

Механічні та функціональні властивості Cr-(Ni)-Mn-N аустенітних жароміцних і жаростійких сталей

С. Я. Шипицин, доктор технічних наук, завідувач відділу, odus@optima.kiev.ua

І. Ф. Кірчу, кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник

Т. В. Степанова, науковий співробітник

П. М. Кучеренко, молодший науковий співробітник

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

Виконані дослідження показали, що за рахунок оптимізації співвідношення базових елементів Cr, Mn, Ni, Si та зміцнення за рахунок дисперсійної фази VN та дисперсної TiN, можливе створення малонікелевих Cr-Mn-Ni аустенітних сталей, як аналогів стандартним Cr-Ni аустенітним сталям з 18 – 24 % Ni. Ці сталі з вмістом 3 – 7 % Ni за жароміцністю, жаростійкістю, термостійкістю при температурах експлуатації не поступаються, а в деяких випадках перевищують стандартні Cr-Ni сталі.

Ключові слова: жароміцні і жаростійкі сталі, нікель, дисперсійне зміцнення, термостійкість, легування.

Нікель є стратегічним елементом, який застосовується при виробництві якісних сталей та сплавів. Проте його сировинні ресурси вичерпуються і вартість на світовому ринку постійно зростає. Значна кількість нікелю, що виробляється, витрачається для виготовлення аустенітних жароміцних сталей з 12 – 36 % нікелю для оснащення термічного і опалювального обладнання. Часткове зменшення вмісту нікелю на 2 – 10 % в цих сталях при суттєвому в 2 – 5 разів підвищенні експлуатаційного ресурсу оснастки досягається комплексним легуванням їх азотом та нітридоутворюючими елементами – ванадієм, ніобієм, титаном за рахунок зменшення дисперсною фазою та твердорозчинним азотом хімічної і структурної неоднорідності металу, диспергування зерна мікро- і субструктури, диспергування та зменшення швидкості росту і коагуляції карбідних фаз, додаткового дисперсійного зміцнення [1].

Повне вилучення нікелю зі складу аустенітних жароміцних сталей можливо за рахунок легування марганцем [2, 3]. Але низький вміст хрому та високий марганцю в таких сталях як, наприклад, 40X10Г14Ю2, 45X15Г14ЮС, 0X10АГ14, що пов'язано із збереженням аустенітної матриці, обмежують температуру експлуатації до 700 – 800 °С за жаростійкістю і

Структура і фізико-механічні властивості

жароміцністю. Тому створення жароміцних аустенітних безнікелевих або малонікелевих сталей для експлуатації при температурах до 1000 °С і вище можливе шляхом комплексного легування їх марганцем, азотом та активними нітридоутворюючими елементами.

В роботі [4] визначено концентраційні межі легування хромом, нікелем, марганцем жароміцних аустенітних азотовмісних сталей з нітридним зміцненням, які є аналогом стандартних хромонікелевих сталей. Для базових складів з хромом 14, 18 і 24 %, визначено мінімальний вміст марганцю і нікелю, які забезпечують формування однофазної аустенітної матриці в сталях та її стабільність до $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення при експлуатації. На основі цих даних проводили визначення фізико-механічних і функціональних властивостей на Cr-Ni-Mn сталях з різним базовим вмістом хрому, що забезпечує різний рівень жаростійкості, додатково легуваних кремнієм для підвищення жаростійкості, ванадієм, титаном і азотом – для створення дисперсійної фази VN і дисперсної TiN. Це забезпечить підвищення міцності, жаростійкості металу і диспергування його структури. В таблиці наведено хімічний склад дослідних сталей і стандартних Cr-Ni сталей аналогів.

Хімічний склад досліджуваних сталей, % мас.

