

Вплив термічної обробки на механічні властивості модифікованих неіржавіючих сталей

Афтанділянц Є. Г., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри, afteyev@yahoo.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5864-9855>

Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ

У роботі наведено результати дослідження впливу структури на механічні властивості мікролегованих і модифікованих аустенітних неіржавіючих сталей.

Показано, що механічні властивості литих неіржавіючих сталей аустенітного класу з ймовірністю 95 % і похибкою від 0.46 до 13.2 % визначаються такими параметрами структури, як розмір зерна аустеніту, вміст карбідної фази і фериту в аустеніті після гартування, вміст, розмір та відстані між частинками оксидів, сульфідів та карбонітридів титану.

Побудовані математичні моделі впливу структури на межу текучості, відносне звуження і ударну в'язкість неіржавіючих сталей.

Встановлено ефективність впливу параметрів структури і показано, що по ефективності дії на міцність, відносне звуження та ударну в'язкість неіржавіючих сталей при нормальній температурі структурні фактори розміщують у наступному порядку: розмір зерна аустеніту, об'ємна частка, розмір та розподіл карбонітридів титану та сульфідів, загальний вміст неметалевих включень, карбідів та фериту в аустеніті після гартування неіржавіючої сталі, а також об'ємна частка, розмір та розподіл оксидних включень.

Наведено, що шляхом цілеспрямованого керування режимами термічної обробки, мікролегування і модифікування можливо підвищення міцності аустенітних неіржавіючих сталей на 150 – 240 МПа, ударної в'язкості в 2.6 – 3.1 рази при збереженні пластичності, що є основою для підвищення надійності і роботоздатності обладнання та зниження його ваги.

Ключові слова: *сталь, структура, механічні властивості, міцність, пластичність, ударна в'язкість.*

Мікролегування та модифікування є найбільш поширеними методами підвищення рівня властивостей литих аустенітних неіржавіючих сталей [1, 2]. Комплексне мікролегування та модифікування литих аустенітних неіржавіючих сталей міддю, ванадієм, рідкоземельними металами та бором є найбільш перспективним та актуальним для визначення ефективності впливу зміни структури, що відбувається при цьому, на механічні властивості сталі.

Хімічний склад досліджуваних сталей змінювався (мас. частка %) від 0,05 до 0,12 % С; від 0,61 до 1,51 % Si; від 0,66 до 1,77 % Mn; від 15,6 до 20,0 % Cr; від 8,8 до 17,2 % Ni; від 0,2 до 0,7 % Ti; від 0,016 до 0,034 % P; від 0,017 до 0,035 % S; від 0,029 до 0,037 % N; від 0,10 до 0,61 % Cu; від 0,006 до 0,021 % O; до 3,5 % Mo; 0,15 % Ce; 0,0076 % B; 0,35 % V.

Структура та фізико-механічні властивості

Результати визначення механічних властивостей, при кімнатній температурі, базових та комплексно мікролегованих та модифікованих церієм, бором, ванадієм та міддю литих неіржавіючих сталей, після гартування в інтервалі температур від 1050 до 1150 °С наведено на рис. 1, 2, а після гартування та відпуску в інтервалі від 600 до 700 °С – на рис. 3, 4.

Аналіз результатів виконаних експериментів показує, що у разі нормальних температур при комплексному мікролегуванні та модифікуванні неіржавіючих сталей після гартування спостерігається суттєве, на 150 – 240 МПа, підвищення властивостей міцності та ударної в'язкості в 2.6 – 3.1 рази, при цьому відносне звуження практично не змінюється (рис. 1, 2).

Оптимальне поєднання механічних властивостей загартованих сталей досягається при вмісті в сталі від 0.039 до 0.043 % церію, від 0.0024 до 0.0025 % бору, від 0.11 до 0.12 % ванадію і від 0.2 до 0.25 % міді.

