

УДК 620.186.8

**П.А. Леонтьев, А.С. Иванова, Ю.Н. Симонов**

**P.A. Leontiev, A.S. Ivanova, Y.N. Simonov**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет  
Perm National Research Polytechnic University

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ И СТРУКТУРЫ  
КРЕМНИСТЫХ СТАЛЕЙ С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ  
УГЛЕРОДА ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ОХЛАЖДЕНИИ**

**PHASE TRANSFORMATIONS AND STRUCTURE OF SILICON  
STEELS WITH VARIOUS CARBON CONTENT  
UNDERCONTINUOUS COOLING**

Рассмотрены свойства и структура низколегированных кремнистых сталей. С использованием самого современного оборудования изучено влияние скорости охлаждения на структуру и свойства этих сталей в широком интервале скоростей. Построены термокинетические диаграммы превращения переохлажденного аустенита.

**Ключевые слова:** бейнит, остаточный аустенит, стали, фазовые превращения, твердость, непрерывное охлаждение.

Studied properties and structure of the low-alloyed silicon steels. With the use of modern equipment studied the effect of cooling rate on the structure and properties of these steels in a wide range of speeds Thermokinetic transformation diagrams undercooled austenite has been drawn.

**Keywords:** bainite, retained austenite, steels, phase transformations, hardness, continuous cooling.

Бейнит имеет сложную природу и может существенно менять свою морфологию в зависимости от условий охлаждения, условий деформирования аустенита, содержания в стали углерода и легирующих элементов. Соответственно меняется уровень прочности, пластичности и ударной вязкости сталей, в структуре которых формируется бейнит [1].

Различают структуру верхнего и нижнего бейнита. Верхний бейнит, образующийся обычно в области температур 500–350 °С, имеет «перистый» вид, в котором частицы карбидов выделяются не в виде пластинок, как в перлите, а в виде изолированных узких частиц. Нижний бейнит образуется при

температурах от 350 °С до точки  $M_n$  и имеет игольчатое (пластинчатое) мартенситоподобное строение. Карбидные частицы в нижнем бейните располагаются в пластинках  $\alpha$ -фазы. В сталях, легированных кремнием, карбид может вообще не образовываться и бейнит состоит из  $\alpha$ -фазы и остаточного аустенита, такой аустенит называется бескарбидным.

Исследования бескарбидного бейнита начались в 70-е годы прошлого века. В СССР В.М. Счастливым, Ю.М. Калетиным, а также зарубежными исследователями М. Боярски и Т. Боулдом было установлено, что высокий комплекс механических свойств при малых скоростях охлаждения кремнистых сталей связан с образованием структуры бескарбидного бейнита.

В начале 2000-х гг. группами испанских исследователей во главе с Габальеро была показана возможность существенного диспергирования структуры бескарбидного бейнита вплоть до наноуровня. Таким образом, исследование подобных структур является весьма актуальным [2, 3].

Несмотря на достаточно большое количество данных, касающихся получения подобной структуры и ее свойств, остается невыясненным целый ряд вопросов, среди которых важными являются вопросы, связанные с возможностью получения такой структуры в низколегированных кремнистых сталях при непрерывном охлаждении.

Целью нашей работы является исследование структуры и свойств низколегированных кремнистых сталей после непрерывного охлаждения из аустенитной области, в широком диапазоне температур, с использованием самого современного оборудования.

Использовали стали марок 30ХГСА, 60С2, 9ХС (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав исследуемых сталей

Сталь	C	Si	Mn	Ni	Mo	Al	Cr	Cu
30ХГСА	0,32	1,06	0,87	0,06	0,005	0,026	0,92	0,16
60С2	0,64	1,83	0,80	0,03	0,004	0,01	0,23	0,04
9ХС	0,91	1,45	0,51	0,15	0,010	–	1,11	0,15

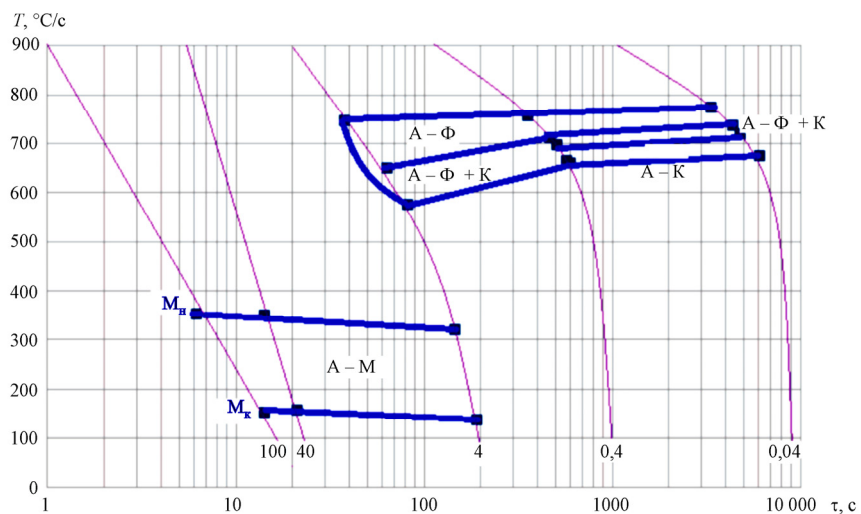
Были проведены дилатометрические исследования на закалочном дилатометре Linseis L78 RITA. Обработку данных дилатометрических исследований проводили при помощи разработанного первым автором данной статьи программного обеспечения.