Марка сталі	C	Si	Mn	Cr	Ni	V	Ti	N	S	P
30X18N12C2Л	0,32	2,1	0,6	17,9	12,2	0,31	0,11	0,049	0,021	0,009
30X24N19C2Л	0,30	1,9	0,5	24,1	19,7	0,30	0,10	0,052	0,022	0,011
30X14Г10С2АФТЛ	0,31	1,9	10,6	14,4	-	≤0,50	≤0,20	≤0,40	0,019	0,010
30X18НЗГ10С2АФТЛ	0,30	2,2	10,1	18,2	3,2	≤0,50	≤0,20	≤0,40	0,020	0,013
30X24Н7Г8С2АФТЛ	0,33	2,2	8,3	24,5	7,5	≤0,50	≤0,20	≤0,40	0,021	0,011

Виплавку сталей здійснювали в лабораторній печі типу «ТАММАНА» в алундових тиглях з масою металу 0,35 – 1,50 кг та в індукційній печі ИСТ-16 з основною футеровкою, методом сплавлення технічно чистих матеріалів: низьколегованої сталі марки 10864, хрому металевого Х99Н1, нікелю гранульованого марок Н2 і Н3, кремнію металічного марок Кр00 та Кр0, марганцю металічного Мр00, азотованого ферохрому, ферованадію з 43 % мас. частки ванадію, феротитану, алюмінію.

Для визначення фазового складу і структури сталі, дослідження проводили на мікроскопах при збільшенні 100 – 1000 та 3000 – 12000. Використовували мікроскопи МИМ-8М, «ЭПИТИП», ЭМ-125К, растровий мікроскоп РЭММА-102 з мікроаналізатором.

Зразки для визначення механічних та спеціальних властивостей виготовляли з литого металу згідно ГОСТ 9770-78. Механічні властивості при кімнатній і підвищених температурах визначали по ГОСТ 9454-78. Зразки для ударних випробувань виготовляли розміром 55x10x10 мм, з U-подібним надрізом. Випробування на жароміцність проводили на циліндричних зразках діаметром 10 мм та довжиною 50 мм за ГОСТ 9651-84.

Структура і фізико-механічні властивості

Величину навантаження при виконанні випробувань визначали по величині межі плинності при 850 °С.

Також зразки з досліджуваних сталей піддавались випробуванням на термостійкість за методиками з роботи [5], шляхом витримки зразка при 850 °С в печі опору протягом 4,5 хвилин і подальшим занурюванням в воду на 40 секунд. Термостійкість визначали кількістю циклів до утворення тріщин на зразках. Циліндричні зразки для випробувань виготовляли шляхом вакуумного всмоктування розплаву в кварцові трубки діаметром 8,3 мм, з подальшим обточуванням на токарному станку до 7 мм, їх довжина складала 55 мм.

Жаростійкість сталей визначали ваговим методом по приросту маси зразка за ГОСТ 6130-71. Потім поміщали в алундові тиглі, що закриваються кришкою при температурах 700 °С, 850 °С та 1000 °С. Час витримки за цих температур складав 247 годин. Через 5, 15, 35, 185 і 247 годин витримки проводили контрольне зважування на аналітичних вагах АДВ-200М та вивчали вплив досліджуваних систем легування на кінетику процесу окислення сталей за даний проміжок часу.

Аналіз експериментальних даних показує, що Cr-(Ni)-Mn-N сталі при кімнатних температурах в литому стані значно перевищують (на 300 – 400 МПа) Cr-Ni сталі за характеристиками міцності (рис. 1) та поступаються на 5 – 12 % за показником в'язкості (рис. 2). Дані щодо механічних властивостей та жароміцності наведені на рис. 3.

