

## Эволюция структуры и свойств кремнистых сталей при фазовом переходе аустенит—бейнит

© А.Ю. Калетин, Ю.В. Калетина

Институт физики металлов УрО РАН,  
Екатеринбург, Россия

E-mail: akalet@imp.uran.ru

(Поступила в Редакцию 25 июня 2014 г.)

Исследованы особенности структуры низколегированных кремнистых сталей после фазового перехода в интервале температур бейнитного превращения. Показано, что бейнитное превращение имеет выраженный двухстадийный характер. На первой стадии образуется полностью бескарбидный бейнит, содержащий до 45% остаточного аустенита, стабильного при глубоком охлаждении. Исследованы механические свойства в зависимости от морфологии и неоднородности по углероду фаз, образовавшихся при изотермическом превращении в бейнитной области.

### 1. Введение

В последние годы накоплен обширный материал о промежуточном превращении переохлажденного аустенита [1–4] и свойствах бейнита конструкционных сталей [2–6]. Бейнитная структура имеет сложную природу, и в зависимости от содержания углерода, легирующих элементов и условий охлаждения, может существенно менять свою морфологию. По температуре образования морфологически различают верхний и нижний бейнит. Особенности бейнитного превращения связаны с протеканием при температурах, где отсутствует диффузия атомов железа и легирующих элементов, но происходит интенсивная диффузия углерода. Это обуславливает, во-первых, наличие большого разнообразия морфологических форм образующихся фаз и, во-вторых, получение разного химического состава этих фаз, отличающихся содержанием углерода. От величины перераспределения углерода в значительной степени зависят особенности структуры и свойства стали после превращения в бейнитной области.

В некоторых случаях после превращения в бейнитном интервале в сталях образуется структура, получившая определение как „бескарбидный бейнит“. Как правило, такая структура образуется в сталях, легированных кремнием и алюминием [7–10], однако ее также наблюдали и в низкоуглеродистых легированных сталях без этих элементов после непрерывного охлаждения [11].

Представляло интерес исследовать особенности эволюции структуры бейнита в изотермически закаленных кремнистых сталях и выявить влияние перераспределения углерода на образование бескарбидного бейнита, стабилизацию остаточного аустенита и механические свойства после фазового превращения аустенит—бейнит в промежуточной области температур, что и являлось целью настоящей работы.

### 2. Материал и методика эксперимента

Материалом для исследования служили низколегированные стали 38ХС (0.36% С, 1.14% Si и 1.38% Cr) и 70С2 (0.72% С и 1.54% Si) после изотермической выдержки в интервале температур бейнитного превращения (300–425°С).

Структуру сталей изучали электронно-микроскопическим методом на микроскопе JEM-200 CX на фольгах, вырезанных из соответствующих образцов, приготовленных по стандартной методике. Количество остаточного аустенита измеряли магнитометрическим методом. Механические свойства определяли при комнатной температуре статическим растяжением пятикратных образцов с диаметром рабочей части 5 мм. Ударную вязкость определяли на образцах типа I по ГОСТ 9454-78. Для определения параметра решетки остаточного аустенита на аппарате ДРОН-3.0 в  $K_{\alpha}$ -излучении железа снимали линию (311)<sub>γ</sub>. Полученные данные использовали для расчета содержания углерода в остаточном аустените по методике [2].

