**[ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПАДА ПЕРЕОХЛАЖДЕННОГО АУСТЕНИТА НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ ТРУБНОЙ СТАЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЛЕКСА GLEEBLE 3500](http://elibrary.ru/item.asp?id=21833018)[[1]](#footnote-1)\***

Полецков П.П., Денисов С.В., Никитенко О.А., Чукин Д.М., Гущина М.С.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

**RESEARCH OF the Decay of supercooled austenite OF LOW-CARBON PIPE STEEL WITH the USE OF GLEEBLE 3500 COMPLEX**

***Poletskov P. P., Denisov S. V., Nikitenko O. A., Chukin D. M., Gushchin M. S.***

***Аннотация***

Современные требования к листовому прокату определяют необходимость получения высоких значений прочностных свойств и одновременно достижения высокого уровня вязкости. Это предопределяет поиск новых технологических решений за счет совершенствования технологии металлургического передела как в части оптимизации химического состава (легирующих и микролегирующих элементов), так и разработки новых температурно-временных режимов прокатки, в том числе с применением ускоренного охлаждения.

Перспективным направлением повышения прочностных свойств низкоуглеродистых легированных сталей, является использование контролируемой прокатки, обеспечивающей формирование структур с преобладанием бейнитной составляющей. Следует подчеркнуть, что морфология бейнитных структур в низкоуглеродистых феррито-бейнитных трубных сталях чрезвычайно разнообразна: встречается как игольчатый, глобулярный, так и реечный бейнит. Появление того или иного морфологического типа зависит как от характера легирования стали, так и режима ее обработки. Анализ литературных источников показал, что в настоящее время отсутствуют обстоятельные исследования, которые позволяют утверждать какой именно морфологический тип бейнита обеспечивает наиболее оптимальные свойства. В связи с этим является весьма актуальным исследование распада переохлажденного аустенита низкоуглеродистой трубной стали, выявление морфологического типа бейнита и его влияние на свойства стали.

В связи с этим в настоящей работе изучали влияние скорости охлаждения на структуру, свойства и структурно-фазовые превращения низкоуглеродистой комплексно-легированной трубной стали, содержащей 0,062 % С; 1,8 % Mn; 0,12 % Mo; 0,032 % Cr, 0,895 % Ni и прочие элементы (Al, Cu, V, Nb, Ti). Дилатометрическим методом с использованием комплекса Gleeble 3500 построена термокинетическая диаграмма распада переохлажденного аустенита низкоуглеродистой комплексно-легированной трубной стали. Нагрев образцов диаметром 10 мм проводился до температуры 1000 °С с последующим охлаждением со скоростями в диапазоне от 0,05 до 150 °С/с. Проведен качественный и количественный анализ микроструктуры и определена твердость после различных скоростей охлаждения. Определены скорости охлаждения, обеспечивающие получение бейнитных структур и повышение прочностных свойств стали указанного состава.

***Ключевые слова:*** низкоуглеродистая комплексно-легированная трубная сталь, термокинетическая диаграмма распада переохлажденного аустенита, исследовательский комплекс Gleeble 3500, дилатометрия, скорость охлаждения, бейнит, твердость.

**Keywords:** the low-carbon complex alloyed pipe steel, thermokinetic diagrams of decay of supercooled austenite, research complex Gleeble 3500, dilatometriy, cooling rate, bainite, hardness.

**Abstract.**

Modern requirements to sheet metal determine the need for obtaining high values of strength properties and at the same time achievement of high level of viscosity. It predetermines search of new technology solutions due to the improvement of metallurgical processing technology as in the part of optimizing the chemical composition (the alloying and microalloying elements), and development of the new temperature and time modes of rolling, including the use of rapid cooling.

The promising direction in improving the strength properties of low-carbon alloy steels is the use of the controlled rolling providing formation of structures with prevalence of a bainite component. It should be emphasized that the morphology of the bainite structure in low-carbon ferrite-bainite pipe steels is extremely various: it occurs as a needle, globular and reechny bainite. The appearance of one or another morphological type depends both on the nature of the alloying of steel and the mode of its processing. The analysis of references showed that now there are no detailed researches which allow to approve what morphological type of a bainite provides the most optimal properties. In this connection, it is very relevant to investigate the decay of supercooled austenite of low-carbon pipe steel, to reveal the morphological type of bainite and its effect on the properties of steel.

