

DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2023.01.020

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ЗАГАРТУВАННЯ ЕКОНОМНОЛЕГОВАНОЇ КОНСТРУКЦІЙНОЇ СТАЛІ ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ Q&P

Парусов Е.В., Чуйко І.М., Сагура Л.В., Олійник Е.В.

Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України (м. Дніпро, Україна)

Вступ. На сучасному етапі розвитку різних галузей промисловості важко переоцінити роль інформаційних технологій, зокрема застосування комп'ютерного моделювання для розроблення раціональних технологій виготовлення виробів відповідального призначення за рахунок забезпечення необхідного структурного стану матеріалу.

Останнім часом все більше уваги металознавців у всьому світі приділяється розвитку наукових засад і вивченню особливостей впливу на структуру та механічні властивості сталей сучасного способу термічного оброблення, заснованого на принципі «Загартування та перерозподіл» (Quenching and Partitioning – Q&P). Він був запропонований J. G. Speer з колегами у 2003 році [1], як новий спосіб оброблення для створення удосконалених високоміцних сталей (advanced high strength steel – AHSS) третього покоління. Сталі AHSS, як правило, складаються з двох або більше структурних складових: мартенсит, залишковий аустеніт ($A_{\text{зал}}$), безкарбідний бейніт, ферит. Саме наявність $A_{\text{зал}}$ дозволяє AHSS-сталям володіти підвищеним комплексом властивостей. Під час навантаження аустеніт зазнає деформаційного мартенситного перетворення, сприяючи підвищенню механічних властивостей сталі (ефект пластичності, наведеної перетворенням, або TRIP-ефект).

Для реалізації Q&P процесу сталь повинна належати до певних систем легування (Si-Mn, Si-Al-Mn, Si-Mn-Cr), які багато в чому відтворюють систему легування сталей нанобейнітного класу. З цієї точки зору, до однієї з перспективних марок належить економнолегована сталь 30XГСА, яка маючи відповідний хімічний склад і перспективу отримання необхідного комплексу механічних властивостей (одночасно високі показники міцності та пластичності із задовільним рівнем ударної в'язкості за рахунок створення мультіфазної тонкодисперсної структури) широко використовується у якості конструкційного матеріалу для виготовлення деталей і вузлів відповідального призначення.

Оскільки ця робота спрямована на виявлення перспектив використання технології Q&P для сталі 30XГСА з широким спектром застосування, вона є

актуальною і представляє інтерес як для металургійної так і машинобудівної галузей промисловості.

Результати досліджень та їх обговорення. Процес класичного Q&P оброблення складається з декількох етапів: а) аустенітизація з подальшим загартувальним охолодженням (Quenching); б) стадія «перерозподілу» (Partitioning) та завершальне охолодження. Аустенітизована сталь швидко охолоджується до температури «Quenching» (QT), яка знаходиться в інтервалі температур між M_n і M_k (температури початку і завершення мартенситного перетворення відповідно), для того, щоб перетворити частину аустеніту на мартенсит. Наступний етап включає нагрівання до температури «Partitioning» (PT) та витримування за цієї температури для перерозподілу вуглецю з пересиченого мартенситу до аустеніту. Процес завершується остаточним охолодженням (у воді, маслі або на повітрі) до кімнатної температури. У результаті насичення вуглецем аустеніт частково стабілізується, його температура M_n зменшується до значень, нижчих за кімнатну температуру, що підвищує кількість $A_{зал}$ в структурі обробленої сталі після остаточного охолодження. Ступінь збагачення аустеніту вуглецем залежить, зокрема, й від співвідношення об'ємних часток мартенситу та аустеніту після припинення загартування. Стабілізація $A_{зал}$ важлива у сталях при Q&P обробці для досягнення бажаної комбінації міцності та пластичності.