### 3. Результаты исследования и обсуждение

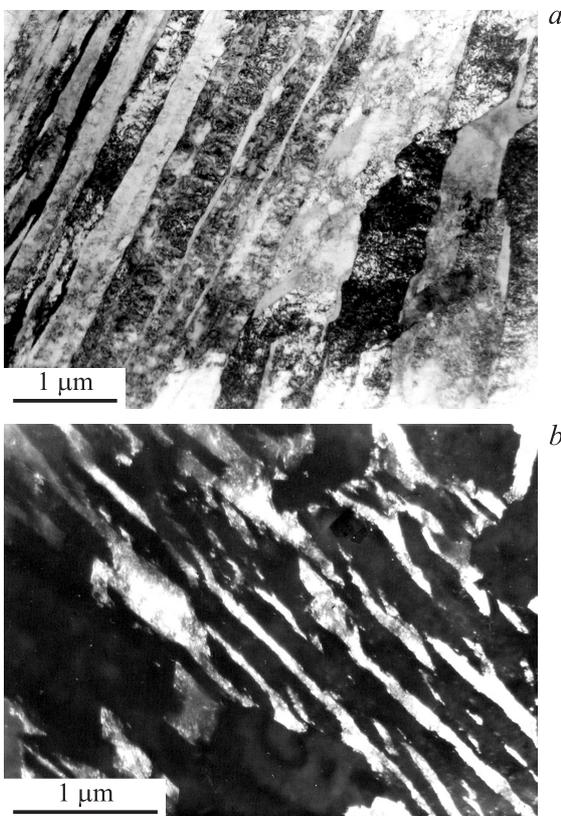
Результаты измерения количества остаточного аустенита (О.А.), твердости и ударной вязкости после различных режимов изотермической закалки стали 38ХС с последующей обработкой в жидком азоте (в течение 1 h) представлены в табл. 1. Время выдержки подбирали таким образом, чтобы в соответствии с изотермической диаграммой распада переохлажденного аустенита [12] обеспечить протекание бейнитного превращения и получение значительного количества остаточного аустенита после охлаждения. Видно, что его максимальное количество (28–29%) наблюдается после закалки в верхнем бейнитном интервале 425–400°С. Однако после обработки холодом этот остаточный аустенит в заметной сте-

**Таблица 1.** Влияние температуры и времени изотермической выдержки на термическую стабильность остаточного аустенита и свойства стали 38 ХС

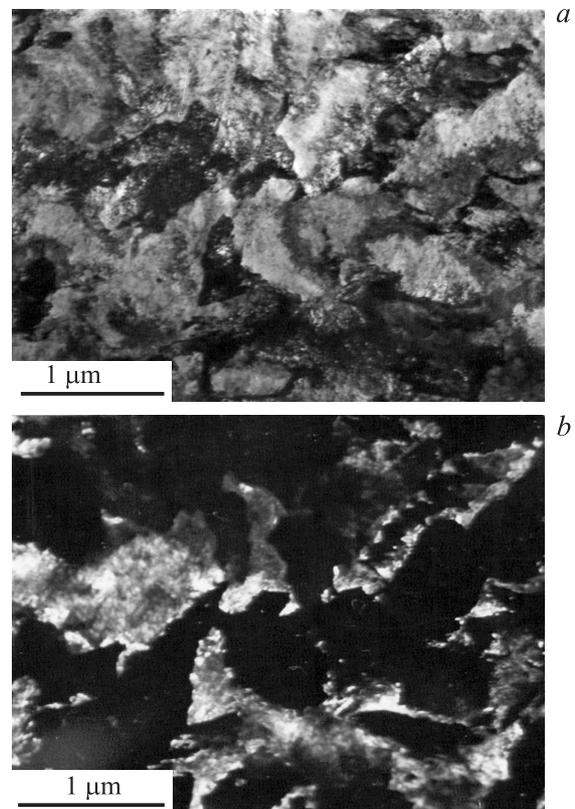
$T, ^\circ\text{C}$	$\tau, \text{min}$	Количество остаточного аустенита, $A_{\text{ост}}, \%$		Относительная устойчивость остаточного аустенита, $(A_{\text{ост}}^{-196^\circ\text{C}}/A_{\text{ост}}^{20^\circ\text{C}}) \cdot 100, \%$	Твердость, HRC	Ударная вязкость КСУ, $\text{MJ/m}^2$
		при $20^\circ\text{C}$	после обработки при $T = -196^\circ\text{C}$			
350	10	17	17	43	43	1.0
	30	16	16	42	42	1.1
375	10	21	17	42	42	0.8
	20	23	21	42	42	1.1
400	30	20	20	40	40	1.2
	10	29	17	38	38	0.7
425	30	28	18	38	38	0.9
	10	28	8	38	38	0.4
	30	28	9	38	38	0.3