In this regard in the present work it was studied the influence of the cooling rate on the structure, properties, and structural-phase transformations of low-carbon complex-alloyed pipe steel containing 0,062% С; 1,8% of Mn; 0,12% of Mo; 0,032% of Cr, 0,895% of Ni and other elements (Al, Cu, V, Nb, Ti). By the dilatometric method, with the use of Gleeble 3500 research complex, thermokinetic diagram of decay of supercooled austenite of low-carbon complex-alloyed pipe steel was constructed. Heating of the sample with a diameter of 10 mm was carried out to the temperature 1000 °С with the subsequent cooling with speeds to the range from 0,05 to 150 °С /s. The qualitative and quantitative analysis of microstructure were carried out and hardness after various speeds of cooling was determined. There were identified the cooling rates providing bainite structures and increase in the strength properties of steel with specified composition.

**Библиографический список**

1. [Пышминцев И. Ю.](http://elibrary.ru/author_items.asp?refid=215561361&fam=%D0%9F%D1%8B%D1%88%D0%BC%D0%B8%D0%BD%D1%86%D0%B5%D0%B2&init=%D0%98+%D0%AE), В.М. Фарбер. Методы упрочнения трубных сталей // Сталь. – 2005. – № 7. – С. 67-74.
2. Thompson S.W., Colvin D.J., Krauss G. Continuous Cooling Transformations and Microstructure in a Low-Carbon High- Strength Low-Alloy Plate Steel // Met. Trans. – 1990. – Vol. 21A – N 4. – P. 1493-1507.
3. Bramfitt B.L., Speer J.G. A Perspective on the Morphology of Bainite // Met. Trans. – 1990 – Vol. 21A – N 4. – P. 817–829.
4. Смирнов М.А., Пышминцев И.Ю., Борякова А.Н. Влияние скорости охлаждения на свойства низкоуглеродистой трубной стали // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2007. – Вып. 9. – № 21(93). – С.15-18.
5. Эфрон Л.И., Ильинский В.И., Голованов А.В., Морозов Ю.Д. Металловедческие основы получения хладостойких трубных сталей путем высокотемпературной контролируемой прокатки // Сталь. – 2003. – № 6. – С. 69-72.
6. Krauss G., Thompson S.W. Ferritic Microstructures in Continuosly Coled Coled Low- and Ultralow Carbon Steels // ISIJ International. – 1995. – V. 35. – № 8. – P. 937-945.
7. Копцева Н.В., Чукин Д.М., Ефимова Ю.Ю., Никитенко О.А., Ишимов А.С. Исследование влияния скорости охлаждения на формирование структуры катанки из стали 80Р, предназначенной для производства высокопрочной арматуры // Черные металлы. – 2014. – № 2. – С. 23-31.
8. Чукин М.В., Полецков П.П., Копцева Н.В., Барышников М.П., Ефимова Ю.Ю., Никитенко О.А., Ишимов А.С., Гущина М.С., Бережная Г.А. [Структурно-фазовые превращения при непрерывном охлаждении высокопрочных среднеуглеродистых комплексно-легированных низкоотпущенных сталей](http://elibrary.ru/item.asp?id=27679084) // [Теория и технология металлургического производства](http://elibrary.ru/contents.asp?issueid=1695025). – 2016. – [№ 1 (18)](http://elibrary.ru/contents.asp?issueid=1695025&selid=27679084). – С. 57-62.
9. Чукин М.В, Салганик В.М., Полецков П.П., Денисов С.В., Кузнецова А.С., Бережная Г.А., Гущина М.С. Основные виды и области применения стратегического высокопрочного листового проката // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2014. – № 4. – С. 41 - 44.
10. Эфрон Л. И. Формирование структуры и механических свойств конструкционных сталей при термомеханической обработке в потоке прокатного стана. ИКС ЦНИИЧМ // Сталь. – 1995. – №8. – 154 с.
