

***О. А. Никитенко<sup>1\*</sup>, П. П. Полецков<sup>2</sup>, Н. В. Концева<sup>1</sup>, Ю. Ю. Ефимова<sup>1</sup>,  
Д. М. Чукин<sup>1</sup>, М. С. Гущина<sup>2</sup>***

<sup>1</sup>Научно-исследовательский сектор ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова», г. Магнитогорск

<sup>2</sup>ООО «Термодеформ – МГТУ», г. Магнитогорск

\* *olganikitenko@list.ru*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ВЫСОКОПРОЧНЫХ КОМПЛЕКСНО-ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ**

Установлены влияние различных скоростей охлаждения на структурно-фазовые превращения, положение критических точек, количественные параметры структуры и твердость, построены термокинетические диаграммы распада при непрерывном охлаждении переохлажденного аустенита в высокопрочных сталях. Даны рекомендации по выбору легирующего комплекса и скорости охлаждения импортозамещающего листового проката, обеспечивающие сочетание высокой прочности и достаточной ударной вязкости после закалки и низкого отпуска.

*Ключевые слова:* высокопрочные стали, исследовательский комплекс Gleeble 3500, термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита, структура, твердость, ударная вязкость.

***O. A. Nikitenko, P. P. Poletskov, N. V. Koptseva, Yu. Yu. Efimova,  
D. M. Chukin., M. S. Gushina***

## **THE STUDY OF COOLING RATE EFFECT ON THE MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES FORMATION IN HIGH-STRENGTH COMBINED-ALLOY STEELS**

The influence of different cooling rates on structural-phase transformation, position of critical points, quantitative parameters of structure and hardness and the thermokinetic diagrams of undercooled austenite decay during the continuous transformation cooling in high-strength steels was established. The recommendations on the choice of alloying complex and cooling rates of the sheet billets, provided a combination of high strength and sufficient toughness after quenching and low tempering were given.

*Keywords:* high-strength steels, research complex Gleeble 3500, thermokinetic diagrams of undercooled austenite decay, structure, hardness, impact strength.

В рамках выполнения комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого по инициативе ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО «ММК») с участием ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова» (ФГБОУ ВПО «МГТУ им Г. И. Носова»), разрабатывается инновационная технология производства импортозамещающего листового проката с уникальным комплексом механических свойств: прочность 700–2000 Н/мм<sup>2</sup>, твердость свыше 280 HB, удлинение не менее 8 % [1–2].

На данный момент актуальным является исследование влияния скорости охлаждения при термической обработке на структурные и фазовые превращения и свойства сталей с различной химической композицией с построением термокинетических диаграмм распада переохлажденного аустенита, что позволит корректировать режимы их термической обработки и обеспечивать требуемый уровень свойств.

Лабораторные эксперименты по выплавке, прокатке и термической обработке опытных образцов высокопрочных сталей с варьированием содержания марганца (изменение на 0,4 %), никеля (изменение на 2,0 %) относительно базового химического состава 0,3C–0,3Si–1,0Mn–1,0Cr–1,2Ni–0,7Mo с микролегированием V, Nb, Ti, В проведены в лабораторном комплексе ООО «Термодеформ-МГТУ».

Комплекс дилатометрических, металлографических исследований и испытаний механических свойств был выполнен в ЦКП НИИ Наносталей при ФГБОУ ВО «МГТУ им Г. И. Носова».

На комплекс Gleeble 3500 образцы стали диаметром 6 мм и длиной 80 мм переводили в аустенитное состояние нагревом в вакууме со скоростью 1 °C/с до 1000 °C/с последующей выдержкой в течение 15 мин. Охлаждение образцов осуществляли со скоростями от 1 до 10 °C/с. Критические точки стали определяли на основе дилатометрических испытаний, которые проводились на модуле Pocket Jaw комплекса.

Для микроанализа из образца по стандартной методике на линии пробоподготовки фирмы Buechler были приготовлены микрошлифы с использованием запрессовки образцов в смолу «Transoptic» на автоматическом прессе Simplimet 1000. Для выявления микроструктуры поверхность шлифа подвергалась травлению в 4 % растворе азотной кислоты в этиловом спирте методом погружения полированной поверхности в ванну с реактивом. Для выявления качественных и количественных характеристик структуры использовался оптический микроскоп Meiji Techno с применением системы компьютерного анализа изображений Thixomet PRO [3]. Микроструктура при увеличениях более 1000 крат исследовалась с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM 6490 LV во вторичных электронах.

Полученные опытные образцы высокопрочного листового проката после термической обработки (закалка + низкий отпуск) испытывали на растяжение в соответствии с ГОСТ 1497–84, на ударный изгиб образцов с V-образным надрезом в соответствии с ГОСТ 9454–78; измерение микротвердости проводились по ГОСТ 9450–76.

При малых скоростях охлаждения ( $1\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ ) в микроструктуре стали с повышенным на 0,4 % содержанием марганца наблюдается бейнит, небольшое количество мартенсита и небольшие участки феррита по границам зерен (рис. 1, а).

