

Вплив вуглецю на кінетику перетворення переохолодженого аустеніту в дифузійній і проміжній областях

О. М. Савицький, кандидат технічних наук
Ю. М. Шкрабалюк

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ

Досліджено вплив вуглецю та легуючих елементів на тривалість перетворення переохолодженого аустеніту в дифузійній і проміжній областях. В ізотермічних умовах збільшення вмісту вуглецю в сталях прискорює дифузійне та уповільнює проміжне перетворення переохолодженого аустеніту. Легуючі елементи лише посилюють чи послаблюють цю тенденцію. При переході до безперервного охолодження обидва типи перетворення прискорюються в міру збільшення вмісту вуглецю в сталі, що дозволяє ініціювати перетворення аустеніту або його частини в проміжній і дифузійній областях та керувати кінетикою формування структури металу і його властивостей при локальному термічному впливі.

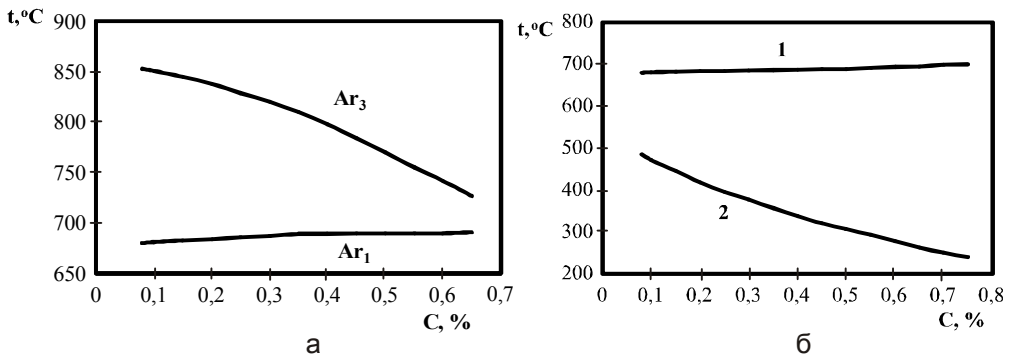
Досвід, накопичений в галузі металознавства і термічної обробки, свідчить, що вуглець визначає кінетику структурних перетворень при нагріві та охолодженні вуглецевих сталей [1, 2]. Збільшення його вмісту в сталях супроводжується підвищенням стійкості аустеніту при переохолодженні, зміщенням його перетворення в область більш низьких температур та збільшенням періоду інертності (інкубаційного періоду) перетворення. Легуючі елементи посилюють чи послаблюють цей вплив [2 – 4].

При традиційних методах термічної обробки сталей, які забезпечують можливість регулювання умов їх нагріву та охолодження в широких межах, такий вплив вуглецю на перетворення переохолодженого аустеніту не створює значних труднощів. Але існують методи із застосуванням локального термічного впливу – зварювання, місцеві плазмова та дугова обробка, при яких вказані можливості обмежені. З точки зору цих процесів традиційний вплив вуглецю на кінетику перетворення аустеніту при охолодженні розглядається як негативний, тому що спричиняє гартування металу та утворення в ньому тріщин.

Однак, результати досліджень свідчать [2 – 4], що вплив вуглецю на кінетику перетворення переохолодженого аустеніту неоднозначний. З точки зору локальних термічних процесів, вуглець може справляти як негативний так і позитивний вплив на кінетику структурних перетворень при охолодженні металу.

Тому метою даної роботи було визначення особливостей впливу вуглецю та легуючих елементів на кінетику перетворення переохолодженого аустеніту в різних умовах.

Аналіз результатів власних досліджень та даних робіт [5, 6] свідчить, що в умовах, близьких до ізотермічних, зі зростанням кількості вуглецю в сталі температура початку дифузійного перетворення (Ar_3) поступово знижується (рисунок а), а температура кінця перетворення (Ar_1) – зростає в міру збільшення вмісту вуглецю в сталі. Тобто температурний інтервал дифузійного перетворення переохолодженого аустеніту ($Ar_3 - Ar_1$) скорочується, що свідчить про те, що в міру збільшення вмісту вуглецю дифузійне перетворення переохолодженого аустеніту прискорюється.