Визначення температури зупинення загартування під час Q&P оброблення здійснюється з урахуванням того, що зі зниженням QT зменшується кількість аустеніту, який може бути стабілізований перерозподілом вуглецю із мартенситу. З іншого боку, занадто висока QT призводить до зменшення кількості мартенситу і, як наслідок, недостатньої кількості вуглецю у ньому для стабілізації підвищеної кількості аустеніту. Саме за цієї причини визначення оптимальної QT є дуже важливим етапом під час реалізації Q&P оброблення. Температура та тривалість стадії «Partitioning» варіюються з урахуванням отримання необхідної кількості та стабільності $A_{зал}$ [2]. У роботі [1] запропоновано метод розрахунку оптимальної температури загартування QT для максимізації кількості $A_{зал}$ за кімнатної температури з використанням рівняння Koistinen-Marburger (K-M) [3] для температури початку мартенситного перетворення (M_n). Рівняння K-M може використовуватися для прогнозування повноти протікання перетворення аустеніту в мартенсит і визначається як:

$$F_M = 1 - \exp[-0,011(M_n - QT)] \quad (1)$$

де F_M – об'ємна частка аустеніту, яка перетворюється у мартенсит; M_n – температура початку мартенситного перетворення, °C; QT – температура

загартування, °С.

В літературних джерелах наводяться різноманітні емпіричні залежності температури M_n від хімічного складу сплаву, наприклад, запропонована С. Ү. Кунг і J. J. Rayment [4]:

$$M_n = 539 - 423C - 30,4Mn - 12,1Cr - 17,7Ni - 7,5Mo + 10Co - 7,5Si \quad (2)$$

Рівняння (1) і (2) використовуються двічі у моделі, запропонованій у роботі [1]. Спочатку розраховується температура M_n і вихідне співвідношення аустеніту та мартенситу при визначеній температурі загартування нижче M_n . Потім розраховується температура M_n аустеніту після стадії «Partitioning» виходячи з умови повного перерозподілу вуглецю з мартенситу.

Температура M_n для дослідної сталі 0,30C–0,86Si–1,02Mn–0,84Cr, розрахована за рівнянням (2), становила 364 °С, що є достатньо близьким до довідкового значення (352 °С).

Отримані у результаті розрахунку кількості аустеніту і мартенситу для сталі 30ХГСА наведені на рисунку. Оптимальною може вважатися температура $QT = 245$ °С, коли «новий» (вторинний) мартенсит не утворюється під час завершального загартування, а остаточний вміст аустеніту досягає максимуму, як наведено на рисунку 1 (суцільна лінія).

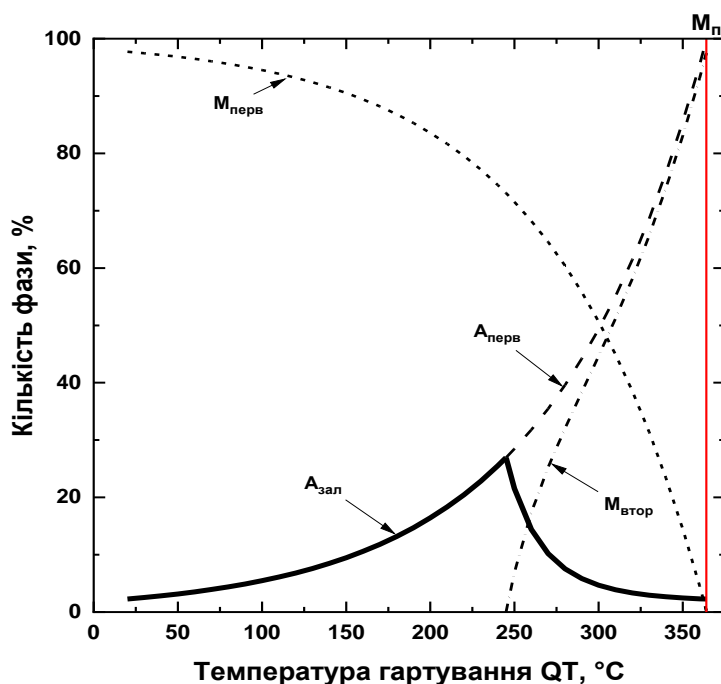


Рисунок 1 – Графічна інтерпретація розрахунку ефективної температури завершення загартування сталі 30ХГСА (0,30C–0,86Si–1,02Mn–0,84Cr). Початкові та кінцеві кількості мартенситу (M) та аустеніту (A) наведено в залежності від початкової температури загартування. Передбачається повний перерозподіл вуглецю