Приготовление шлифов для микроструктурных исследований проводили по стандартной методике на шлифовально-полировальном станке «Нерис». Испытания на микротвердость проводили на микротвердомере ПМТ-3. Данные по микротвердости переводили в твердость по Роквеллу. Микрострукту-

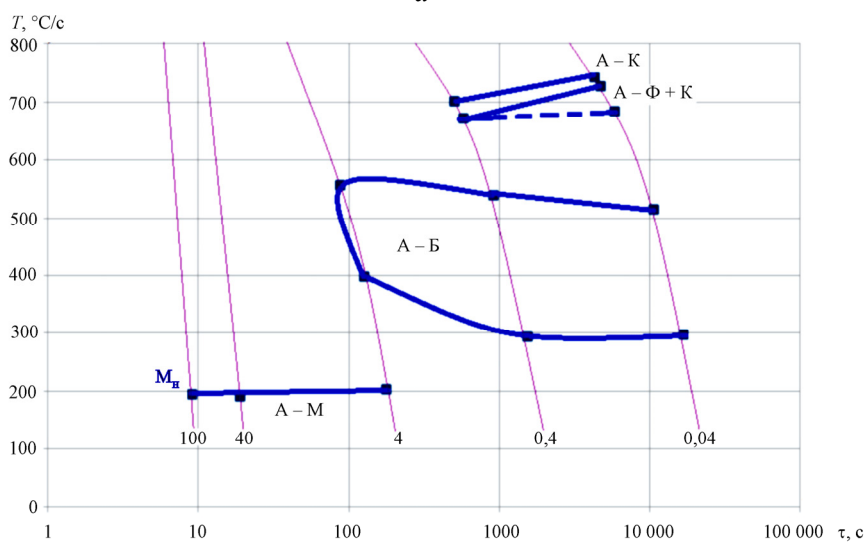
ру образцов исследовали с помощью оптического микроскопа Olympus GX-51 (Carl Zeiss, Германия) в программе «ВидеоТестМастер-4.0». Вывод изображения на монитор осуществляли при помощи камеры SIS Altra 20.

Все стали охлаждали со скоростями 0,04; 0,4; 4; 40 и 100 °C/с. Для стали 60С2 были назначены дополнительные режимы (7, 10, 25 °C/с), поскольку бейнитное превращение попадало в область скоростей между 4 и 40 °C/с. Температура нагрева 900 °C, выдержка 600 с.

Полученные термокинетические диаграммы представлены на рис. 1, а–в.



а



б

Рис. 1. Термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита для стали 30ХГСА (а), 60С2 (б) и 9ХС (в) (см. также с. 36)