Вплив вуглецю на температури початку (Ar_3) і кінця (Ar_1) дифузійного перетворення (а) і температури початку (1) і кінця (2) проміжного перетворення (б) переохолодженого аустеніту.

Результати проведеного аналізу підтверджують і результати подальших досліджень (табл. 1), виконаних з врахуванням ізотермічних та термокінетичних діаграм [7]. Ці дані свідчать, що в ізотермічних умовах підвищення вмісту вуглецю в сталях супроводжується скороченням тривалості перетворення.

Прикладом цього є сталі 35, 45 та 55 (табл. 1). Зростання вмісту вуглецю в них від 0,36 % до 0,55 % супроводжується скороченням тривалості дифузійного перетворення при температурі 700 °С в 50 разів. При зниженні температури перетворення ця різниця скорочується, але не зникає.

Аналогічна закономірність проявляється і при порівнянні вуглецевих легованих сталей 30Г та 65Г, 30Х та 45Х, 35ХГ2 та 50ХГ2 (табл. 1), а також інших вуглецевих нелегованих і легованих сталей. За однакових або близьких умов нагріву і охолодження підвищення вмісту вуглецю в сталях прискорює протікання дифузійного перетворення переохолодженого аустеніту. Ці дані повністю корелюють з результатами досліджень В. Д. Садовського і М. Х. Шорошорова [2, 3].

Механізм подібного впливу вуглецю проявляється в утворенні надлишкових фаз, які є центрами зародження нової фази, в даному випадку перліту. Такими надлишковими фазами у вуглецевих сталях є карбід заліза (цементит), кількість якого зростає в міру збільшення процентного вмісту вуглецю [2, 3].

Фазові перетворення

Таблиця 1

Вплив вуглецю та легуючих елементів-карбідоутворювачів на тривалість дифузійного перетворення переохолодженого аустеніту у вуглецевих сталях

Марка сталі	C, %	Cr, %	Mo, %	V, %	Mn, %	t _{max} , °C	Температура перетворення, °C	Тривалість перетворення, с
Сталь 35	0,36	0,21	-	-	-	850	700	49989
							650	270
							600	48
							550	21
							500	19,2
Сталь 45	0,45	0,05	-	-	-	850	700	2995
							650	198
							600	19
							550	9,2
							500	5,3
Сталь 55	0,55	-	-	-	-	870	700	998,3
							600	7
							550	1,2
30Г	0,28	-	-	-	1,21	840	650	1997
							600	109
65Г	0,64	-	-	-	1,13	840	650	90
							600	17,5
30Х	0,32	1,08	0,02	-	-	850	700	3990
							600	598,8
45Х	0,44	1,04	-	-	-	840	700	987
							650	90
							600	380
35ХГ2	0,39					825	700	6993
							600	109
50ХГ2	0,48					825	700	2980
							600	97,9
35Х	0,35	1,11	-	-		850	700	49989
							650	270
35ХМ	0,38	0,99	0,16	-		860	700	988
							650	205
45Х2Ф	0,44	1,7	-	0,09		850	700	165
							650	178

Підтверджують це також і дані табл. 1, які свідчать, що в міру збільшення в сталі вмісту легуючих елементів-карбідоутворювачів дифузійне перетворення в них прискорюється. Прикладом є сталі 35, 35Х, 35ХМ та 45,

45X, 45X2Ф. Температури дифузійного перетворення для обох випадків 700 °С та 650 °С. Причина в тому, що карбіди є зародками перлітної фази і, чим їх більше, тим інтенсивніше протікає перетворення аустеніту.

Однак, слід відзначити, що рівень гомогенності аустеніту визначає тривалість періоду інертності перетворення. Крім цього згідно [3] зародками нової фази є карбіди і цементит, що не розчинились при нагріві металу, тобто є залишком первинної структури. У випадку, якщо карбіди розчиняться, а аустеніт гомогенізується, вуглець і легуючі елементи чинять традиційний вплив.