11. Бернштейн М.Л., Займовский В.А., Капуткина Л.М. Термомеханическая обработка стали. М.: Металлургия, 1983. – 480 с.
12. Счастливцев В.М., Копцева Н.В., Артемова Т.В. [Электронно-микроскопическое исследование структуры мартенсита в малоуглеродистых сплавах железа](http://elibrary.ru/item.asp?id=26217041) // [Физика металлов и металловедение](http://elibrary.ru/contents.asp?issueid=1586008). – 1976. – Т. 41. – [№ 6](http://elibrary.ru/contents.asp?issueid=1586008&selid=26217041). – С. 1251-1260.
13. [Садовский](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B0%D0%B4%D0%BE%D0%B2%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9,_%D0%92%D0%B8%D1%81%D1%81%D0%B0%D1%80%D0%B8%D0%BE%D0%BD_%D0%94%D0%BC%D0%B8%D1%82%D1%80%D0%B8%D0%B5%D0%B2%D0%B8%D1%87) В.Д., Фокина Е.А., Счастливцев В.М. [Остаточный аустенит в закаленной стали](http://books.google.ru/books?id=DdC3AAAAIAAJ).. М.: Наука, 1986. – 111с.
14. Родионов Д.П., Счастливцев В.М., Степанова Н.Н., Смирнов Л.В. [Форма мартенситных кристаллов в пакетном (реечном) мартенсите](http://elibrary.ru/item.asp?id=24641877) // [Физика металлов и металловедение](http://elibrary.ru/contents.asp?issueid=1493952). – 1986. – Т. 61. – [№ 1](http://elibrary.ru/contents.asp?issueid=1493952&selid=24641877). – С. 115-120.
15. Смирнов М.А., Пышминцев И.Ю., Борякова А.Н. Классификация микроструктур низкоуглеродистых трубных сталей // Металлург. – 2010. – №7. – С. 45-51.
16. Эфрон Л.И., Ильинский В.И., Морозов Ю.Д., Голованов А.В. Разработка и промышленной опробование трубной стали повышенной прочности и хладостойкости с преимущественно бейнитной структурой // Cталь. – 2003. – № 9. – С. 83–87.
17. Матросов Ю.И. Разработка принципов микролегирования и режимов контролируемой прокатки малоперлитных сталей для труб магистральных газопроводов: Автореф. дис.. на соискание ученой степени доктора технических наук. М.: – 1982. – 42 с.
18. Koptseva N.V., Chukin M.V., Nikitenko O.A. Use of the Thixomet pro software for quantitative analysis of the ultrafine-grain structure of low-and medium-carbon steels subjected to equal channel angular pressing // Metal Science and Heat Treatment. – 2012. – Т. 54. – № 7-8. – С. 387-392.
19. Мирзаев Д.А., Окишев К.Ю., Счастливцев В.М., Яковлева И.Л. [Кинетика образования бейнита и пакетного мартенсита. I. Учет структуры пакета](http://elibrary.ru/item.asp?id=24131560) // [Физика металлов и металловедение](http://elibrary.ru/contents.asp?issueid=862948). – 2000. – Т. 90. – [№ 5](http://elibrary.ru/contents.asp?issueid=862948&selid=24131560). – С. 55-65.
20. Свищенко В.В. Особенности фазового состава продуктов промежуточного превращения в стали 24Х2НАч / Свищенко В.В. , Д.П. Чепрасов, А.А. Ивановский, Ю.А. Филатов. // Ползуновский Вестник. – 2005. – № 2 (ч. 2). – С. 95-97.
21. Metallography and Microstructures: ASM Handbook: ASM Int. – 2004. – Vol. 9. – 1184 p.
22. Bhadeshia, H.K. Bainite in Steels, 2nd ed. – London : Ins. of Materials, – 2001. – 454 p.
23. [Попов А. А.](http://elibrary.ru/author_items.asp?refid=215561360&fam=%D0%9F%D0%BE%D0%BF%D0%BE%D0%B2&init=%D0%90+%D0%90), [Попова А. Е.](http://elibrary.ru/author_items.asp?refid=215561360&fam=%D0%9F%D0%BE%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D0%B0&init=%D0%90+%D0%95) Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита: справочник термиста. М.: Машгиз, 1961. – 430 с.