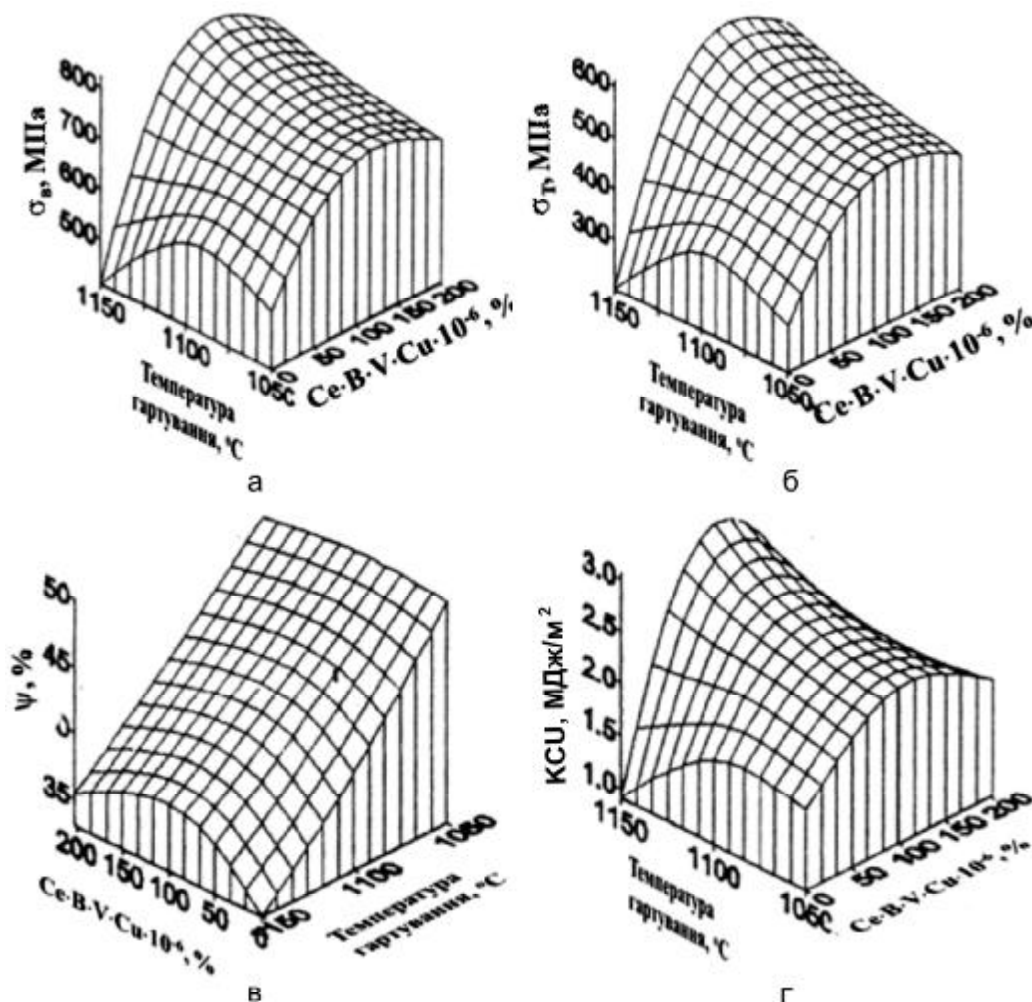


Рис. 1. Вплив температури гартування і мікролегування на механічні властивості модифікованої сталі 12X18H9TЛ

Fig. 1. Influence of hardening and microalloying temperature on mechanical properties of modified steel 12X18H9TЛ.

