

УДК 669.15-194.53:669.15-784-194

**Е. В. Парусов, к. т. н.; В. В. Парусов, д. т. н., проф.; Л. В. Сагура, к. т. н.;  
І. М. Чуйко, к. т. н.**

## **МЕХАНІЗМ ПЕРЛІТНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ У ВУГЛЕЦЕВІЙ СТАЛІ**

*Описано дислокаційний механізм перлітного перетворення у вуглецевій сталі. Генезис пластинчатого перліту визначається плоскополігональними стінками з дислокацій, які утворюються за термопластичної деформації, зумовленої процесом охолодження аустеніту. Показано, що кристалізація пластинчатого перліту відбувається, у першу чергу, за рахунок поздовжнього зростання пластинчатих зародків цементиту, а в другу чергу, – за рахунок поперечної кристалізації пластин цементиту і фериту, яка, ймовірно, протікає за механізмом роздільної кристалізації пластин цементиту і фериту за рахунок перенесення вуглецю від аустеніту до цементиту через феритні пластини в межах міжпластиночної відстані.*

**Ключові слова:** перлітне перетворення, дислокаційний механізм, вуглецева сталь.

Існує багато теорій утворення перліту [1]. Слід зазначити, що переважно ці теорії містять фізико-математичні моделі процесів перлітового перетворення аустеніту в сталі.

Необхідно підкреслити, що перліт є бікристалом [1], що складається з кристалів фериту і цементиту, проте механізм утворення пластинчастого перліту вивчений на сьогодні недостатньо повно.

Відомий дислокаційний механізм утворення перліту [2, 3]. Пластинчаста морфологія цементиту і фериту в перліті зумовлена такими особливостями механізму перетворення: термопластичною деформацією переохолодженого аустеніту, зумовленою процесом його охолодження, і утворенням полігонізованої структури у вигляді плоских дислокаційних стінок, перпендикулярних площинам легкого ковзання; регулярним розташуванням (відстанню) в аустеніті плоских дислокаційних стінок, яке визначається термодинамікою процесу і тим менше, чим більше переохолодження аустеніту; пружною взаємодією дислокацій, що становлять плоскі стінки, з атомами вуглецю і утворенням унаслідок цього плоских зародків цементиту.

Згідно з [4] залежність міжпластиночної відстані в перліті від ступеня переохолодження підпорядковується параболічному закону, згідно з яким найбільші значення міжпластиночної відстані в перліті відповідають малим переохолодженням, а найменші – великим переохолодженням, тобто швидкість зміни міжпластиночної відстані зменшується зі збільшенням переохолодження. Із підвищенням швидкості охолодження аустеніту за температур нижчих  $A_1$  міжпластиночна відстань у перліті зменшується. Це можна пояснити меншим розвитком процесів анігіляції дислокацій зі зростанням швидкості термопластичної деформації, зумовленої швидкістю охолодження [5]. При цьому логічно припустити, що міжпластиночну відстань у перліті визначають відстанню між плоскополігональними стінками в аустеніті, сформованими перед перетворенням його в перліт.

Підтвердженням дислокаційного механізму перлітного перетворення в сталі У8А є те, що в процесі термопластичної деформації, зумовленої охолодженням від 950 °С до 670 °С з середньою швидкістю 40 °С/год, а потім із піччю, аустеніт має різну структуру залежно від масивності (розмірів) суміжних зразків, відібраних від квадрата 10×10 мм: у масивному (7...8 мм) зразку – мала кількість структурно вільного фериту і перліту, а в тонкому (0,4...0,5 мм) – суцільна цементитна сітка і перліт [6]. Це пояснюють тим, що в тонких

зразках полегшено виток дефектів кристалічної решітки на їхню поверхню, отже, меншу кількість вуглецю пов'язано з дефектами і більша його кількість (порівняно з масивним зразком) перебуває у твердому розчині, сприяючи пересиченню аустеніту (порівняно з масивним зразком) вуглецем і утворенню цементитної сітки по межах перлітних колоній.

Згідно з [7], однорідний (гомогенний) аустеніт завжди перетворюється в пластинчатий перліт, а неоднорідний аустеніт при всіх ступенях переохолодження – у зернистий перліт.