Криві на рисунку 6 свідчать, що в умовах, близьких до ізотермічних, підвищення вмісту вуглецю в сталях супроводжується розширенням температурного інтервалу проміжного перетворення, як в область високих, так і в область низьких температур. Це свідчить про те, що з підвищенням вмісту вуглецю в сталі проміжне перетворення переохолодженого аустеніту уповільнюється. Результати досліджень, наведені в табл. 2, підтверджують, що зростання кількості вуглецю в сталі супроводжується збільшенням тривалості перетворення переохолодженого аустеніту в проміжній (бейнітній) області.

Прикладом є сталі 35 та У8. Збільшення вмісту вуглецю в них від 0,36 % до 0,78 % супроводжується збільшенням тривалості проміжного перетворення при температурі 400 °С більше, ніж у 4 рази (табл. 2). При зменшенні температури перетворення до 370 °С його тривалість для обох сталей збільшується, а різниця між ними, хоча і зменшується, однак майже досягає 4 разів.

Аналогічна закономірність проявляється і при порівнянні сталей 35 та 50, а також інших вуглецевих і легованих сталей (табл. 2). Легуючі елементи, які не утворюють карбідів, лише посилюють вказану тенденцію та сприяють подальшому уповільненню проміжного перетворення. Приклад – сталі 50Г і 50 (табл. 2). Проміжне перетворення в сталі 50Г при температурах 450 °С та 350 °С триває відповідно в 1,9 та 1,5 рази довше, ніж в сталі 50.

Вплив елементів-карбідоутворювачів ще інтенсивніший. Прикладом є сталі 45, 45X та 45X2Ф (табл. 2). Наявність в сталі хрому та ванадію призводить до того, що тривалість проміжного перетворення при температурі 450 °С в сталі 45X збільшується майже у 321 разів, а в сталі 45X2Ф – у 6444 рази порівняно зі сталлю 45. І хоча при зниженні температури перетворення до 400 °С тривалість проміжного перетворення в легованих сталях скорочується, однак вона значно перевищує тривалість перетворення в нелегованій сталі.

Аналогічна тенденція має місце в сталях 35, 35X і 35XM (табл. 2) та інших, легованих елементами-карбідоутворювачами. Вони посилюють вплив вуглецю, але, при цьому в міру зниження температури, поступово прискорюють протікання бейнітного перетворення.

Виявити характер впливу вуглецю та легуючих елементів на дифузійне і проміжне перетворення в умовах безперервного охолодження дозволяють результати досліджень, наведені в табл. 3. Вони свідчать про те, що аналогічно до ізотермічних умов, підвищення вмісту вуглецю в сталі прискорює дифузійне перетворення переохолодженого аустеніту. Прикладом є сталі 35X і 45X та 20XM і 35XM (табл. 3). В першому випадку підвищення вмісту вуглецю

Фазові перетворення

Таблиця 2

Вплив вуглецю на тривалість проміжного перетворення у вуглецевих сталях

Марка сталі	Вміст легуючих елементів, % (по масі)						t_{\max} , °C	Температура перетворення, °C	Тривалість перетворення, с
	C	Cr	Mn	Mo	Ni	V			
Сталь 35	0,36	-	-	-	-	-	850	400	23
								370	50
У8	0,78	-	-	-	-	-	840	400	97
								370	190
Сталь 35	0,36	-	-	-	-	-	825	400	3
								370	4
Сталь 50	0,53	-	-	-	-	-	825	400	60
								370	91
Сталь 35	0,36	0,21	-	-	-	-	850	450	18
								400	23
35Х	0,35	1,11	-	-	-	-	850	450	320
								400	208
35ХМ	0,37	1,00	-	0,18	-	-	850	450	99997
								400	3998
Сталь 50	0,53	-	0,32	-	-	-	900	450	10
								400	43
50Г	0,50	-	0,91	-	-	-	900	450	19
								400	45
30Г	0,33	-	1,12	-	-	-	850	400	69
30Г2	0,33	-	1,54	-	-	-	860	400	108
Сталь 45	0,45	0,05	-	-	-	-	850	400	3,1
								450	3,8
45Х	0,44	1,04	-	-	-	-	850	400	994
								450	489
45Х2Ф	0,44	1,07	-	-	-	0,09	850	400	19979
								450	5980

скорочує тривалість дифузійного перетворення в інтервалі температур 700 – 600 °C більше, ніж у 2 рази, а в другому – майже в 3 рази.