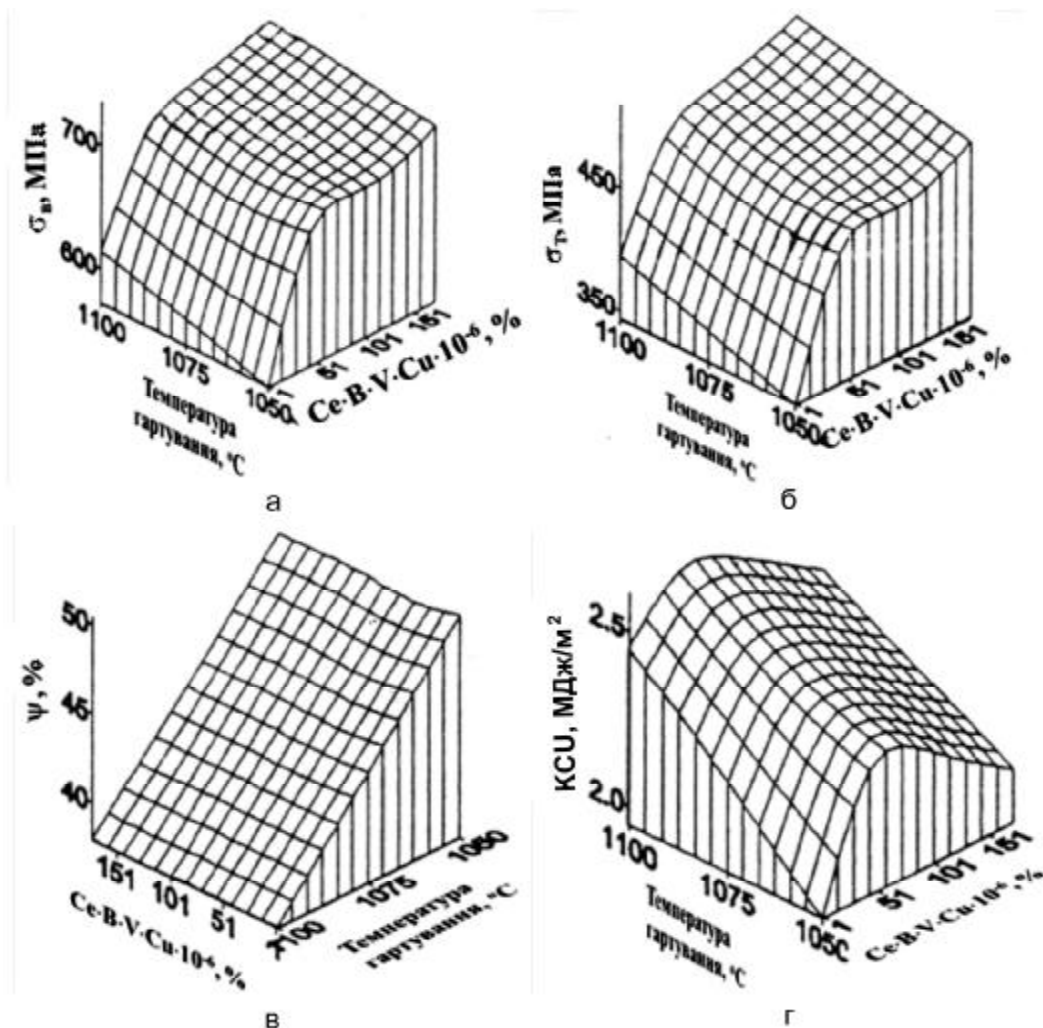


Рис. 2. Вплив температури гартування і мікролегування на механічні властивості модифікованої сталі 12X18H12M3TL.

Fig. 2. Influence of hardening and microalloying temperature on mechanical properties of modified steel 12X18H12M3TL.

Ефективність підвищення механічних властивостей при комплексному мікролегуванні та модифікуванні неіржавіючих сталей після відпуску загартованих сталей зберігається, але при цьому змінюється закономірність впливу (рис. 3, 4).

З рис. 4 видно, що зі збільшенням температури гартування міцність сталей з Ce, B, V і Cu помітно зростає порівняно з базовим складом сталі (рис. 3), відзначається також більший вплив температури відпуску.

Механічні властивості сталей визначаються, в основному, властивостями твердого розчину, дефектами його кристалічної будови, дисперсністю мікроструктури, властивостями, кількістю, дисперсністю та розподілом неметалевих включень та вторинних фаз. Тому комплексний вплив церію, бору, ванадію та міді на механічні властивості неіржавіючих