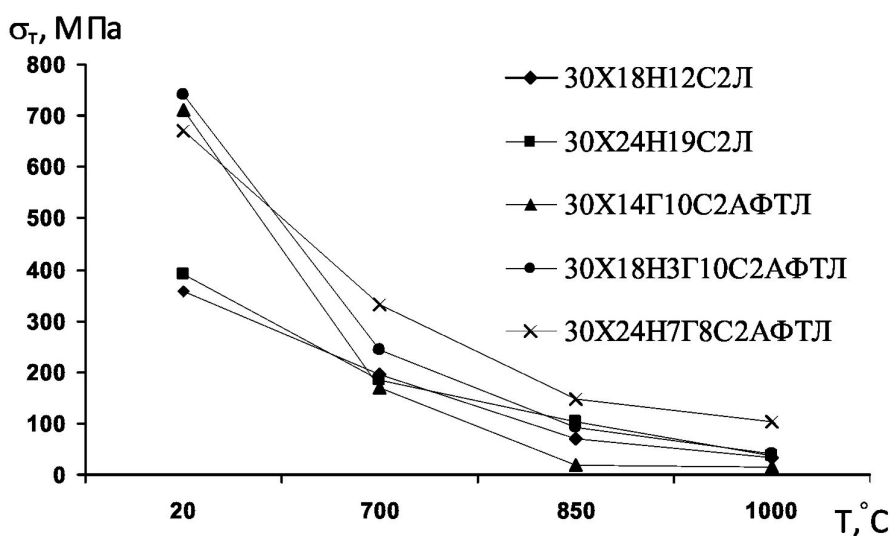


Рис. 1. Межа міцності сталей при кімнатній та підвищених температурах.

Встановлено, що характеристики міцності при підвищених температурах та жароміцність Cr-(Ni)-Mn-N сталей підвищуються при збільшенні їх легування хромом, марганцем та нікелем. При цьому сталь 30X14Г10C2АФТЛ значно поступається, а сталі 30X18H3Г10C2АФТЛ, 30X24H7Г8C2АФТЛ знаходяться на рівні, або суттєво перевищують по міцності хромонікелеві стандартні сталі 30X18H12C2Л та 30X24H19C2Л.

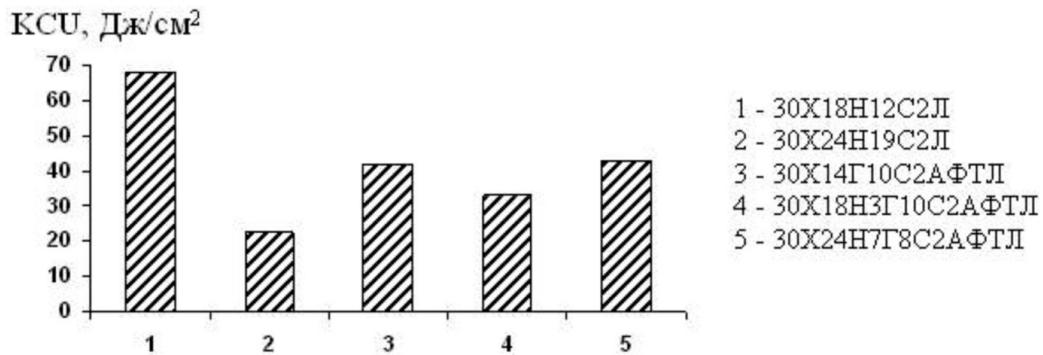


Рис. 2. Ударна в'язкість при 20 °С Cr-Ni та Cr-(Ni)-Mn-N аустенітних сталей.

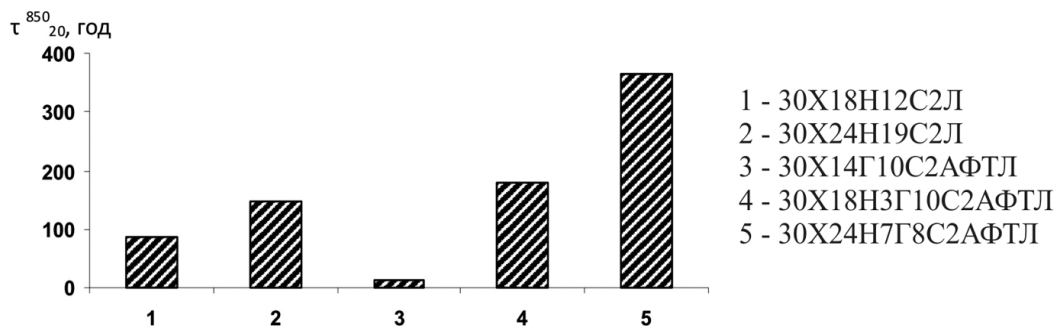


Рис. 3. Жароміцність сталей за часом до руйнування при 850 °С та $\sigma = 20$ МПа.