Характер впливу легуючих елементів-карбідоутворювачів на тривалість дифузійного перетворення переохолодженого аустеніту демонструють сталі 45 і 45Х, 35Х і 35ХМ (табл. 3). Вони свідчать, що вказані елементи також прискорюють протікання дифузійного перетворення. Інші легуючі елементи, які не утворюють стійких карбідів, уповільнюють дифузійне перетворення, про що свідчать результати порівняння сталей 35Х, 35ХМ і 35ГС (табл. 3).

Таким чином за умов безперервного охолодження подібно до ізотермічних умов вуглець і легуючі елементи-карбідоутворювачі прискорюють

Фазові перетворення

Таблиця 3

Вплив вуглецю і легуючих елементів на кінетику перетворення переохолодженого аустеніту в дифузійній і проміжній областях

Марка сталі	Тип перетворення	t_{\max} , °C	Температурний інтервал перетворення, °C	Тривалість перетворення, с
35X	дифузійне	1050	700 – 600	470
	проміжне	1050	500 – 300	1287
45X	дифузійне	1050	700 – 600	200
	проміжне	1050	500 – 300	877
20XM	дифузійне	1050	700 – 600	1100
	проміжне	1050	550 – 400	5997
35XM	дифузійне	1050	700 – 600	400
	проміжне	1050	550 – 400	1179
Сталь 45	дифузійне	1050	700 – 680	9940
	проміжне	1050	500 – 350	35
45X	дифузійне	1050	700 – 680	3800
	проміжне	1050	550 – 350	777
35X	дифузійне	1050	700 – 650	800
	проміжне	1050	500 – 400	988
35XM	дифузійне	1050	700 – 650	700
	проміжне	1050	500 – 400	1193
35ГС	дифузійне	1050	700 – 650	2930
	проміжне	1050	500 – 400	100

перетворення аустеніту при охолодженні, а елементи, які не утворюють карбідів, уповільнюють його.

На відміну від ізотермічних умов при безперервному охолодженні підвищення вмісту вуглецю в сталі прискорює і проміжне перетворення. Прикладом є сталі 35X і 45X, а також 20XM і 35XM (табл. 3). Збільшення вмісту вуглецю призводить до зменшення тривалості проміжного перетворення і в першому і в другому випадках.

Усі інші легуючі елементи, як свідчать дані табл. 3, уповільнюють проміжне перетворення при безперервному охолодженні.

Вплив вуглецю і легуючих елементів на бездифузійне перетворення вивчено глибоко і ґрунтовно. Збільшення вмісту вуглецю та легуючих елементів в сталях завжди зміщує бездифузійне перетворення в область більш низьких температур [1, 2]. А при локальних термічних процесах – зварюванні, плазмовій та дуговій обробці у більшості випадків прагнуть запобігти розвитку бездифузійного перетворення, якщо не постає задача гартування металу.

Прискорення дифузійного і проміжного перетворень при безперервному охолодженні, обумовлене збільшенням вмісту вуглецю в сталях, надзвичайно важливе для технологічних процесів, заснованих на локальному термічному

впливові тому, що дозволяє ініціювати перетворення переохолодженого аустеніту, або значної його частини, в проміжній і навіть дифузійній областях, та керувати кінетикою формування структури і властивостей металу. Для цього необхідно обмежити розвиток гомогенізації аустеніту і відповідно скоротити період інертності перетворення, що реалізовано в роботах [8 – 11] за рахунок швидкісних нагрівів та поєднання їх із термоцикуванням.