пени распадается. Термическую стабильность остаточного аустенита удобно характеризовать отношением его количества, сохранившегося в стали после охлаждения до температуры жидкого азота ( $A_{\text{ост}}^{-196^\circ\text{C}}$ ) к количеству остаточного аустенита, полученного в стали после изотермической выдержки и охлаждения до комнатной температуры ( $A_{\text{ост}}^{20^\circ\text{C}}$ ), т.е. величиной  $(A_{\text{ост}}^{-196^\circ\text{C}}/A_{\text{ост}}^{20^\circ\text{C}}) \cdot 100\%$  (см. табл. 1). Относительная устойчивость остаточного

аустенита, полученного в верхнем температурном интервале  $425\text{--}400^\circ\text{C}$ , составляет от 29% до 64%, т.е. этот аустенит термически не стабилен. При обработке в нижней части бейнитного интервала  $350\text{--}375^\circ\text{C}$  количество  $A_{\text{ост}}^{20^\circ\text{C}}$  несколько меньше (16–23%), однако его термическая стабильность высокая, до 100%. Это означает, что мартенситная точка такого остаточного аустенита находится ниже температуры жидкого азота, и



**Рис. 1.** Структура стали 38ХС после изотермической выдержки при  $T = 375^\circ\text{C}$ , 20 min: *a* — светлопольное изображение; *b* — темнопольное изображение в рефлексе  $002_\gamma$ .



**Рис. 2.** Структура стали 38ХС после изотермической выдержки при  $T = 425^\circ\text{C}$ , 20 min: *a* — светлопольное изображение; *b* — темнопольное изображение в рефлексе  $002_\gamma$ .

**Таблица 2.** Влияние времени изотермической выдержки на количество остаточного аустенита и свойства стали 38 ХС

Длительность выдержки при $T = 375^\circ\text{C}$	Количество $A_{\text{ост}}$ , %	Содержание углерода в $A_{\text{ост}}$ , %	Доля углерода в $A_{\text{ост}}$ относительно его содержания в стали, %	Твердость HRC	Ударная вязкость КСУ, $\text{MJ/m}^2$
20 min	23	1.42	91	40	1.1
1 h	13	1.43	52	40	1.0
3 h	8	1.43	32	40	0.6
5 h	1	—	—	39	0.4
24 h	—	—	—	39	0.3

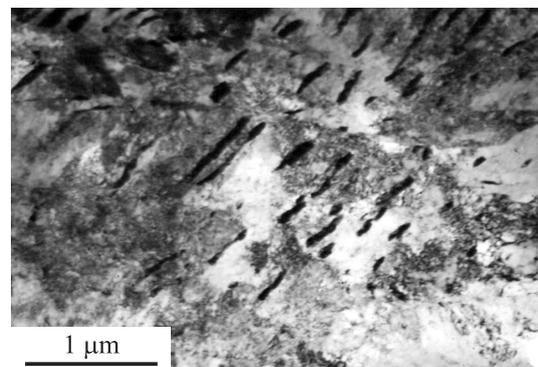
свидетельствует о значительном пересыщении остаточного аустенита по углероду.

Электронно-микроскопическое исследование структуры стали 38ХС после изотермической выдержки при температурах  $350\text{--}375^\circ\text{C}$  (10–30 min) показало, что в структуре наблюдаются в основном тонкие и длинные кристаллы бейнитного феррита, толщина которых составляет приблизительно  $0.2\text{--}0.5\ \mu\text{m}$ . Особенностью бейнитной структуры является присутствие значительного количества остаточного аустенита, который располагается в виде тонких прослоек между кристаллами феррита (рис. 1, *a, b*). При температурах  $400$  и  $425^\circ\text{C}$  и выдержке 10–30 min образуется структура верхнего бейнита, в которой преобладают глобулярные, более крупные, чем при выдержке в нижнем интервале превращения, кристаллы феррита в сочетании с достаточно крупными участками остаточного аустенита, достигающими величины  $1\text{--}2\ \mu\text{m}$  (рис. 2, *a, b*). При всех исследованных выше режимах изотермической обработки в структуре не наблюдаются выделения карбидов ни в бейнитном феррите, ни в остаточном аустените. Таким образом, в стали 38ХС продуктом превращения аустенита в интервале температур  $425\text{--}350^\circ\text{C}$  является бескарбидный бейнит, представляющий собой чисто феррито-аустенитную структуру. Образование такого бескарбидного бейнита в достаточно широком температурном интервале обусловлено наличием в стали значительного количества кремния, подавляющего выделение карбидной фазы. Следует отметить, что относительная устойчивость остаточного аустенита в жидком азоте хорошо коррелирует с изменением ударной вязкости стали со структурой бескарбидного бейнита (см. табл. 1). Чем выше степень устойчивости, особенно после обработки в нижнем интервале бейнитного превращения  $350\text{--}375^\circ\text{C}$ , тем выше значения ударной вязкости в сочетании с достаточно высокой твердостью.

