

УДК 621.789.; 621.791.58

## Вплив високих швидкостей нагріву на температурний інтервал гомогенізації аустеніту і ріст зерна у вуглецевих сталях

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

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

*Викладено результати дослідження впливу швидкостей нагріву на аустенітизацію, гомогенізацію і кінетику росту аустенітного зерна у вуглецевих сталях. Показано, що при швидкісному нагріві температурний інтервал  $A_{c1} - A_{c3}$  розширюється і зміщується в область високих температур. В результаті частина аустенітних зерен зароджується після перевищення температури  $A_{c1}$ , інша – в середині інтервалу  $A_{c1} - A_{c3}$ , третя – ближче до температури  $A_{c3}$ . Із збільшенням швидкості нагріву ця тенденція посилюється. Тому початком розвитку процесів гомогенізації аустеніту, росту зерна і, відповідно, початком формування структури є перевищення температури  $A_{c1}$ .*

Результати досліджень, наведені в роботах [1 – 4] свідчать, що одним із факторів, за рахунок якого можна керувати кінетикою формування структури є рівень гомогенності аустеніту. Чим він вищий, тим вища стійкість аустеніту при охолодженні і, відповідно, тим тривалішим є інкубаційний період перетворення [5]. Традиційно температурним інтервалом гомогенізації аустеніту вважаються температури вище  $A_{c3}$ , де відбувається перерозподіл надлишкових фаз і ріст аустенітних зерен [5]. Рівень гомогенності аустеніту і розміри його зерен залежить від температури перегріву вище  $A_{c3}$  і тривалості перебування металу при цих температурах.

При традиційній термічній обробці для контролю над процесами гомогенізації і зростання аустенітного зерна обмежують максимальну температуру нагріву, яка в залежності від вмісту вуглецю в сталі перевищує  $A_{c3}$  не більше, ніж на 30 °С – 50 °С, і обмежують тривалість перебування металу при вказаних температурах. Це дозволяє з високою точністю контролювати гомогенізацію аустеніту і розміри його зерен.

Однак існують методи, засновані на локальному термічному впливі на метал, такі як дугове зварювання та дугова обробка, при яких тепловий стан металу визначає погонна енергія, що представляє собою відношення теплової потужності джерела нагріву  $q$  до швидкості його переміщення  $V$ , тобто  $q/V$ . При цих методах контролювати температуру перегріву неможливо. Максимальна температура нагріву біляшовної зони досягає значень, близьких до температури плавлення металу. А рівень гомогенності аустеніту визначається

## Фазові перетворення

тривалістю перебування металу у температурному інтервалі гомогенізації і росту зерна.

Тому задачею даної роботи було визначити температурний поріг, після якого починається гомогенізація аустеніту і ріст зерна у вуглецевих сталях при локальному термічному впливові на метал.

Крім максимальних температур, локальні термічні процеси відрізняються від традиційної термообробки ще й швидкостями нагріву металу. В печах швидкості нагріву не перевищують кількох градусів за секунду (табл. 1). При локальному нагріві металу в залежності від погонної енергії вони досягають десятків і сотень градусів за секунду (табл. 1). Якщо при цьому застосовуються ще й такі технологічні прийоми, як термоцикування і активація дуги, то швидкості нагріву можуть досягати кількох тисяч градусів за секунду [6 – 8].

Таблиця 1

Вплив способу нагріву на швидкості нагріву металу

Спосіб нагріву	Спосіб зварювання	$T_{max},$ °C	$q/V_{зв.},$ Дж/см	I, А	U, В	$V_{зв.},$ м/год	$V_{н.},$ °C/с
В печі типу СНОЛ з об'ємом робочого простору не більше 0,0144 м <sup>3</sup>	-	850	-	-	-	-	0,9
Зварювальний	Механізоване плавким електродом в захисному газі	1400	25000	550	40 – 42	25	306
		1380	16071	300	30	15	597
		1360	14571	340	32	20	720
		1390	8571	250	27	15	1060

Ці відмінності неминуче повинні позначитися на особливостях аустенітизації, гомогенізації і кінетиці росту аустенітного зерна. Про зазначені відмінності можна судити, перш за все, за розмірами вторинного аустенітного зерна. При пічному нагріві металу через малі швидкості підвищення температури, обмеження максимальної температури і рівномірність нагріву по всьому об'єму печі аустенітні зерна приблизно однакові за розмірами і, як правило, дрібні.