Науково-технологічні розробки зі швидкісного електропатентування вуглецевих сталей [8, 9] також можна трактувати із залученням дислокаційного механізму перлітного перетворення. Ці розробки полягають у такому: гомогенний аустеніт доєвтектоїдної сталі необхідно переохолодити без його розпаду до інтервалу температур 300...600 °С. Після переохолодження одну частину зразків охолоджували на повітрі протягом часу, необхідного для завершення розпаду аустеніту, а потім у воді; іншу частину після певної паузи за температури переохолодження піддавали швидкісному електронагріву. Було показано, що аустеніт одної частини зразків розпадався за кінетикою, близькою відповідній ізотермічній діаграмі, а іншої частини – в інтервалі температур ~ 500...670 °С, при чому час перетворення аустеніту в перліт у другому випадку становив 1...2 с. Мікроструктура електропатентованої сталі 60 представлена на рис. 1 [8].



Рис. 1. Мікроструктура електропатентованої сталі,  $\times 30000$

З урахуванням отриманих даних запропонований нами механізм кристалізації пластинчатого перліту доцільно розглянути після викладу закономірностей гомогенного розпаду аустеніту на зернистий перліт.

Згідно з [10], у зернистий перліт гомогенний аустеніт перетворюється лише після термоциклічної обробки (ТЦО) в інтервалі температур, обмежених  $A_1$  і  $M_n$ , і ізотермічної витримки за верхньої температури циклу. У роботі [11] було показано, що структура сталі У8 після одного термоциклу гомогенного аустеніту в ізотермічних середовищах (від 300 до 700 °С), подальшій витримці протягом 10 і 20 с і загартування у воді має вигляд, представлений на рис. 2.

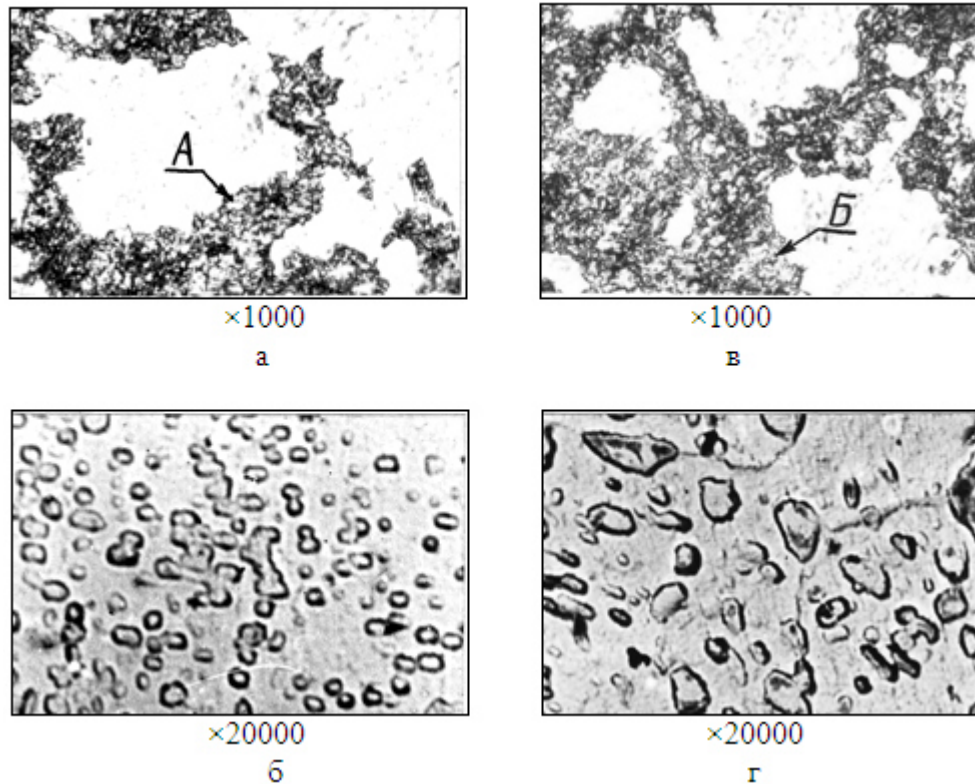


Рис. 2. Мікроструктура високовуглецевої сталі після підстужування до 300 °С та відігріву з подальшою витримкою протягом 10 (а, б) та 20 (в, г) секунд за 700 °С та загартування в воду: б, г – мікроструктури ділянок А та Б відповідно

