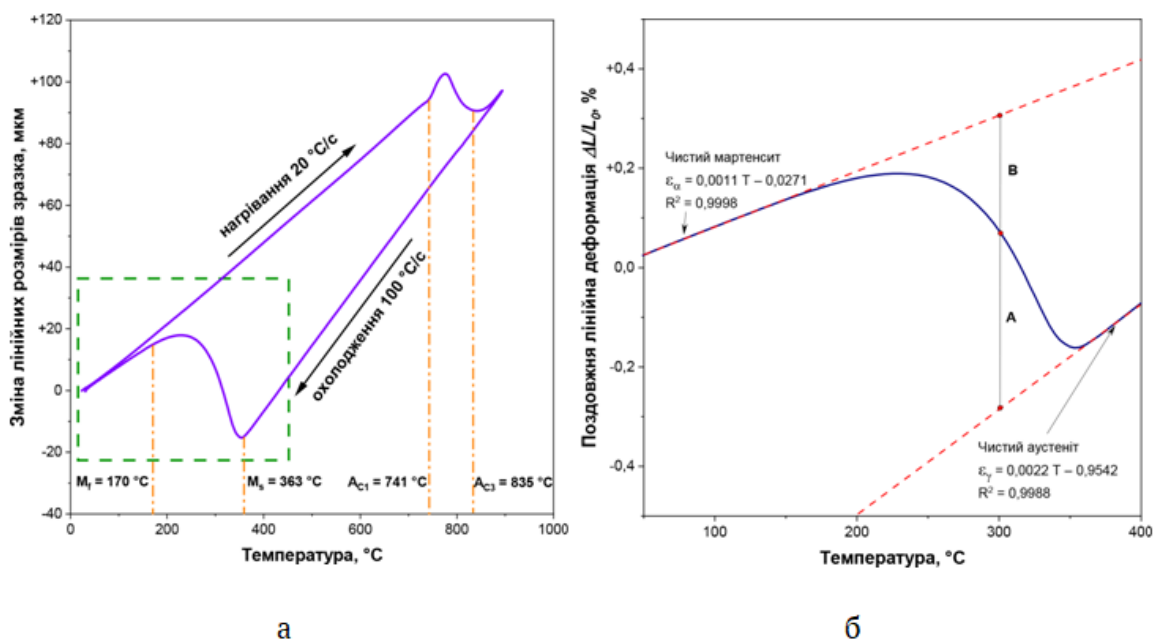


Рисунок 1 – Дилатограма процесу гартування сталі 30ХГСА до кімнатної температури з аустенітної області та критичні температури фазових перетворень (а); частково збільшене зображення області, виділеної штриховим прямокутником на а, з лінійними рівняннями термічного стиснення аустеніту та мартенситу (б)

Основною методикою аналізу, використовуюваною для розрахунку об'ємної частки фаз за дилатометричною кривою, є правило важеля [6]. Як показано на рис. 1 б, пунктирні лінії є екстраполяцією кривих стиснення аустеніту та мартенситу в процесі гартувального охолодження та розраховуються шляхом регресії дилатометричних даних [7]. Припускаючи, що об'ємна частка фаз пропорційна деформації розтягування, можна розрахувати об'ємну частку фази, що утворилася за даної температури (V_α), використовуючи відповідні довжини відрізків А і (А + В) на рис. 1 б:

$$V_{\alpha} = \frac{A}{A+B} \quad (1)$$

Відомо, що під час зниження температури аустеніт стискається лінійно. Лінійне рівняння термічного стиснення аустеніту можна отримати апроксимацією дилатометричних даних у однофазній аустенітній області на рис. 1 б у відповідності до виразу:

$$\varepsilon_{\gamma} = aT + b \quad (2)$$

де ε_{γ} – виміряна деформація при охолодженні аустеніту;

T – температура;

a, b – коефіцієнти лінійного рівняння.

Аналогічній закономірності підпорядковується і термічне стиснення мартенситу в процесі охолодження, лінійне рівняння зміни якого можна отримати апроксимацією дилатометричної кривої на рис. 1 б після закінчення мартенситного перетворення:

$$\varepsilon_{\alpha} = cT + d \quad (3)$$

де ε_{α} – виміряна деформація при охолодженні мартенситу;

T – температура;

c, d – коефіцієнти лінійного рівняння.

Враховуючи, що загальна деформація металевого зразка (ε) під час перетворення підпорядковується співвідношенню за правилом важеля, а деформації фаз дорівнюють зміні довжини зразка за даної температури (регресійні лінійні рівняння на рис. 1 б), використовуючи рівняння (2) і (3) об'ємна частка утвореного мартенситу може бути визначена виходячи з виразу [2]:

$$V_{\alpha} = \frac{\varepsilon - \varepsilon_{\gamma}}{\varepsilon_{\alpha} - \varepsilon_{\gamma}} \quad (4)$$

З використанням рівняння (4) можна визначити об'ємну частку мартенситу, що утворився у процесі гартувального охолодження сталі, у будь-який момент часу. Графічна інтерпретація відповідних розрахунків для досліджуваної сталі 30ХГСА наведена на рис. 2.