При локальних термічних процесах, наприклад при зварюванні, ніколи зерна не бувають однаковими за розмірами. Завжди на ряду з відносно великими зернами присутній певний відсоток більш дрібних і різниця їх розмірів може коливатися в досить широких межах. В табл. 2 наведені результати металографічних досліджень біляшовної зони зварних з'єднань сталі М72 (0,8 % С), які дозволяють оцінити вплив швидкостей нагріву на фазовий склад металу та розміри зерен.

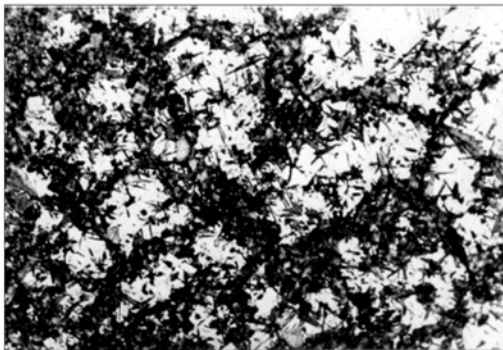
У відповідності до цих даних нагрів із швидкістю 875 °C/с створює умови для формування в металі мартенситно-трооститної структур (рис. 1 а).

## Фазові перетворення

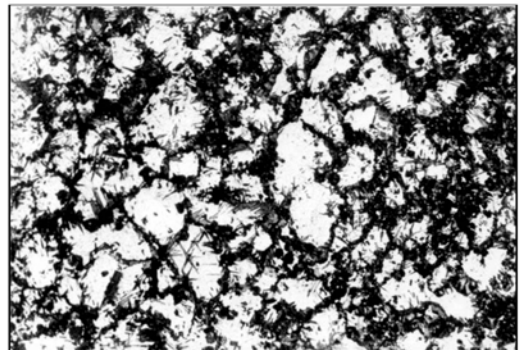
Таблиця 2

Розміри зерна в біляшовній зоні зварних з'єднань сталі М72

Ділянка	Фазовий склад ділянки перегріву ЗТВ	Бал аустенітного зерна згідно ГОСТ 5639-82	Швидкість нагріву металу, °С/с
1	мартенсит	3	875
	троостит	4	
2	мартенсит	4	1055
	троостит	5	
3	бейніт	3	1225
	бейніт	5	
4	бейніт	6 – 7	1350
	троостит	8	
	перліт	9	
5	бейніт	7	1512
	троостит	8 – 9	
	перліт	10 – 11	



а



б

Рис. 1. Мартенситно-трооститна структура металу (сталь М72). а – швидкість нагріву 875 °С/с, б – швидкість нагріву 1055 °С/с. х 200.

Причому більш крупні зерна 3 балу мають мартенситну структуру, а дрібніші (4 бал) – трооститну. Аналогічно і для швидкості нагріву 1055 °С/с (рис. 1 б). Але в цьому випадку зерна дрібніші – мартенсит – 4 бал; троостит – 5 бал (табл. 2), та мікротвердість структурних складових нижча, ніж у попередньому випадку.

Підвищення швидкості нагріву до 1225 °С/с ініціює формування в металі біляшовної зони бейнітної структури (рис. 2). Розміри зерен коливаються в межах 3 – 5 балів і в міру їх зменшення знижується і мікротвердість бейніту.

Швидкість нагріву 1350 °С/с створює умови для формування в металі змішаної більш дрібнозернистої (6 – 9 бал) структури: приблизно 60 % бейніту