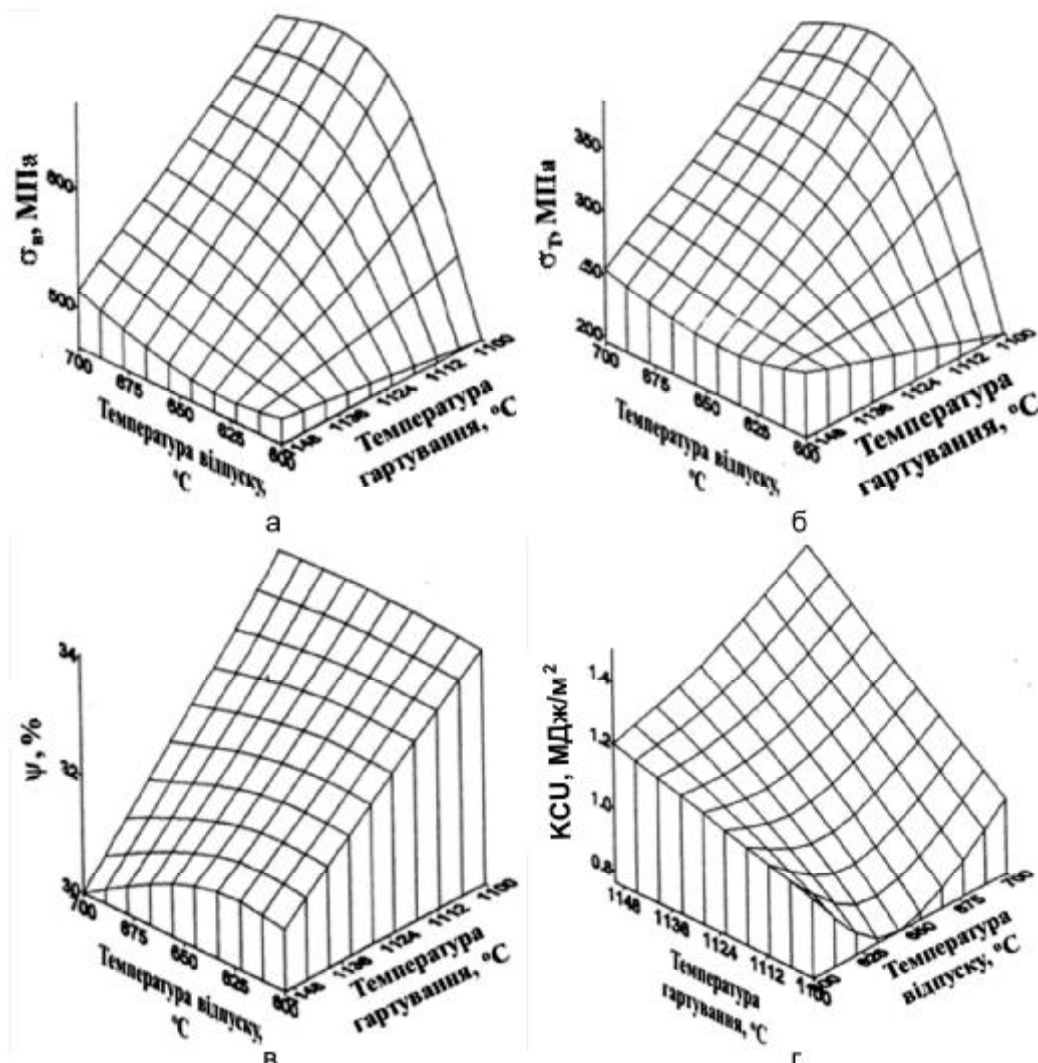


Рис. 3. Вплив температури гартування та відпуску на механічні властивості базової сталі 12X18H9TЛ.

Fig. 3. Influence of hardening and tempering temperature on mechanical properties of base steel 12X18H9TЛ.

сталей досліджували з урахуванням їх впливу на параметри структури, які визначали за даними [3 – 5].

Множинний кореляційний аналіз показав, що процес формування механічних властивостей литих неіржавіючих сталей аустенітного класу з ймовірністю 95 % та похибкою від 0.46 до 13.2 % описується такими параметрами структури, як розмір зерна аустеніту (D_{aust}), вміст карбідної фази (q_c) та фериту в аустеніті після гартування (fer_q), об'ємна частка, розмір і відстані між частинками оксидів, сульфідів і карбонітридів титану, ($f_{ok}; f_s; f_{TiC(N)}; d_{ok}; d_s; d_{TiC(N)}; l_{ok}; l_s; l_{TiC(N)}$), а також сумарний вміст неметалевих включень у неіржавіючу сталь (Σf).