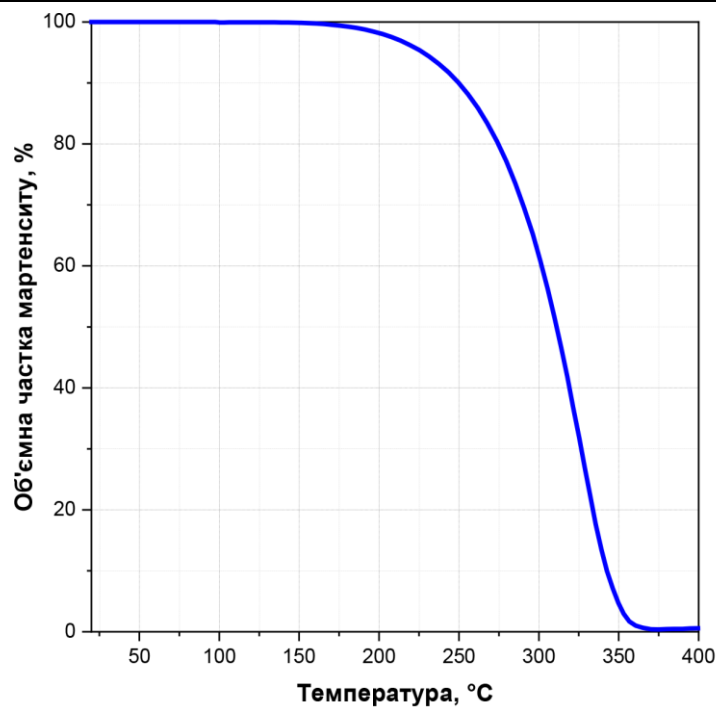


Рисунок 2 – Кількість утвореного мартенситу в сталі 30ХГСА за безперервного гартувального охолодження в залежності від температури

При цьому авторами робіт [8, 9] зроблено припущення, що застосування дилатометричних даних для аналізу кінетики мартенситного перетворення сталі може призводити до певних похибок у визначенні об'ємних часток фаз, а помилки вимірювань пов'язуються із впливом структурних напружень, зумовлених зсувним характером утворення мартенситу, а також наявністю температурного градієнту в зразках під час гартувального охолодження. Однак дилатометричний метод аналізу мартенситного перетворення у сталях є найбільш точним з точки зору кількісної оцінки співвідношення фаз у процесі перетворення і широко застосовується на практиці науковцями й інженерно-технічними працівниками металургічних підприємств.

Висновки. З використанням дилатограми реального процесу загартування конструкційної сталі 30ХГСА проведено математичний аналіз кінетики атермічного мартенситного перетворення. Показано зміну кількості утвореного мартенситу в досліджуваній сталі від температури за безперервного гартувального охолодження. Отримані результати будуть використані для розроблення параметрів термічного оброблення за принципом загартування з перерозподілом (Q&P) для поліпшення комплексу властивостей сталі 30ХГСА за рахунок створення мультифазної структури.

ЖИТЕПАТҮПА \ REFERENCE

1. ASM handbook. Volume 4, Heat treatment. Ohio : ASM International, 1991. 1012 p. ISBN 9780871703798
2. Mittemeijer E. J. Review Analysis of the kinetics of phase transformation. *J. Mater. Sci.* 1992. Vol. 27. P. 3977–3987. DOI: 10.1007/BF01105093
3. Kop T. A., Sietsma J., Van Der Zwaag S. Dilatometric analysis of phase transformations in hypo-eutectoid steels. *J. Mater. Sci.* 2001. Vol. 36. P. 519–526. DOI: 10.1023/A:1004805402404
4. Salari S., Naderi M., Prahl U., Bleck W. Quantification of phase transformation kinetics under thermomechanical conditions using dilatometry data. *Adv. Materials Research.* 2012. Vol. 622–623. P. 581–584. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.622-623.581
5. Suh D.-W., Oh C.-S., Han H. N., Kim S.-J. Dilatometric analysis of austenite decomposition considering the effect of non-isotropic volume change. *Acta Materialia.* 2007. Vol. 55. Iss. 8. P. 2659–2669. DOI: 10.1016/j.actamat.2006.12.007
6. ASTM International. Standard practice for quantitative measurement and reporting of hypoeutectoid carbon and low-alloy steel phase transformations (A1033-18). 2018. 14 p. DOI: 10.1520/A1033-18
7. Yang H.-S., Bhadeshia H. K. D. H. Uncertainties in dilatometric determination of martensite start temperature. *Mat. Sci. Tech.* 2007. Vol. 23. Iss. 5. P. 556–560. DOI: 10.1179/174328407X176857
8. Liu L., Guo B. Dilatometric analysis and kinetics research of martensitic transformation under a temperature gradient and stress. *Materials.* 2021. Vol. 14. 7271. DOI: 10.3390/ma14237271
9. Gomez M., Medina S. F., Caruana G. Modelling of phase transformation kinetics by correction of dilatometry results for a ferritic Nb-microalloyed steel. *ISIJ International.* 2003. Vol. 43, 1228–1237. DOI: 10.2355/isijinternational.43.1228

APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELING IN ANALYSIS OF DILATOGRAMS OF MARTENSITIC TRANSFORMATION IN STEEL

Ihor Chuiko, Eduard Parusov, Serhii Bobyr, Liudmyla Sahura

Abstract. *The paper provides practical experience of applying mathematical modeling in the analysis of the kinetics of athermal martensitic transformation in low-alloy structural steel 30HGSA (Fe-0.30C-0.86Si-1.02Mn-0.84Cr, % wt.) using the dilatogram of the real quenching process. The change in the amount of martensite formed in the studied steel as a function of temperature during continuous quenching cooling is shown. The used technique for determining the phase ratio provides in situ correlation with the microstructural mechanisms implemented in the studied material during heat treatment. The obtained results will be used to develop parameters of heat treatment based on the principle of quenching and partitioning (Q&P) to improve the complex of properties of 30HGSA steel due to the creation of a multiphase structure.*

Keywords: *modeling, martensite, austenite, quenching, dilatogram.*