Основними причинами встановлених закономірностей є вплив ступеня легування на твердорозчинне, субграничне та дисперсійне зміцнення та схильність до $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення при підвищених температурах. Так мінімальну схильність до $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення з розглянутих сталей має сталь 30X14Г10C2АФТЛ, а максимальну – 30X24H7Г8C2АФТЛ, яка за аналогічним показником не поступається хромонікелевим сталям (рис. 4).

Щоб підвищити опір руйнуванню під час температурних впливів використовували метод твердорозчинного зміцнення марганцем та азотом, що призвело до підвищення стабільності аустенітної структури, зростання характеристик міцності металу та збереження пластичності при високих температурах. При збільшенні вмісту марганцю і додаткового легування нікелем – для більшої стабілізації аустеніту, встановлене суттєве підвищення опору термічній втомі (рис. 5).

Підвищені характеристики міцності при кімнатних та підвищених температурах, та жароміцність Cr-(Ni)-Mn-N аустенітних сталей зі стійкою до $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення аустенітною матрицею в порівнянні з Cr-Ni сталями, пояснюється більшою схильністю перших до субграничного деформаційного зміцнення, а зниження рівня цих характеристик в Cr-(Ni)-Mn-N сталях нижче рівня Cr-Ni сталей пов'язано з розвитком при підвищених температурах процесу $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення.

Структура і фізико-механічні властивості

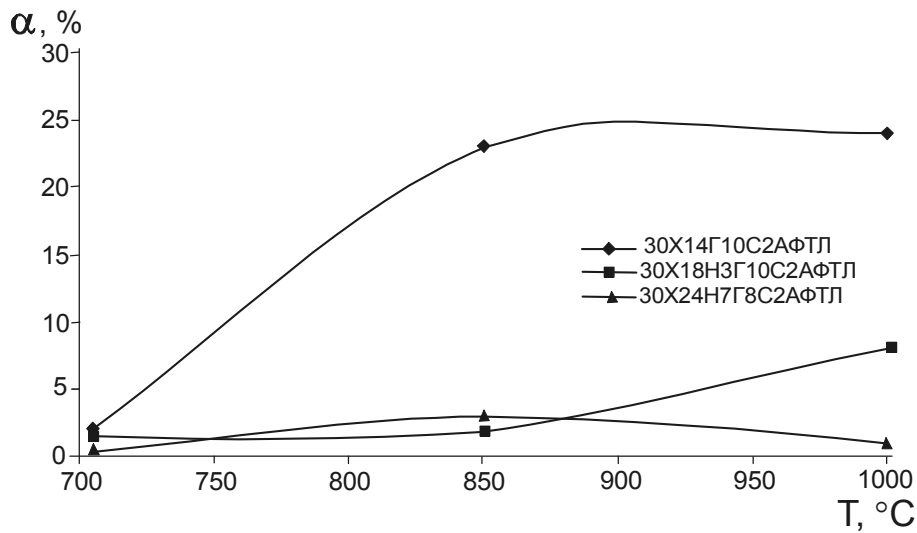


Рис. 4. Вплив температури теплової обробки на об'ємну частку фериту, який утворився в аустенітних сталях після 35 годин обробки.