## Фазові перетворення

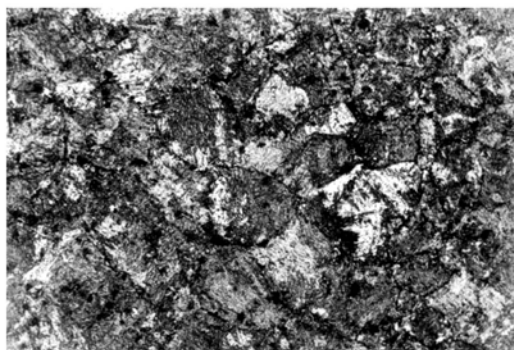
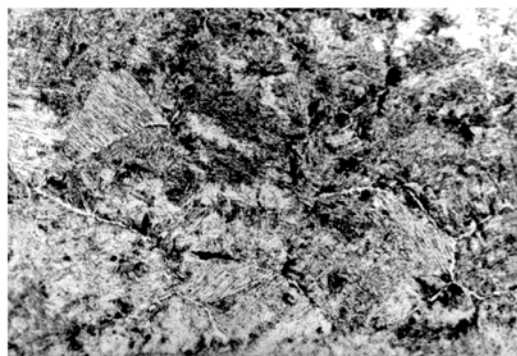


Рис. 2. Бейнітна структура металу (сталь М72). Швидкість нагріву 1225 °С/с. х 240.

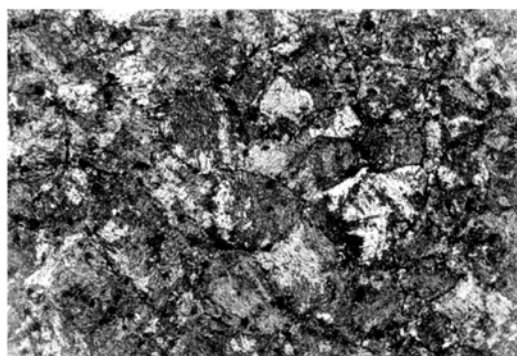
складова зменшилася до 25 % порівняно із попереднім випадком. Великі зерна (7 бал), мають бейнітну структуру. У зернах 8 – 9 балів утворилася головним чином трооститна структура. Зерна 10 – 11 балів мають перлітну структуру.

і 40 % трооститу та перліту (рис. 3 а). Бейнітна мікроструктура характерна для зерен 6 – 7 балів. Зерна з розмірами 8 балу мають трооститну структуру. Перліт утворився в основному в дрібних зернах – 9 балу.

Підвищення швидкості нагріву до 1512 °С/с привело до утворення в металі дрібнозернистої (7 – 11 бал) змішаної структури: бейніт – троостит – перліт (рис. 3 б). Вміст перліту і трооститу збільшився приблизно до 75 %, а бейнітна



а



б

Рис. 3. Мікроструктура металу. а – швидкість нагріву 1350 °С/с, б – швидкість нагріву 1512 °С/с. х 400.

Аналіз даних, наведених в табл. 2, свідчить, що підвищення швидкостей нагріву ініціює подрібнення зерна і зміщення перетворення переохолодженого аустеніту в область більш високих температур з формуванням в металі відповідних структур.

Крім цього, поступово по мірі зростання швидкостей нагріву збільшується різниця між мінімальними і максимальними розмірами зерен для кожного конкретного випадку.

На рис. 4 наведена усереднена залежність температур  $A_{c1}$  і  $A_{c3}$  від швидкостей нагріву для вуглецевих сталей. Вона свідчить, що в міру збільшення швидкості нагріву металу температури критичних точок  $A_{c1}$  і  $A_{c3}$  поступово зростають, а температурний інтервал  $A_{c1} - A_{c3}$  розширюється за рахунок більш інтенсивного збільшення температури  $A_{c3}$ . Чим вищий вміст вуглецю в сталі, тим більша різниця між температурами його верхньої і нижньої межі.

Ці дані досить добре корелюють з даними М. Х. Шоршорова, В. Н. Гриднева [1, 2], що проводили подібні дослідження при термообробці сталей.

Порівняння даних, наведених в табл. 2 та рис. 4, дозволяє встановити наступну залежність. По мірі підвищення швидкості нагріву і температур  $A_{c1}$ ,  $A_{c3}$  та розширення міжкритичного інтервалу відбувається поступове подрібнення зерен з одночасним збільшенням різниці між максимальними і мінімальними їх розмірами для кожного конкретного випадку.

При швидкості нагріву  $875 - 1055 \text{ }^\circ\text{C}/\text{c}$  розміри зерен відповідають 3 – 4 балу. Різниця між ними складає всього 1 бал. А підвищення швидкості нагріву металу до  $1512 \text{ }^\circ\text{C}/\text{c}$  створює умови для подрібнення зерен до 7 – 11 балів, різниця в розмірах досягає вже 5 балів.