**References**

1. Pyshmintsev I. Iu., V.M. Farber. Metody uprochneniia trubnykh stalei // Stal'. – 2005. – № 7. – S. 67-74.
2. Thompson S.W., Colvin, D.J., Krauss, G. Continuous Cooling Transformations and Microstructure in a Low-Carbon High-Strength Low-Alloy Plate Steel//Met. Trans. – 1990. – Vol. 21A-N 4. – P. 1493-1507.
3. Bramfitt B.L., Speer, J.G. A Perspective on the Morphology of Bainite//Met. Trans. – 1990 – Vol. 21A-N 4. – P. 817–829.
4. Smirnov M.A., Pyshmintsev I.Iu., Boriakova A.N. Vliianie skorosti okhlazhdeniia na svoistva nizkouglerodistoi trubnoi stali // Vestnik IuUrGU. Seriia «Metallurgiia». – 2007. – Vyp. 9. – № 21(93). – S.15-18.
5. Efron L.I., Il'inskii V.I., Golovanov A.V., Morozov Iu.D. Metallovedcheskie osnovy polucheniia khladostoikikh trubnykh stalei putem vysokotemperaturnoi kontroliruemoi prokatki // Stal'. – 2003. – № 6. – S. 69-72.
6. Krauss G., Thompson S.W. Ferritic Microstructures in Continuosly Coled Coled Low-and Ultralow Carbon Steels//ISIJ International. – 1995. – V. 35. – No. 8. – P. 937-945.
7. Koptseva N.V., Chukin D.M., Efimova Iu.Iu., Nikitenko O.A., Ishimov A.S. Issledovanie vliianiia skorosti okhlazhdeniia na formirovanie struktury katanki iz stali 80R, prednaznachennoi dlia proizvodstva vysokoprochnoi armatury // Chernye metally. – 2014. – № 2. – S. 23-31.
8. Chukin M.V., Poletskov P.P., Koptseva N.V., Baryshnikov M.P., Efimova Iu.Iu., Nikitenko O.A., Ishimov A.S., Gushchina M.S., Berezhnaia G.A. Strukturno-fazovye prevrashcheniia pri nepreryvnom okhlazhdenii vysokoprochnykh sredneuglerodistykh kompleksno-legirovannykh nizkootpushchennykh stalei // Teoriia i tekhnologiia metallurgicheskogo proizvodstva. – 2016. – № 1 (18). – S. 57-62.
9. Chukin M.V, Salganik V.M., Poletskov P.P., Denisov S.V., Kuznetsova A.S., Berezhnaia G.A., Gushchina M.S. Osnovnye vidy i oblasti primeneniia strategicheskogo vysokoprochnogo listovogo prokata // Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova. – 2014. – № 4. – S. 41 - 44.
10. Efron L. I. Formirovanie struktury i mekhanicheskikh svoistv konstruktsionnykh stalei pri termomekhanicheskoi obrabotke v potoke prokatnogo stana. IKS TsNIIChM // Stal'. – 1995. – №8. – 154 s.
11. Bernshtein M.L., Zaimovskii V.A., Kaputkina L.M. Termomekhanicheskaia obrabotka stali. M.: Metallurgiia, 1983. – 480 s.
12. Schastlivtsev V.M., Koptseva N.V., Artemova T.V. Elektronno-mikroskopicheskoe issledovanie struktury martensita v malouglerodistykh splavakh zheleza // Fizika metallov i metallovedenie. – 1976. – T. 41. – № 6. – S. 1251-1260.
13. Sadovskii V.D., Fokina E.A., Schastlivtsev V.M. Ostatochnyi austenit v zakalennoi stali.. M.: Nauka, 1986. – 111s.
14. Rodionov D.P., Schastlivtsev V.M., Stepanova N.N., Smirnov L.V. Forma martensitnykh kristallov v paketnom (reechnom) martensite // Fizika metallov i metallovedenie. – 1986. – T. 61. – № 1. – S. 115-120.
15. Smirnov M.A., Pyshmintsev I.Iu., Boriakova A.N. Klassifikatsiia mikrostruktur nizkouglerodistykh trubnykh stalei // Metallurg. – 2010. – №7. – S. 45-51.
16. Efron L.I., Il'inskii V.I., Morozov Iu.D., Golovanov A.V. Razrabotka i promyshlennoi oprobovanie trubnoi stali povyshennoi prochnosti i khladostoikosti s preimushchestvenno beinitnoi strukturoi // Ctal'. – 2003. – № 9. – S. 83–87.
17. Matrosov Iu.I. Razrabotka printsipov mikrolegirovaniia i rezhimov kontroliruemoi prokatki maloperlitnykh stalei dlia trub magistral'nykh gazoprovodov: Avtoref. dis.. na soiskanie uchenoi stepeni doktora tekhnicheskikh nauk. M.: – 1982. – 42 s.
18. Koptseva N.V., Chukin M.V., Nikitenko O.A. Use of the Thixomet pro software for quantitative analysis of the ultrafine-grain structure of low-and medium-carbon steels subjected to equal channel angular pressing//Metal Science and Heat Treatment. – 2012. – T. 54. – No. 7-8. – Page 387-392.
19. 19. Mirzaev D.A., Okishev K.Iu., Schastlivtsev V.M., Iakovleva I.L. Kinetika obrazovaniia beinita i paketnogo martensita. I. Uchet struktury paketa // Fizika metallov i metallovedenie. – 2000. – T. 90. – № 5. – S. 55-65.
20. Svishchenko V.V. Osobennosti fazovogo sostava produktov promezhutochnogo prevrashcheniia v stali 24Kh2NAch / Svishchenko V.V. , D.P. Cheprasov, A.A. Ivanovskii, Iu.A. Filatov. // Polzunovskii Vestnik. – 2005. – № 2 (ch. 2). – S. 95-97.
21. Metallography and Microstructures: ASM Handbook: ASM Int. – 2004. – Vol. 9. – 1184 p.
22. Bhadeshia, H.K. Bainite in Steels, 2nd ed. – London: Ins. of Materials, – 2001. – 454 p.
23. Popov A. A., Popova A. E. Izotermicheskie i termokineticheskie diagrammy raspada pereokhlazhdennogo austenita: spravochnik termista. M.: Mashgiz, 1961. – 430 s.