Встановлені залежності мають наступний вигляд:

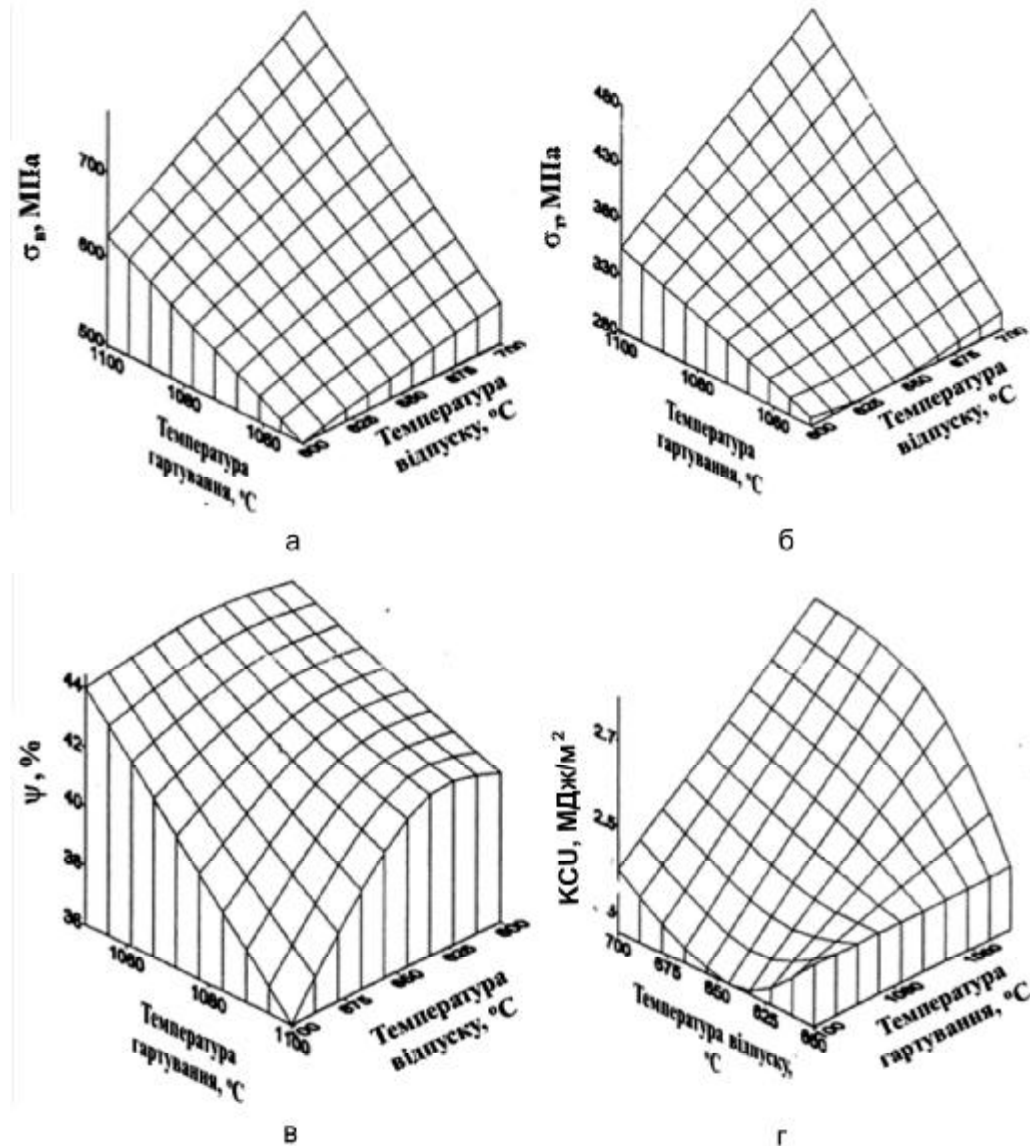


Рис. 4. Вплив температури гартування та відпуску на механічні властивості мікролегованої (0.2 % Cu, 0.11 % V, 0.0025 % B) та модифікованої 0.043 % Ce сталі 12X18H9ТЛ.