Таким чином результати досліджень свідчать, що збільшення вмісту вуглецю в сталях прискорює дифузійне перетворення та гальмує протікання проміжного перетворення переохолодженого аустеніту в ізотермічних умовах. При переході до умов безперервного охолодження обидва типи перетворення прискорюються в міру зростання вмісту вуглецю в сталі.

Вказаний характер впливу вуглецю на кінетику структурних перетворень в умовах безперервного охолодження забезпечує реалізацію керування кінетикою структуроутворення в сталях при методах його обробки, заснованих на локальному термічному впливі.

Література

1. Гуляев А.П. *Металловедение*. – М.: Металлургия, 1966. – 680 с.
2. Садовский В.Д. *Структурные превращения при закалке и отпуске конструкционных сталей*. – Свердловск: УФ АН СССР, 1945. – 72 с.
3. Шоршоров М.Х. *Металловедение сварки стали и сплавов титана*. – М.: Наука, 1965. – 236 с.
4. Шоршоров М.Х., Белов В.В. *Фазовые превращения и изменения свойств стали при сварке*. – М.: Наука, 1972. – 220 с.
5. *Марочник стали для машиностроения*. – М.: НИИИМ, 1968. – 600 с.
6. *Марочник сталей и сплавов* / Под ред. В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
7. Попов А.А., Попова А.Е. *Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита: Справ.* – М.: Машгиз, 1961. – 432 с.
8. Савицький О. М. Керування структуроутворенням у вуглецевих сталях при локальному термічному впливі // *Металознавство та обробка металів*. – 2006. – № 3. – С. 13 – 18.
9. Савицький О.М., Ващенко В.М., Шкрабальюк Ю.М. Особливості впливу швидкостей нагріву і охолодження на структуру вуглецевих сталей при локальній термічній дії // *Металознавство та обробка матеріалів*. – 2011. – № 3. – С. 26 – 31.
10. Савицький А.М., Савицький М.М., Новикова Д.П. Влияние скорости сварки и длительности периодического охлаждения на формирование структуры сварных соединений закаливающихся сталей при дуговой сварке с термоциклированием // *Автоматическая сварка*. – 2004. – № 8. – С. 41 – 45.
11. Савицький А.М., Васильев В.Г., Савицький М.М. Влияние стадии нагрева на формирование структуры сварных соединений закаливающихся сталей // *Автоматическая сварка*. – 2005. – № 1. – С. 19 – 21.

Одержано 17.09.13

А. М. Савицкий, Ю. Н. Шкрабальюк

Влияние углерода на кинетику превращения переохлажденного аустенита в диффузионной и промежуточной областях

Резюме

Изложены результаты исследования влияния углерода и легирующих элементов на длительность превращения переохлажденного аустенита в диффузионной и промежуточной областях. В изотермических условиях увеличение содержания углерода в сталях ускоряет диффузионное и замедляет промежуточное превращение переохлажденного аустенита. Легирующие элементы лишь усиливают, или ослабляют эту тенденцию. При переходе к непрерывному охлаждению оба типа превращения ускоряются по мере увеличения содержания углерода в стали, что позволяет инициировать превращение аустенита, или его части, в промежуточной и диффузионной областях и управлять кинетикой формирования структуры металла и его свойств при локальном термическом воздействии на него.

O. M. Savitsky, Yu. N. Shkrabalyuk

Features of the influence of carbon on the kinetics of the transformation of supercooled austenite in the diffusion and the intermediate areas

Summary

The results of study of the effect of carbon and alloying elements on the duration of the transformation of supercooled austenite in the diffusion and the intermediate areas. Under isothermal conditions, the increase of carbon content in steels accelerates diffusion and slows the intermediate transformation of supercooled austenite. Alloying elements only strengthen or weaken this tendency. In the transition to the continuous cooling transformation both types are accelerated by increasing the carbon content in steel, which allows to initiate the transformation of austenite or its part in the intermediate areas and the diffusion kinetics of the formation and control of metal structures and properties at the local thermal impact.