Результати аналізу даних табл. 2 і рис. 4 свідчать про те, що підвищення швидкості нагріву металу супроводжується рядом явищ. Зростають температури критичних точок  $A_{c1}$  і  $A_{c3}$ . Температурний інтервал аустенізації, обмежений ними, розширюється за рахунок більш інтенсивного зростання температури  $A_{c3}$ . Розпад переохолодженого аустеніту поступово зміщується в область більш високих температур. Механізм цього явища викладено в роботах [3, 4]. Аустенітні зерна подрібнюються, а різниця в їх розмірах збільшується.

Це свідчить про те, що аустенітні зерна зароджуються в різний час. Одна частина зерен зароджується відразу після перевищення температури  $A_{c1}$ , інша – в проміжку температур  $A_{c1} - A_{c3}$ . Третя частина – ближче до температури  $A_{c3}$ .

Зерна, які зароджуються після перевищення температури  $A_{c1}$ , мають найбільші розміри і структуру, яка є результатом розпаду аустеніту при найнижчих для конкретного випадку температурах. Тобто аустеніт, який в них утворився, має найбільшу стійкість при переохолодженні. Відповідно його перебування при температурах гомогенізації і росту зерна було найтривалішим.

Зерна, які зароджуються в проміжку температур  $A_{c1} - A_{c3}$ , мають середні розміри. Їх мікроструктура є наслідком розпаду аустеніту при більш високих, ніж у попередньому випадку, температурах. Це свідчить про те, що даний аустеніт має меншу стійкість при переохолодженні. Отже, він перебував при температурах гомогенізації і росту зерна менше.

Мінімальні розміри мають аустенітні зерна, що зароджуються поблизу температури  $A_{c3}$ . Аустеніт, який утворився в них, має найнижчу стійкість

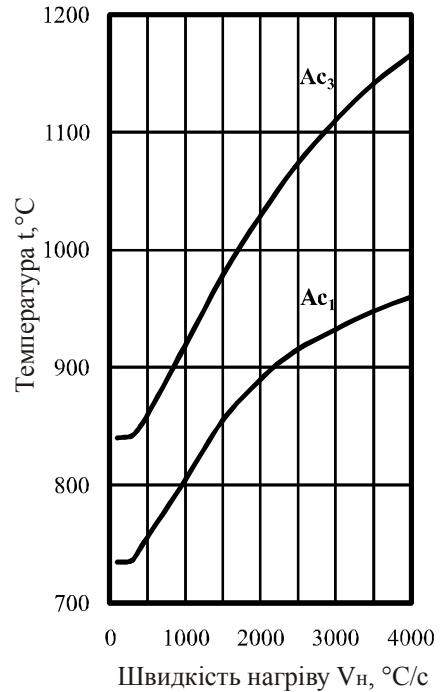


Рис. 4. Область росту температур критичних точок  $A_{c1}$  і  $A_{c3}$  в залежності від швидкості нагріву металу для сталей з вмістом вуглецю 0,2 – 0,8 %.

при переохолодженні і, отже, мінімальний рівень гомогенності. Про це свідчить те, що продуктом його розпаду є мікроструктура, що утворюється при максимальних для кожного конкретного випадку температурах. Це означає, що тривалість перебування такого аустеніту в температурному інтервалі гомогенізації і зростання зерна була мінімальною. Найбільші аустенітні зерна в структурі металу утворюються одразу після перевищення температури  $A_{c1}$ . Перебування цих аустенітних зерен при температурах гомогенізації і росту зерна найтриваліше. Середній рівень гомогенності і розміри зерна має аустеніт, що утворився в середній частині температурного інтервалу  $A_{c1} - A_{c3}$ . А мінімальні стійкість і розміри зерна має аустеніт, що утворився поблизу верхньої межі –  $A_{c3}$ .

Наведені вище дані та результати їх аналізу розходяться з традиційними для термічної обробки поглядами, які пов'язували початок інтенсивного росту зерна і гомогенізації аустеніту з температурним порогом  $A_{c3}$ . Це пояснюється різницею в швидкостях нагріву при традиційній термообробці і швидкісних локальних термічних процесах, що показано вище.