Як видно з рис. 2, мікроструктура сталі складається зі світлих ділянок, що представляють собою безструктурний мартенсит, і темних ділянок – дрібнодисперсного зернистого перліту. У роботі [11] отримання такої мікроструктури пояснюють тим, що утворення зернистого перліту відбувається безпосередньо під час розпаду гомогенного аустеніту, а не шляхом утворення пластинчастого перліту й подальшої його трансформації в зернистий перліт.

Однак потім було встановлено [10], що морфологія перліту (пластинчата або зерниста) залежить від тривалості витримки за верхньої температури циклу попередньо переохолодженого до нижньої температури циклу аустеніту вуглецевої сталі.

Цей науковий факт можна пояснити так: за малої тривалості витримки (3 с) за 700 °С попередньо переохолодженого аустеніту сталі У8А й подальшому охолодженні на повітрі утворюється пластинчатий перліт, а за витримки 10 с починається сфероїдизація структури, яка повністю завершується за витримки 140 с. Логічно припустити, що в процесі ТЦО на плоских дислокаційних стінках спочатку утворюються пластинчаті зародки цементиту, які сфероїдизуються завдяки виникненню в процесі повного циклу ТЦО комірчастої дислокаційної субструктури.

Отже, запропонований нами механізм кристалізації пластинчастого перліту можна викласти так.

1. У процесі термопластичної деформації, що виникає під час охолодження гомогенного аустеніту, утворюються плоскополігональні дислокаційні стінки, які взаємодіють з атомами вуглецю  $\gamma$ -фази і за температури, нижчої за  $A_1$ , стають центрами зародження пластин цементиту.

2. У першу чергу, кристалізація пластинчастого перліту відбувається за рахунок поздовжнього росту пластинчатих зародків цементиту, а потім – за рахунок поперечної кристалізації, пластин цементиту, що виникли, і фериту в межах міжпластинчатої відстані.

Поперечна кристалізація пластин цементиту і фериту пов'язана з дифузійним

перенесенням вуглецю від аустеніту до цементиту через феритний шар (пластини). При цьому за практично однакових температур коефіцієнт дифузії вуглецю у фериті на два порядки вище, ніж в аустеніті [12]. По мірі дифузії вуглецю у фериті від аустеніту до цементитних пластин відбувається потовщення пластин цементиту й подальше перепакуння  $\gamma \rightarrow \alpha$  решітки. Отже, перлітне перетворення аустеніту відбувається за механізмом роздільної кристалізації пластин цементиту і фериту [13].

За температури мінімальної стійкості переохолодженого аустеніту (500...530 °С) максимальна швидкість перетворення його в пластинчастий перліт зумовлена мінімальною відстанню між пластинчастими зародками цементиту, унаслідок чого істотно скорочуються шляхи дифузії вуглецю під час запропонованого механізму його перетворення.

### Висновки

1. Генезис пластинчатого перліту визначається плоскополігональними стінками з дислокацій, які утворюються під час термопластичної деформації, зумовленої процесом охолодження аустеніту.

2. За температури аустеніту нижчої за точку  $A_1$  плоскополігональні дислокаційні стінки стають центрами зародження цементитних пластин.

3. Міжпластиночна відстань у перліті визначається відстанню між плоскополігональними стінками в аустеніті, сформованими перед перетворенням його на перліт.

4. Кристалізація пластинчатого перліту відбувається, у першу чергу, за рахунок торцевого (поздовжнього) зростання пластинчастих зародків цементиту, а в другу чергу, – за рахунок поперечної кристалізації пластин цементиту і фериту, яка, імовірно, протікає за механізмом роздільної кристалізації пластин цементиту і фериту за рахунок перенесення вуглецю від аустеніту до цементиту через феритні пластини в межах міжпластиночної відстані.