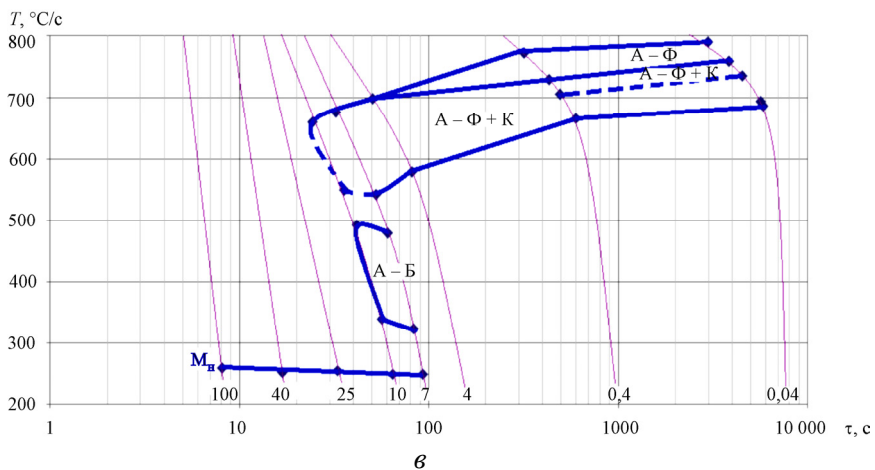


Рис. 1. Окончание

На всех трех диаграммах при скоростях охлаждения выше  $25\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  четко выявляются области мартенситного превращения; области превращения «аустенит – феррит» и «аустенит – ферритно-карбидная смесь» также четко выявляются при скоростях охлаждения менее  $4\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  в сталях 30ХГСА и 9ХС и менее  $10\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  в стали 60С2. Кроме того, в стали 30ХГСА с минимальным (по сравнению с другими исследуемыми сталями) содержанием углерода фиксируется температура окончания мартенситного превращения  $M_k$  (рис. 3.1). Для стали 9ХС при скоростях охлаждения менее  $4\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ , несмотря на попадание в бейнитную область, нет возможности получения исключительно структуры бейнита. В целом полученные диаграммы достаточно хорошо совпадают с диаграммами, представленными в справочнике Л.Е. и А.А. Поповых [6]. Особенно это относится к стали 60С2.

После построения диаграмм с использованием дилатометрических образцов была исследована структура сталей 60С2, 30ХГСА, 9ХС после различных скоростей охлаждения и проведен микродюрметрический анализ. Общая характеристика структуры сталей приведена в табл. 2, а микроструктуры для стали 60С2 показаны на рис. 2. Микроструктуры сталей 30ХГСА и 9ХС аналогичны микроструктурам стали 60С2.

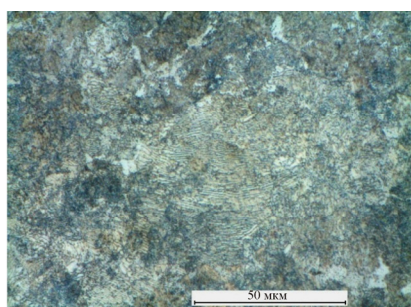
Микроскопический анализ показал, что во всех трех исследуемых сталях при скоростях охлаждения менее  $0,4\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  образуется феррито-перлитная структура, а при скоростях охлаждения более  $10\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  – мартенситная структура. Также установлено, что как при низких, так и при высоких скоростях охлаждения (менее  $0,4$  и более  $10\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ ) характер структуры не меняется, значения микротвердости находятся примерно на одном уровне и вид термокинетической диаграммы изменяется незначительно.

Таблица 2

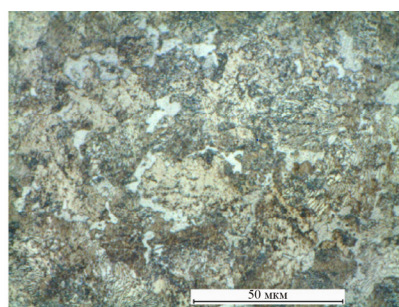
Результаты исследования структуры и твердости сталей  
после непрерывного охлаждения с различными скоростями

Скорость охлаждения, °C/с	0,04	0,4	4	7	10	25	40	100
Структура и твердость стали 30ХГСА	Ф+П	Ф+П	М+П+Ф	–	–	–	М+А <sub>ост</sub>	М+А <sub>ост</sub>
	< 20	< 20	41	–	–	–	44	42
Структура и твердость стали 60С2	П+Ф	С+Ф	С+Ф	С+Б/М	Б/М+Т/С	М+А <sub>ост</sub>	М+А <sub>ост</sub>	М+А <sub>ост</sub>
	25	31	32	33/55	56/37	55	55	53
Структура и твердость стали 9ХС	П+Б	П+Б	Б+М	–	–	–	М+А <sub>ост</sub>	М+А <sub>ост</sub>
	32	30	50	–	–	–	61	60

*Примечание.* Твердость приведена в единицах HRC; П – перлит; Ф – феррит; М – мартенсит; А<sub>ост</sub> – остаточный аустенит; Т – троостит; С – сорбит. Структура через дробь указывается, когда нельзя четко разделить, какая именно структура представлена. Структуры, указанные через «+», означают, что на шлифах присутствуют две области. Твердость через дробь приведена когда было возможно отдельно измерить микротвердость темных и светлых участков шлифа.