Fig. 4. Influence of hardening and tempering temperature on mechanical properties of microalloyed (0.2 % Cu, 0.11 % V, 0.0025 % B) and modified 0.043 % Ce steel 12X18H9TЛ.

$$\sigma_T = 2550 + 8,06 \cdot 10^{-3} \cdot D_{aust} + 62,3 \cdot q_c + 24,2 \cdot fer_q + 5,26 \cdot 10^5 \cdot (f_{ok} / (d_{ok} \cdot l_{ok})) + 3,29 \cdot 10^5 \cdot (f_s / (d_s \cdot l_s)) - 2,42 \cdot 10^4 \cdot (f_{TiC(N)} / (d_{TiC(N)} \cdot l_{TiC(N)})) + 871 \cdot \Sigma f - 3,51 \cdot t_q - 0,441 \cdot t_t; \quad R=0.998, \text{ МПа} \quad (1)$$

$$\sigma_\sigma = 1650 - 0,858 \cdot t_q + 0,26 \cdot t_t + 0,064 \cdot \sigma_T; \quad R=0.998, \text{ МПа} \quad (2)$$

$$\psi = 246 + 1,48 \cdot 10^{-3} \cdot D_{aust} + 2,35 \cdot q_c + 0,881 \cdot fer_q + 1,63 \cdot 10^4 \cdot (f_{ok} / (d_{ok} \cdot l_{ok})) + 9,66 \cdot 10^3 \cdot (f_s / (d_s \cdot l_s)) - 539 \cdot (f_{TiC(N)} / (d_{TiC(N)} \cdot l_{TiC(N)})) + 38,4 \cdot \Sigma f - 0,245 \cdot t_q - 0,024 \cdot t_t; \quad R=0.998, \% \quad (3)$$

Структура та фізико-механічні властивості

$$KCU = - 8,87 - 2,75 \cdot 10^{-4} \cdot D_{aust} + 0,298 \cdot q_c - 0,092 \cdot fer_q - 3,95 \cdot 10^3 \cdot (f_{ok} / (d_{ok} \cdot l_{ok})) - 3,14 \cdot 10^3 \cdot (f_s / (d_s \cdot l_s)) + 250 \cdot (f_{(TiC(N))} / (d_{(TiC(N))} \cdot l_{(TiC(N))})) - 2,4 \cdot \Sigma f + 0,019 \cdot t_q - 0,002 \cdot t_t; \quad R=0.912, \text{ МДж/м}^2 \quad (4)$$

де t_q і t_t – відповідно, температура гартування і відпуску, °C; R – коефіцієнт множинної кореляції.

Аналіз значень коефіцієнта множинної кореляції показує високий рівень адекватності встановлених кількісних закономірностей процесу формування механічних властивостей комплексно мікролегованих та модифікованих неіржавіючих сталей.

За значеннями критерію Стюдента коефіцієнтів рівнянь 1 – 4 визначили ефективність впливу структурних факторів на межу текучості (σ_T), відносне звуження (ψ) та ударну в'язкість (KCU) неіржавіючих сталей.

Результати аналізу показують, що щодо збільшення ефективності впливу на міцність, відносне звуження та ударну в'язкість неіржавіючих сталей за нормальної температури структурні фактори можна розташувати в наступній послідовності: розмір зерна аустеніту, об'ємна частка, розмір та розподіл карбонітридів титану та сульфідів, загальний вміст неметалевих включень, карбідів та фериту в аустеніті після гартуванні неіржавіючої сталі, об'ємна частка, розмір та розподіл оксидних включень.

При цьому ефективність впливу оксидів на механічні властивості складає 74 %, у тому числі на межу текучості – 23 %, відносне звуження – 22 %, та ударну в'язкість – 29 %. Загальна ефективність впливу фериту в аустеніті після гартування складає 61 %, у тому числі, відповідно, 22 %, 20 %, 19 %. Вплив карбідної фази складає 54 %, у тому числі, відповідно, 19 %, 20 %, 14 %.