Рентгеноструктурным методом определяли количество углерода в остаточном аустените. Оказалось, что остаточный аустенит при всех исследованных режимах существенно обогащен углеродом: например, после обработки  $425^\circ\text{C}$  — 10 min (28% О.А.) содержание углерода составляло 1.2% С (при содержании углерода в стали 0.36% С), а в нижнем бейните после обработки  $375^\circ\text{C}$  — 20 min (23% О.А.) — 1.42% С, т.е. пересыщение углеродом по сравнению с исходным увеличилось более чем

на 1.0% С. Таким образом, в процессе фазового перехода аустенит–бейнит в течение непродолжительного промежутка времени произошла резкая дифференциация стали по составу: наряду с кристаллами феррита, содержащими небольшое количество углерода, появляются участки аустенита, сильно обогащенные по углероду. Дальнейшее состояние этих участков непревращенного аустенита зависит от особенностей последующей термической обработки. Охлаждение после приведенных в табл. 1 режимов изотермической выдержки до комнатной температуры фиксирует структуру бескарбидного бейнита со стабильным остаточным аустенитом вплоть до температуры жидкого азота (в случае превращения в нижнем интервале бейнитного интервала).

Следовательно, процесс бейнитного превращения при изотермической выдержке кремнистой стали происходит следующим образом: во время инкубационного периода в аустените происходит хаотичное тепловое движение атомов углерода, приводящее к обеднению некоторых участков. При достижении критического размера таких участков в них образуются зародыши ферритных кристаллов, содержание углерода в которых приблизительно соответствует линии  $P\text{--}Q$  диаграммы состояния железо–углерод. От образовавшихся кристаллов феррита в аустенит диффундирует углерод, кристаллы растут, а непревращенный аустенит все больше обогащается углеродом. Благодаря наличию кремния на первой стадии бейнитного превращения цементит не выделяется, происходит кристаллизация феррита из твердого

**Рис. 3.** Структура стали 38ХС после изотермической выдержки при  $T = 375^\circ\text{C}$ , 3 h.

**Таблица 3.** Влияние температуры и времени изотермической выдержки на количество и термическую стабильность остаточного аустенита в стали 70C2

T, °C	$\tau$ , min	Количество остаточного аустенита, $A_{ост}$ , %		Относительная устойчивость остаточного аустенита, $(A_{ост}^{-196^{\circ}C} / A_{ост}^{20^{\circ}C}) \cdot 100$ , %
		при 20°C	после обработки при $T = -196^{\circ}C$	
300	1	18	5	28
	5	21	9	43
	10	29	21	73
	20	20	20	100
	40	13	13	100
350	1	19	9	47
	5	30	19	63
	10	34	29	85
	20	28	28	100
	40	24	24	100
400	1	28	15	54
	5	45	40	88
	10	42	42	100
	20	15	15	100

раствора с образованием полностью двухфазного бескарбидного бейнита. Если же время изотермической выдержки увеличивается, то пересыщенный по углероду непревращенный аустенит распадается с образованием значительного количества карбидов цементитного типа (рис. 3).

В табл. 2 приведены результаты влияния времени выдержки в нижнем интервале бейнитного превращения на механические свойства и изменение количества остаточного аустенита в стали. Видно, что с увеличением времени изотермической выдержки его количество непрерывно уменьшается и остаточный аустенит практически исчезает при выдержках больше 5 h. При этом ударная вязкость также уменьшается на фоне уменьшения количества остаточного аустенита и при длительных выдержках становится в 3–4 раза ниже, чем в случае получения структуры бескарбидного бейнита. Следует отметить, что содержание углерода в остаточном аустените в процессе увеличения длительности изотермической выдержки остается практически неизменным. При этом доля углерода, находящегося в остаточном аустените, относительно его содержания в стали также непрерывно уменьшается (с 91% C после выдержки 375°C, 20 min до 32% C после выдержки 3 h), что безусловно связано с выделением карбидов из пересыщенного углеродом остаточного аустенита.