а



б

Рис. 2. Микроструктура стали 60С2 после охлаждения со скоростями: а – 0,04 °C/с; б – 0,4 °C/с; в – 4 °C/с; г – 7 °C/с; д – 10 °C/с; е – 25 °C/с; ж – 40 °C/с; з – 100 °C/с (см. также с. 38)

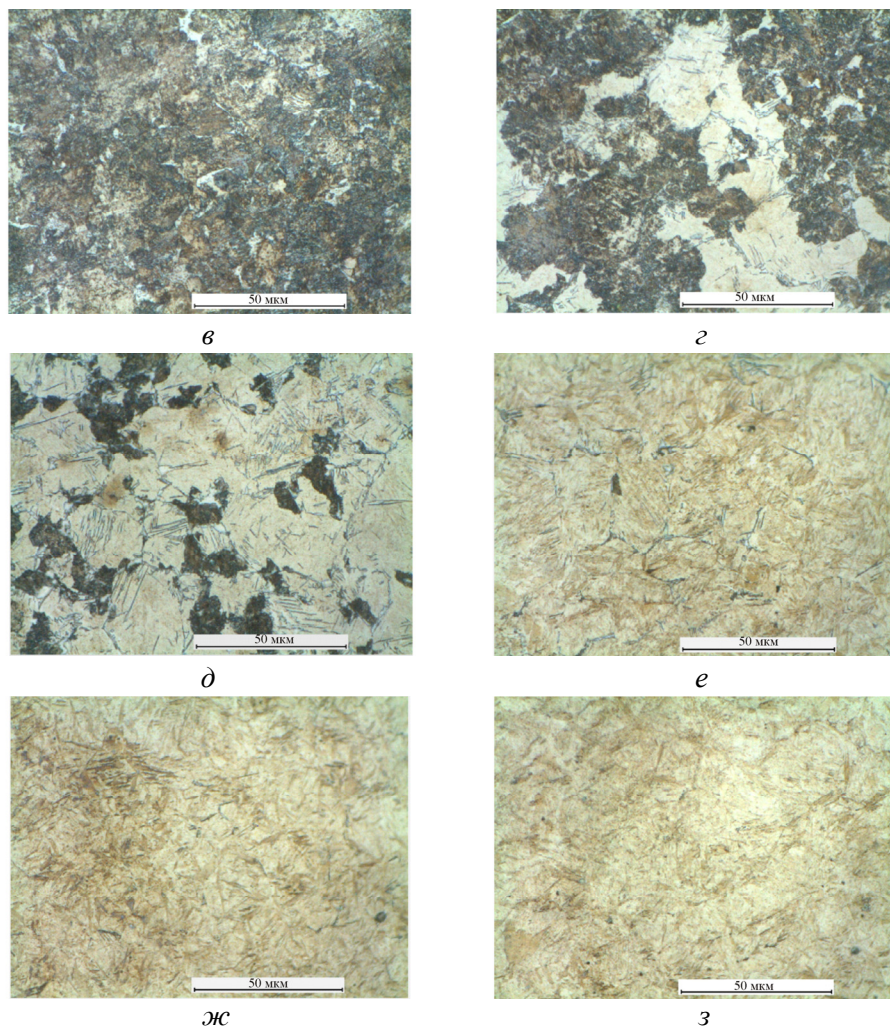


Рис. 2. Окончание

Наиболее интересными для исследования являются скорости охлаждения 4, 7 и 10 °С/с для стали 60С2, так как именно при этих скоростях структура начинает значительно изменяться и отличаться от более высоких и более низких скоростей (менее 0,4 и более 10 °С/с).

Структура стали 60С2 после непрерывного охлаждения со скоростью 4 °С/с представлена преимущественно сорбитом с небольшим количеством феррита. Однако при увеличении скорости охлаждения до 10 °С/с помимо сорбита начинает образовываться бейнитно-мартенситная смесь.

По результатам исследований сделан вывод о невозможности получения структуры бескарбидного бейнита в данных сталях при непрерывном охлаж-

дении, за исключением стали 60С2, в которой при скоростях в диапазоне 4–0,4 °С/с образуется структура, содержащая верхний бейнит. Необходимо провести изотермические исследования данных сталей с выдержкой в бейнитном интервале температур.

### Список литературы

1. Лахтин Ю.М. *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1983. – 359 с.
2. Caballero F.G., Bhadeshia H.K.D.H. Very strong bainite // *Current Opinion in Solid State and Materials Science: DK 8.* – 2004. – P. 251–257.
3. Gaglia-Mateo C., Chao J., Garcia de Andres C. Theoretical Design and Advanced Microstructure in Super High Strength Steels // *JOM.* – 2008. – Vol. 60, № 12. – P. 16–21.

Получено 1.11.2013

**Леонтьев Петр Алексеевич** – аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: talto@mail.ru).

**Иванова Анастасия Сергеевна** – магистр, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: mto@pstu.ru).

**Симонов Юрий Николаевич** – доктор технических наук, профессор, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: mto@pstu.ru).

**Leontiev Petr Alekseevich** – Post Graduate Student, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: talto@mail.ru).

**Ivanova Anastasya Sergeevna** – Master of Engineering, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: mto@pstu.ru).

**Simonov Yuri Nikolaevich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: mto@pstu.ru).