Результати виконаних експериментів показують, що ефективне підвищення рівня механічних властивостей аустенітних неіржавіючих сталей шляхом мікролегування і модифікування можливо у випадку першочергового суттєвого зменшення частки та розміру оксидних включень та підвищенню рівномірності їх розподілу, а також вмісту фериту та карбідної фази в аустеніті після гартування сталі.

В заключенні слід відзначити, що шляхом цілеспрямованого керування режимами термічної обробки, мікролегування і модифікування можливо підвищення міцності аустенітних неіржавіючих сталей на 150 – 240 МПа, ударної в'язкості в 2.6 - 3.1 рази при збереженні пластичності, що є основою для підвищення надійності і роботоздатності обладнання та зниження його ваги.

Література

1. Крещановский Н.С., Сидоренко М.Ф. Модифицирование стали. – М.: Металлургия, 1970. – с. 296.
2. Браун М. П. Микролегирувание стали. – Киев: Наук. думка, 1982. – с. 304.

3. Афтанділянц В. В., Афтанділянц Є. Г. Вплив модифікування і мікролегуювання на виділення вторинних фаз в аустенітних неіржавіючих сталях // Металознавство та обробка металів. – 2004. – № 4. – С. 21-24.
4. Афтанділянц Є.Г. Фазові перетворення аустенітних неіржавіючих модифікованих сталей // Металознавство та обробка металів. – 2019. – № 2. – С. 11 – 18. <https://doi.org/10.15407/mom2019.02.011>
5. Афтанділянц В. В. Влияние комплексного микролегирования и модифицирования на микроструктуру литых нержавеющей аустенитных сталей. Металлофизика и новейшие технологии. – Київ, НАНУ, т.22, №2, 2000. С. 56 – 60.

References

1. Kreschanovsky N. S., Sidorenko M. F. *Modifitsirovaniye stali* (Modification of steel), М.: Metallurgy, 1970, 296 p. [in Russian].
2. Braun M. P. *Mikrolegirovaniye stali* (Microalloying of steel), Kyiv: Nauk. Dumka, 1982, 304 p. [in Russian].
3. Aftandilyants V. V, Aftandilyants E.G., *Metalloznastvo ta obrobka metaliv*, 2004, No.4, pp. 21-24 [in Ukraine].
4. Aftandilyants Y. G. *Metalloznastvo ta obrobka metaliv*, 2019, No. 2, pp. 11-18, <https://doi.org/10.15407/mom2019.02.011> [in Ukraine].
5. Aftandilyants V. V. Vliyaniye kompleksnogo mikrolegirovaniya i modifitsirovaniya na mikrostrukturu litykh nerzhaveyushchikh austenitnykh staley, *Metallofizika i noveyskiye tekhnologii*, 2000, No. 22, 2, pp. 56 – 60 [in Russian].

Одержано 24.01.22

Aftandilants Y. G.

The effect of heat treatment on the mechanical properties of modified stainless steels

Summary

The paper presents the results of the study of the influence of structure on the mechanical properties of microalloyed and modified austenitic stainless steels.

It is shown that the mechanical properties of cast austenitic stainless steels with a probability of 95 % and an error of 0.46 to 13.2 % are determined by such structural parameters as austenite grain size, carbide phase and ferrite content in austenite after quenching, quantity, size and distance between oxide, titanium sulfides and carbonitrides particles.

Mathematical models of the structure influence on the yield strength, reduction of area and toughness of stainless steels are built.

The structure parameter effectiveness is shown and it is shown that to increase the efficiency of strength, reduction of area and toughness of stainless steels at normal temperature structural factors affect in the following sequence: austenite grain size, volume fraction, size and distribution of titanium carbonitrides and sulfides, the total quantity of non-metallic inclusions, carbides and ferrite in austenite after hardening of stainless steel, as well as the volume fraction, size and distribution of oxide inclusions.

Keywords: steel, structure, mechanical properties, strength, ductility, toughness.