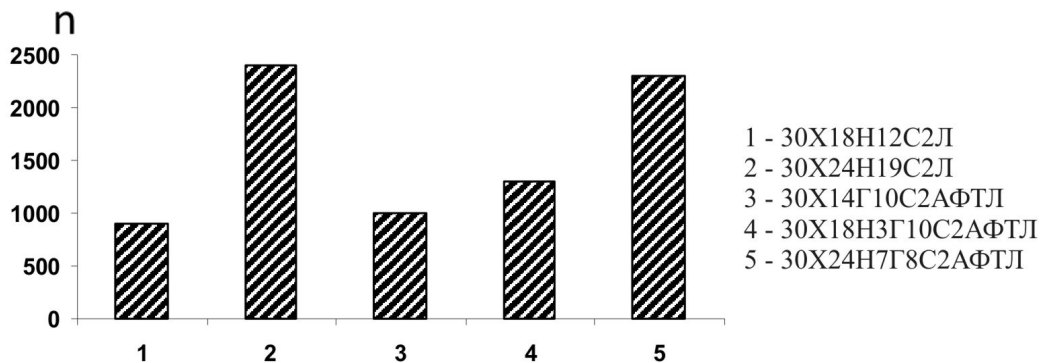


Рис. 5. Термостійкість аустенітних сталей. n – кількість циклів 850 °C ↔ вода, до утворення тріщин.

Відомо, що марганець знижує жаростійкість аустенітних сталей внаслідок більш високої дифузійної рухливості в окисних плівках заліза ніж хрому і нікелю, а також за рахунок більш високої різниці коефіцієнтів лінійного розширення оксидів марганцю та металевої матриці, що викликає інтенсивне відшарування окалини [6, 7].

Встановлено, що при оптимізації вмісту в сталях хрому, марганцю, нікелю, азоту, ванадію і титану, жаростійкість дослідних Cr-Ni-Mn-N-V-Ti сталей суттєво не відрізняється від стандартних Cr-Ni аустенітних сталей (рис. 6).

Таким чином показано, що за рахунок оптимізації співвідношення базових елементів Cr, Mn, Ni, Si та зміцнення за рахунок дисперсійних фаз VN та TiN, можливе створення малонікелевих Cr-Mn-Ni аустенітних

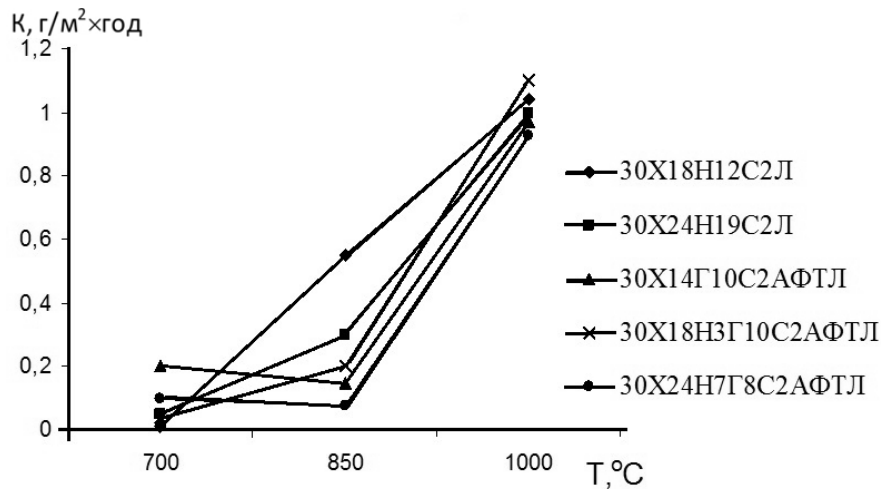


Рис. 6. Вплив температури на швидкість окислення (K) Cr-Ni стандартних і Cr-(Ni)-Mn-N аустенітних сталей.

сталей, як аналогів стандартним Cr-Ni аустенітним сталям з 18 – 24 % Ni. Показано, що ці сталі з вмістом 3 – 7 % Ni за жароміцністю, жаростійкістю, термостійкістю при температурах експлуатації не поступаються, а в деяких випадках перевищують стандартні Cr-Ni сталі.