5. За температури мінімальної стійкості переохолодженого аустеніту (500...530 °С) максимальна швидкість перетворення його на пластинчастий перліт зумовлена мінімальною відстанню між пластинчастими зародками цементиту, унаслідок чого істотно скорочуються шляхи дифузії вуглецю під час запропонованого механізму його перетворення.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Счастливцев В. М. Перлит в углеродистых сталях / [В. М. Счастливцев, Д. А. Мирзаев, И. Л. Яковлева и др.]. – Екатеринбург. : УрО РАН, 2006. – 311 с.
2. Парусов В. В. Морфологические особенности перлита при превращениях гомогенного аустенита / В. В. Парусов // Сб. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Днепропетровск: Визион. – 1998. – Вып. 2. – С. 355 – 364.
3. Губенко С. И. Деформация металлических материалов / С. И. Губенко, В. В. Парусов. – Днепропетровск: Арт-пресс, 2006. – 316 с.
4. Парусов Э. В. Влияние режимов охлаждения на превращения аустенита в перлит / Э. В. Парусов, В. В. Парусов, Л. В. Сагура, А. И. Сивак // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. научн. тр. – 2011. – Вып. 58. – С. 527 – 531.
5. Парусов В. В. Влияние скорости достижения температур изотермического превращения аустенита на дисперсность перлита в углеродсодержащих сталях / В. В. Парусов, В. А. Олейник, Ж. А. Борисова, Г. В. Галенко // Сб. Производство и свойства термически обработанного проката: Металлургия. – 1988. – С. 39 – 41.
6. Парусов В. В. Развитие теоретических представлений о перлитном превращении в сталях / В. В. Парусов, Э. В. Парусов, О. В. Парусов, Л. В. Сагура, И. Н. Чуйко, А. И. Сивак // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии : Сб. научн. тр. – 2013. – Вып. 27. – С. 200 – 204.
7. Гуляев А. П. Металловедение / А. П. Гуляев. – М. : Металлургия, 1986. – 542 с.
8. Гриднев В. Н. Электронномикроскопическое исследование структуры электроотпущенной стали / В. Н. Гриднев, Ю. Н. Петров // Вопросы физики металлов и металловедения. – 1964. – № 19. – С. 79 – 86.
9. Гриднев В. Н. Перспективы применения скоростной электротермической обработки в производстве стальных канатов / В. Н. Гриднев, Ю. Я. Мешков, Н. Ф. Черненко, Д. И. Никоненко // Стальные канаты. – 1971. – № 8. – С. 292 – 300.

10. Парусов В. В. Разработка высокоэффективных процессов термической обработки мелкосортного проката и катанки и их промышленное освоение: дис. ...доктора тех. наук : 05.16.01 / Парусов Владимир Васильевич. – Д., 1989. – 413 с.
11. Долженков И. И. Исследование механизма и кинетики образования структуры зернистого перлита при термической обработке катанки и проволоки: дис. ...кандидата тех. наук : 05.16.01 / Долженков Игорь Иванович. – Днепропетровск, 1986. – 122 с.
12. Бокштейн Б. С. Диффузия в металлах / Б. С. Бокштейн. – М. : Metallurgiya, 1978. – 248 с.
13. Бунин К. П. О зарождении и строении перлита / К. П. Бунин, Ю. К. Бунина, В. И. Мазур // МиТОМ. – 1971. – № 10. – С. 6 – 7.

**Парусов Едуард Володимирович** – к. т. н., старший науковий співробітник відділу термічної обробки металу для машинобудування, +380 56 776 82 28, tometal@ukr.net.

**Парусов Володимир Васильович** – д. т. н., проф., завідувачий відділом термічної обробки металу для машинобудування, +380 56 776 82 28, alyance2000@ukr.net.

**Сагура Людмила Володимирівна** – к. т. н., старший науковий співробітник відділу термічної обробки металу для машинобудування, +380 56 776 82 28, 095 591 77 50, slv\_metal@mail.ru.

**Чуйко Ігор Миколайович** – к. т. н., науковий співробітник відділу термічної обробки металу для машинобудування, +380 56 776 82 28, ichuuko@mail.ru.

Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України (ІЧМ НАНУ).