

Єфременко В.Г.1,2, Климов О.В.3, Гіржон В.В.4, Єфременко О.В.5,
Капустян О.Є.3, Бриков М.М.4

¹ проф. ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

² Prof. Institute of Materials Research of SAS, Slovakia

³ доц. НУ «Запорізька політехніка»

⁴ проф. НУ «Запорізька політехніка»

⁵ с.н.с. ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

НИЗЬКОЛЕГОВАНА СТАЛЬ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ВИСОКОЇ МІЦНОСТІ ТИПОВИМИ ВИДАМИ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

Безпека людини в особливих умовах залежить від багатьох факторів, у тому числі здатності елементів конструкцій опиратися руйнуванню під дією навантажень, які перевищують розрахункові. Тому одним з актуальних наукових напрямів матеріалознавства є пошук високоміцних матеріалів і методів їх обробки для забезпечення високих показників конструкційної міцності.

Високоміцні сталі є надзвичайно важливим конструкційним матеріалом. Застосування сталей підвищеної і високої міцності сприяє зменшенню ризику катастроф і, що є також важливим, зменшенню витрат на матеріал. Високі показники міцності сталей забезпечуються різними методами термічної (термомеханічної) обробки. Застосовність тих чи інших методів до певної сталі залежить від її хімічного складу. Було б корисним мати таку сталь, до якої можна застосовувати всі основні види термічної обробки, або їх комбінацію. До таких видів можна віднести: гартування на мартенсит із відпусканням (*quenching and tempering*), ізотермічну обробку на бейніт (*austempering*) [1], часткове гартування з подальшою ізотермічною обробкою (*quenching and partitioning, Q&P*) [2].

Конструкційні високоміцні сталі, які піддають гартуванню із відпусканням, містять до 0,45-0,50 мас.% вуглецю. Збільшення вмісту вуглецю не призводить до значного підвищення міцності, але погіршує пластичність. Важливою вимогою до сталей, які піддають обробкам *austempering* або *Q&P*, є необхідність забезпечити температуру початку мартенситного перетворення (M_p) не вище певного рівня, оптимально 240-250 °С. Саме ізотермічна обробка сталей за температур утворення нижнього бейніту дозволяє отримувати за прийнятний час витримки високі показники міцності поєднані із підвищеною пластичністю. Міцність після обробки за більш високої температури є нижчою, а обробка за нижчої температури потребує неприйнятно багато часу. Також необхідно забезпечити вміст кремнію не менше 1,5% для запобігання утворенню карбідів під час ізотермічної обробки [1]. Таким чином, високоміцна низьколегована сталь для отримання високої міцності типовими видами термічної обробки має містити вуглецю більше 0,40% та мінімально 1,5 %Si. Решта легувальних елементів є необхідними, в першу чергу, для забезпечення M_p не вище

250 °C, а також для покращення прогартуваності і додаткового підвищення механічних властивостей.

Температура Мп аустеніту, який містить, наприклад 0,40 %C і 1,5 %Si, складає приблизно 350 °C. Для зниження Мп до 250 °C можна використати Мп та Ні як елементи-аустенізатори. Ці елементи найбільшою мірою покращують прогартуваність, оскільки знижують температуру евтектоїдного перетворення; крім того, вони, найбільш ефективно у порівнянні з іншими елементами впливають на Мп. Інші легувальні елементи (Mo, Cr, V, Nb, тощо) використовують в низьколегованих сталях у невеликій кількості, зазвичай значно нижче 1%. Для зниження температури Мп до необхідного значення треба вводити в два рази менше марганцю аніж нікелю, крім того, нікель є приблизно вдвічі дорожчим за марганець. Отже, при виборі хімічного складу низьколегованої високоміцної сталі мінімальної вартості треба орієнтуватися саме на систему легування Mn-Si, вводячи додаткові елементи лише задля досягнення певних цілей, таких як подрібнення зерна, усунення відпускнуї крихкості, тощо.

Подальші дослідження можуть бути спрямованими на визначення структури і властивостей низьколегованих високоміцних сталей із підвищеним вмістом вуглецю за різних видів термічної обробки. За умов задовільних механічних і технологічних властивостей такі сталі можуть доповнити ДСТУ 3760:2019 «Прокат арматурний для залізобетонних конструкцій». На теперішній час зазначений ДСТУ регламентує вимоги до арматури зі сталей із вмістом до 0,32 %C, 2,40 %Si і 2,30 %Mn. Підвищення вмісту вуглецю із відповідним уточненням вмісту легувальних елементів дозволить значно розширити спектр властивостей виробів завдяки застосуванню різних видів термічної обробки, зокрема *austempering* та *Q&P*.

Роботу виконано за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України (проект 2021.01/0189).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Bhadeshia, H.K.D.H., Christian, J.W. Bainite in steels. *Metall Trans A*. 1990. Vol. 21, P. 767–797.
2. Zurnadzhy V.I., Efremenko V.G., Wu K.M., Petryshynets I., Shimizu K., Zusin A.M., Brykov M.N., Andilakhai V.A. Tailoring strength/ductility combination in 2.5 wt% Si-alloyed middle carbon steel produced by the two-step Q-P treatment with a prolonged partitioning stage. *Materials Science and Engineering: A*. 2020. Vol. 791, 139721.