**Подрисуночные надписи**

Рис. 1. Микроструктура исследуемой стали после охлаждения со скоростью:

0,05 (*а*), 0,5 (*б*), 8 (*в*) и 75 (*г*) °С/с, х 500

Fig. 1. Microstructure of the investigated steel after cooling with the rate:

0,05 (a), 0,5 (b), 8 (v) and 75 (g) of °C/s with, x 500

Рис. 2. Особенности бейнита в стали после охлаждения со скоростями:

0,1 °С/с (*а*); 0,5 °С/с (*б*); 4 °С/с (*в*); 6 °С/с (*г*); 16 °С/с (*д*); 75 °С/с (*е*)

Fig. 2. Features of a bainite in steel after cooling with rates: 0,1 °C/s with (a); 0,5 °C/s (b); 4 °C/s (c); 6 °C/s (d); 16 °C/s (d); 75 °C/s with (е)

Таблица

Относительное количество структурных составляющих и твердость исследуемой стали при различных скоростях охлаждения

Table

Relative quantity of structural components and hardness of the investigated steel at various rates of cooling

Рис. 3. Термокинетическая диаграмма распада переохлажденного аустенита исследуемой стали

Fig. 3. The thermokinetic diagram of decay of the overcooled austenite of the investigated steel

1. \**Работа проведена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого с участием российского высшего учебного заведения (договор 03.G25.31.0235), а также базовой части Госудаоственного задания Минобрнауки РФ 2017-05ГЗ (согл. № 17.1.18.2412.01 от 09.01.2017 г., д.с. №1 от 25.01.2017 г.).* [↑](#footnote-ref-1)