Висновки. З використанням математичного моделювання розрахована теоретична оптимальна температура завершення загартування для реалізації Q&P процесу економнолегованої конструкційної сталі 30XГСА. Отримані результати будуть використані під час розроблення параметрів термічного оброблення за принципом Q&P з метою підвищення комплексу властивостей сталі 30XГСА за рахунок створення мультіфазної структури.

Література

1. Speer J., Matlock D. K., De Cooman B. C., and Schroth J. G. Carbon partitioning into austenite after martensite transformation. *Acta Materialia*, 2003, No. 51, pp. 2611–2622.
2. Seo E. J., Cho L., Estrin Y., and De Cooman B. C. Microstructure-mechanical properties relationships for quenching and partitioning (Q&P) processed steel. *Acta Materialia*, 2016, No. 113, pp. 124–139.
3. Koistinen D. P. and Marburger R. E. A general equation prescribing the extent of the austenitemartensite transformation in pure iron-carbon alloys and plain carbon steels. *Acta Metallurgica*, 1959, Vol. 7, pp. 59–60.
4. Kung C. Y. and Rayment J. J. An Examination of the Validity of Existing Empirical Formulae for the Calculation of M_s Temperature. *Metall. Trans. A*, 1982, Vol. 13, p.p. 328–331.

DETERMINATION OF THE OPTIMAL QUENCHING TEMPERATURE OF LOW-ALLOY STRUCTURAL STEEL WHEN IMPLEMENTING THE Q&P PROCESS

Parusov Eduard, Chuiko Ihor, Sahura Liudmyla, Oliinyk Eduard

Abstract. The work presents practical experience of applying mathematical modeling of the multiphase structural state of low-alloy structural steel 0.30C–0.86Si–1.02Mn–0.84Cr in order to obtain improved indicators of strength and plasticity of the metal. Calculated theoretical optimum quenching completion temperature when implementing the Q&P (Quenching and Partitioning) process for the specified steel. It is shown that the optimal temperature of the completion of the quenching process should be 245 °C, when "fresh" (secondary) martensite is not formed during the final cooling, and the fraction of residual austenite reaches a maximum (approximately 27 % vol.). Austenite stabilization is known to be important in Q&P treated steels to achieve the desired combination of strength and plasticity. The obtained results will be used to develop effective modes of strengthening heat treatment of metal products of responsible purpose with the provision of increased indicators of plasticity and impact strength at ambient temperature.

Keywords: phase transformations, martensite, austenite, quenching.

Reference

1. Speer J., Matlock D. K., De Cooman B. C., and Schroth J. G. Carbon partitioning into austenite after martensite transformation. *Acta Materialia*, 2003, No. 51, pp. 2611–2622.
2. Seo E. J., Cho L., Estrin Y., and De Cooman B. C. Microstructure-mechanical properties relationships for quenching and partitioning (Q&P) processed steel. *Acta Materialia*, 2016, No. 113, pp. 124–139.
3. Koistinen D. P. and Marburger R. E. A general equation prescribing the extent of the austenitemartensite transformation in pure iron-carbon alloys and plain carbon steels. *Acta Metallurgica*, 1959, Vol. 7, pp. 59–60.
4. Kung C. Y. and Rayment J. J. An Examination of the Validity of Existing Empirical Formulae for the Calculation of M_s Temperature. *Metall. Trans. A*, 1982, Vol. 13, p.p. 328–331.