Таким образом, в стали 38ХС наблюдается четко выраженная двухстадийность бейнитного превращения, где первая стадия распада заключается в образовании обедненного по углероду бейнитного феррита и сохранении в структуре стали значительного количества остаточного аустенита. В структуре при этом отсутствуют выделения карбидов как в феррите, так и в аустените. Вторая стадия развивается при увеличении времени

изотермической выдержки и включает в себя появление заметных выделений карбидов и постепенное уменьшение количества остаточного аустенита после охлаждения. Исследование механических свойств показывает (табл. 1, 2), что на первой стадии превращения, когда структура представляет собой бескарбидный комплекс пакетно-реечного бейнитного феррита и межречных тонких прослоек остаточного аустенита, обеспечивается сочетание высокой прочности и ударной вязкости. Распад аустенита с выделением карбидной фазы при сохранении уровня прочности резко снижает ударную вязкость изотермически закаленной стали, т.е. развитие второй стадии превращения значительно ухудшает механические свойства при ударном нагружении. Отметим, что очень длительные выдержки (более 10 h) приводят к полному исчезновению остаточного аустенита в структуре стали, т.е. бейнитное превращение в этом случае может проходить до конца. Также следует отметить, согласно табл. 1, что доля углерода в остаточном аустените, независимо от его количества, может характеризовать морфологические особенности структурных составляющих фазовых превращений в промежуточной области температур (бескарбидный бейнит или бейнит с карбидами) и уровень ударной вязкости стали.

Двухстадийный характер бейнитного превращения наблюдается и в стали 70C2 (0.72% C и 1.54% Si). В табл. 3 представлены результаты измерения количества и устойчивости остаточного аустенита в этой стали после различных режимов изотермической выдержки в интервале температур 300–400°C и охлаждения в жидком азоте (в течение 1 h).

Видно, что на первой стадии бейнитного превращения количество остаточного аустенита возрастает, достигая значений 29% ( $T = 300^{\circ}C$ , 10 min), 34% ( $T = 350^{\circ}C$ ,

**Таблица 4.** Влияние температуры и времени выдержки на количество остаточного аустенита и содержания в нем углерода в стали 70C2

Режим изотермической выдержки		$A_{\text{ост}}$ при 20°C, %	Относительная устойчивость остаточного аустенита, $(A_{\text{ост}}^{-196^{\circ}\text{C}}/A_{\text{ост}}^{20^{\circ}\text{C}}) \cdot 100, \%$	Содержание углерода в $A_{\text{ост}}$ , %	Доля углерода в $A_{\text{ост}}$ относительно его содержания в стали, %
$T, ^{\circ}\text{C}$	$\tau, \text{min}$				
300	5	21	43	0.90	26
350	5	30	63	1.52	63
400	5	45	88	1.58	98
400	10	42	100	1.71	99

10 min) и даже 45% ( $T = 400^{\circ}\text{C}$ , 5 min), а затем, при развитии второй стадии, плавно уменьшается. При этом термическая стабильность остаточного аустенита в процессе развития превращения постепенно повышается и достигает полной (100%) устойчивости к распаду в жидком азоте в начале развития второй стадии превращения, когда количество остаточного аустенита начинает уменьшаться при увеличении времени изотермической выдержки. Интерес представляет тот факт, что в малолегированной стали после достаточно простой обработки в интервале бейнитного превращения возможно получение значительного количества (более 40%) остаточного аустенита, термически стабильного не только при комнатной температуре, но и после длительной выдержки в жидком азоте.

Такая стабильность остаточного аустенита несомненно связана с обогащением его углеродом в процессе фазового превращения. Результаты степени обогащения после нескольких режимов изотермической выдержки представлены в табл. 4.