Таким чином, на підставі результатів експериментів і їх аналізу, початком розвитку процесів гомогенізації аустеніту, росту зерна і, відповідно, початком формування структури [3, 4] металу при швидкісних термічних процесах слід вважати не момент перевищення температури  $A_{c3}$ , а момент перевищення температури  $A_{c1}$ , коли утворюються перші аустенітні зерна. І чим вище швидкості нагріву металу, тим більше ця тенденція проявляється.

Крім цього, збільшення швидкостей нагріву є одним зі способів зниження рівня гомогенності аустеніту і реалізації його керованого розпаду на стадії охолодження.

## Література

1. Шоршоров М.Х., Смирнов Б.А., Белов В.В. Об особенностях превращения аустенита при сварке плавлением // Сварочное производство. – 1959. – № 11. – С. 12 – 15.
2. Гриднев В.Н., Мешков Ю.Я., Ошкадеров С.П. Физические основы электротермического упрочнения стали. – Киев: Наук. думка, 1973. – 336 с.
3. Савицкий А.М., Васильев В.Г., Савицкий М.М. Влияние стадии нагрева на формирование структуры сварных соединений закаливающихся сталей // Автоматическая сварка. – 2005. – № 1. – С. 19 – 21.
4. Савицкий О.М. Вплив швидкісних нагрівів на структуру вуглецевих сталей при локальній термічній дії // Металознавство та обробка металів. – 2005. – № 4. – С. 33 – 35.
5. Гуляев А.П. Металловедение. – М.: Металлургия, 1966. – 680 с.
6. Дудко Д.А., Савицкий А.М., Васильев В.Г. Особенности структуры и свойств в сварных соединениях, формируемых с термоциклированием // Автоматическая сварка. – 1996. – № 2. – С. 6 – 7.
7. Дудко Д.А., Савицкий А.М., Савицкий М.М. Особенности тепловых процессов при сварке с термоциклированием // Автоматическая сварка. – 1998. – № 4. – С. 8 – 12.

8. Niagaj J., Savytskyj M.M., Savytskyj O.M. The influence of activation on technological and ecological properties of welding arc under argon shield during welding of low- and high alloy steels // Biuletyn instytutu spawalnictwa w gliwicach. – 2008. – № 1. – P. 46 – 50.

Одержано 23.04.13

**А. М. Савицкий, Ю. Н. Шкрабалюк**

### **Влияние высоких скоростей нагрева на температурный интервал гомогенизации аустенита и роста зерна в углеродистых сталях**

#### **Резюме**

Изложены результаты исследования влияния скоростей нагрева на аустенитизацию, гомогенизацию и кинетику роста аустенитного зерна в углеродистых сталях. Показано, что при скоростном нагреве температурный интервал  $Ac_1 - Ac_3$  расширяется и смещается в область высоких температур. В результате часть аустенитных зерен зарождается после превышения температуры  $Ac_1$ , другая – в средние интервала  $Ac_1 - Ac_3$ , третья – ближе к температуре  $Ac_3$ . С увеличением скорости нагрева эта тенденция усиливается. Поэтому началом развития процессов гомогенизации аустенита, роста зерна и, соответственно, началом формирования структуры является превышение температуры  $Ac_1$ .

**O. M. Savitskyi, Yu. N. Shkrabalyuk**

### **The effect of high heating rates on homogenization temperature range of austenite and secondary grain growth in carbon steels**

#### **Summary**

The results of studies of the effect of heating rates on austenitization, homogenization and growth kinetics of austenite grains in carbon steels are presented. It is shown that the rapid heating temperature range of  $Ac_1 - Ac_3$  shifts and expands to higher temperatures. As a result, part of the austenite grains nucleate after overtemperature  $Ac_1$ , the other – in the middle of the  $Ac_1 - Ac_3$  interval, and the third – close to the  $Ac_3$  temperature. With increasing heating rate the trend increases. Therefore the beginning of the development process of homogenization of austenite grain growth and, therefore, the beginning of the formation of the structure is the excess of  $Ac_1$  temperature.