Література

1. Шипицын С.Я., Бабаскин Ю.З. Специальные азотсодержащие экономнолегированные стали с карбонитридным упрочнением. // Процессы литья. – 1988. – №3-4. – С. 122-130.
2. Банных О.А., Ковнеристый Ю.К., Зудин И.Ф. Хромомарганцевые теплоустойчивые стали с алюминием. – М.: Наука. – 1965. – 102 с.
3. Приданцев М.В., Талов Н.П., Левин Ф.Л. Высокопрочные аустенитные стали. – М.: Металлургия. – 1980. – 248 с.
4. Шипицын С.Я., Бабаскин Ю.З., Кірчу І.Ф. та ін. Аустеніт, ферит та $\alpha \rightarrow \gamma$ перетворення в Cr-Mn-(Ni)-N жароміцних сталях // Металознавство та обробка металів. – 2001. – № 4. – С. 3-9.
5. Баландин Ю.Ф. Термическая усталость металлов в судовом машиностроении. – Л: Судостроение. – 1967. – 270 с.
6. Гудремов Э. Сециальные стали: в 2 т. – М.: Металлургия. – 1966. – Т 1. – С. 388-713.
7. Heat-resistant alloys-operating characteristics Highlighted // Metallurgia. – 1996. – №1. – 429 с.

References

1. Shi pytsyn S.Ya., Babaskin Yu.Z., *Protsessy litya*, 1988, No 3-4, pp. 122-130 [in Russian].

2. Bannykh O.A., Kovneristy Yu.K., Zudin I.F. *Khromomargantsevyye teploustoychivyye stali s alyuminiyem* (Chrome-manganese heat-resistant steels with aluminum), Moskva: Nauka, 1965, 102 p. [in Russian].
3. Pridantsev M.V., Talov N.P., Levin F.L. *Vysokoprochnyye austenitnyye stali* (High strength austenitic steels), Moskva: Metallurgiya, 1980, 248p. [in Russian].
4. Shipitsin S.Ya., Babashkin Yu.Z., Kirchu I.F., *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, 2001, No 4, pp. 3–9. [in Russian].
5. Balandin Yu.F. *Termicheskaya ustalost metallov v sudovom mashinostroyenii* (Thermal fatigue of metals in marine engineering), Leningrad: Sudostroyeniye, 1967, 270 p. [in Russian].
6. Gudremov E. *Spetsialnyye stali* (Special steels), Moskva: Metallurgiya, 1966, Tom 1, pp. 388-713 [in Russian].
7. Heat-resistant alloys-operating characteristics Highlighted, *Metallurgia*, 1996, No 1, 429 p. [in English].

Одержано 29.08.19

С. Я. Шипицын, П. Н. Кучеренко, И. Ф. Кирчу, Т. В. Степанова

Механические и функциональные свойства Cr-(Ni)-Mn-N аустенитных жаропрочных и жаростойких сталей

Резюме

Исследования показали, что за счет оптимизации соотношения базовых элементов Cr, Mn, Ni, Si и упрочнения за счет дисперсионной фазы VN и дисперсной TiN, возможно создание малоникелевых Cr-Mn-Ni аустенитных сталей, как аналогов стандартным Cr-Ni аустенитным сталям с 18 – 24 % Ni. Установлено, что такие стали с содержанием 3 – 7 % Ni за жаропрочностью, жаростойкостью, термостойкостью при температурах эксплуатации не уступают, а в некоторых случаях превышают стандартные Cr-Ni стали.

Ключевые слова: жаропрочные и жаростойкие стали, никель, дисперсионное упрочнение, термостойкость, легирование.

S. Ya. Shypytsyn, P. M. Kucherenko, I. F. Kirchu, T. V. Stepanova

Mechanical and functional properties of Cr-(Ni)-Mn-N austenitic heat-resistant steels

Summary

Research have shown that by optimizing the ratio of the base elements Cr, Mn, Ni, Si and strengthening due to the dispersion phase of VN and dispersed TiN, it is possible to create low-nickel Cr-Mn-Ni austenitic steels, as analogues to standard Cr-Ni austenitic steels with 18 – 24 % Ni.

These steels with 3 – 7 % Ni content are not inferior in heat resistance at operating temperatures, and in some cases exceed the standard Cr-Ni steels.

Keywords: heat resistant steels, nickel, dispersion hardening, alloying.