По мере развития бейнитного превращения на первой стадии происходит интенсивная диффузия углерода от межфазной  $\alpha/\gamma$  границы, приводящая к резкой дифференциации стали по химическому составу: наряду с ферритом, практически не содержащим углерода, в стали с 0.72% С появляются участки аустенита, содержащие более 1.5% С (см. табл. 4). Чем больше остаточный аустенит обогащен углеродом, тем больше его относительная устойчивость при охлаждении в жидком азоте. После обработки при  $T = 400^{\circ}\text{C}$  и выдержке 10 min наблюдается полная устойчивость большого количества остаточного аустенита (42%), которая связана с очень сильным его обогащением углеродом до 1.7% С. Доля углерода, содержащегося в остаточном аустените относительно среднего содержания его в стали (последняя колонка в табл. 4), хорошо коррелирует с его термической стабильностью и достигает значений 99% С в случае полной стабильности при обработке глубоким холодом. Таким образом, после 10 min изотермической обработки при  $400^{\circ}\text{C}$  практически весь углерод находится в остаточном аустените и структура представляет двухфазный феррито-аустенитный комплекс практически без выделения карбидов. Электронно-микроскопические исследования подтвердили предположение и показали,

что структура состоит из полностью свободных от карбидов кристаллов феррита и прослоек остаточного аустенита, то есть наблюдается структура бескарбидного бейнита.

#### 4. Заключение

1. В конструкционных сталях 38ХС и 70С2 бейнитное превращение в широком температурном интервале имеет двухстадийный характер. На первой стадии образуется структура бескарбидного бейнита, состоящая из смеси бейнитного феррита с 15–40% остаточного аустенита. При увеличении времени изотермической выдержки развивается вторая стадия бейнитного превращения — распад непревращенного аустенита с выделением карбидов.

2. Структура бескарбидного бейнита, образующаяся на первой стадии, обеспечивает получение высокой ударной вязкости стали. Развитие второй стадии бейнитного превращения и появление в структуре заметного количества карбидов приводит к существенному снижению уровня ударной вязкости.

3. Остаточный аустенит в бескарбидном бейните существенно обогащен по углероду и содержит значительную часть от общего содержания углерода в стали. Доля углерода в остаточном аустените может характеризовать морфологические особенности структурных составляющих фазовых превращений (бескарбидный бейнит или бейнит с карбидами) и уровень ударной вязкости стали.

4. Термическая стабильность остаточного аустенита зависит от режимов термической обработки и связана с обогащением его углеродом. В случае образования бескарбидного бейнита наблюдается высокая термическая стабильность остаточного аустенита (отсутствие его превращения вплоть до температуры жидкого азота).

#### Список литературы

- [1] Н.К.Д.Н. Bhadeshia. Bainite in Steels. 2nd ed. The Institute of Materials London (2001). 460 p.
- [2] Z. Bojarski. T. Bold. Acta Met. **22**, 10, 1223 (1974).

- [3] F.G. Caballero, H.K.D.H. Bhadeshia. *Current Opinion Solid State Mater. Sci.*: DK **8**, 251 (2004).
- [4] В.М. Счастливцев, Ю.В. Калетина, Е.А. Фокина. Остаточный аустенит в легированных сталях. УрО РАН, Екатеринбург (2014). 236 с.
- [5] А.Ю. Калетин. Автореф. канд. дис. Свердловск (1985). 24 с.
- [6] C. Garcia-Mateo, F.G. Caballero, H.K.D.H. Bhadeshia. *Mater. Sci. Forum* **500**, 495 (2005).
- [7] М.Н. Георгиев, А.Ю. Калетин, Ю.Н. Симонов, В.М. Счастливцев. *ФММ* **1**, 113 (1990).
- [8] J.C. Hell, M. Dehmas, S. Allain, J.M. Prado. *ISIJ int.* **51**, 10, 1724 (2011).
- [9] А.Ю. Калетин, В.М. Счастливцев, Н.Т. Карева, М.А. Смирнов. *ФММ* **56**, 366 (1983).
- [10] В.М. Счастливцев, Ю.В. Калетина, М.А. Смирнов, А.Ю. Калетин. Деформация и разрушение материалов **4**, 1 (2011).
- [11] Ю.М. Калетин, А.Г. Рьжков, А.Ю. Калетин. *Изв. вузов. Черн. металлургия* **6**, 96 (1989).
- [12] А.А. Попов, Л.Е. Попова. Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита. *Металлургия, М.* (1965). 496 с.