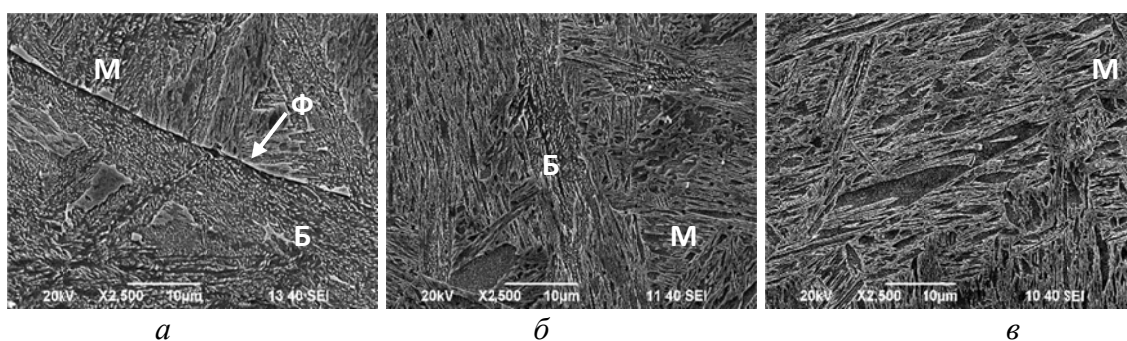


Рис. 1. Микроструктура стали с повышенным содержанием марганца после охлаждения со скоростями  $1\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  (а),  $3\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  (б) и  $5\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  (в)

При скорости охлаждения  $3\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  количество бейнита значительно уменьшается, участки феррита не наблюдаются, и преобладающей становится мартенситная составляющая (рис. 1, б). При более высоких скоростях охлаждения ( $5\text{--}10\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ ) микроструктура полностью состоит из мартенсита (рис. 1, в). Микротвердость образца, охлажденного со скоростью  $1\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ , составила 3941 МПа, при скорости охлаждения  $3\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  твердость повышается до 5379 МПа, а при скорости  $10\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  становится равной 5544 МПа.

На основе анализа результатов комплексного дилатометрического, металлографического анализов и измерения твердости были построены термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита исследуемых сталей (рис. 2). Установлено, что при охлаждении со скоростью  $1\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  распад переохлажденного аустенита начинается с выделения при температурах  $600\text{--}550\text{ }^{\circ}\text{C}$  небольшого количества избыточного феррита (рис. 2, б). При увеличении скорости охлаждения температура начала выделения феррита понижается, а его количество в структуре уменьшается и при скорости охлаждения более  $2\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  выделение феррита полностью подавляется. Диффузионной распад аустенита на феррито-карбидную смесь не происходит при всех исследуемых скоростях охлаждения. При скоростях охлаждения от 2 до  $5\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  реализуется распад переохлажденного аустенита по промежуточному механизму с образованием бейнита. При этом промежуточное (бейнитное) превращение происходит в интервале

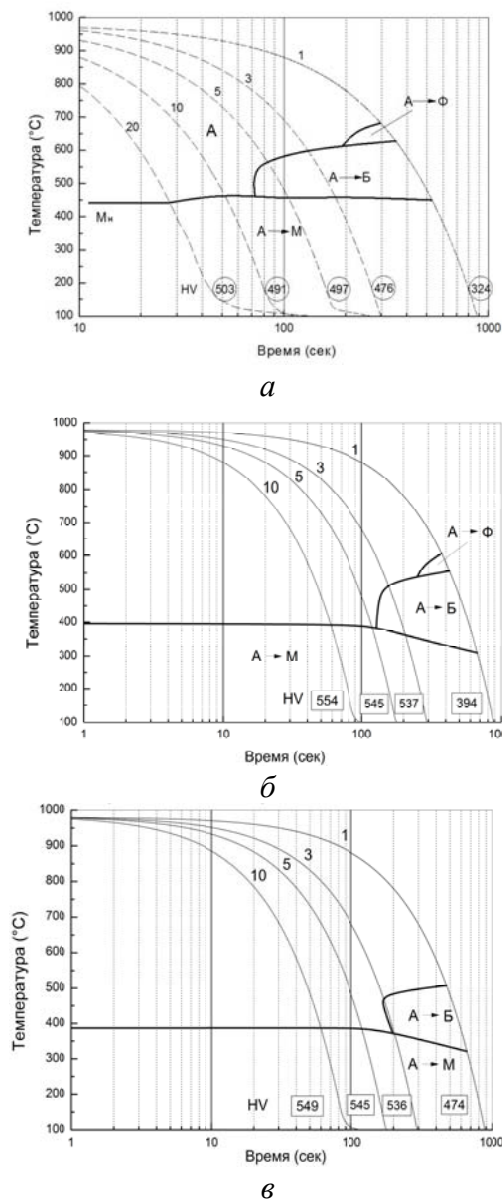


Рис. 2. Термокинетическая диаграмма распада переохлажденного аустенита стали базового химического состава (а), с повышенным содержанием марганца (б) и никеля (в)

3 °C/c в интервале 500–400 °C реализуется превращение переохлажденного аустенита по промежуточному механизму с образованием верхнего бейнита игольчатой морфологии, которое не идет до конца, и в структуре наблюдается мартенсит с небольшим количеством бейнита (рис. 3, а). При скорости охлаждения выше 3 °C/c подавляется также промежуточное превращение, происходит распад аустенита сдвиговым бездиффузионным путем и микроструктура полностью состоит из мартенсита (рис. 3, б, в). Микротвердость образца, охлажденного со скоростью 1 °C/c, составила 3941 МПа, со скоростью 3 °C/c – 5379 МПа и со скоростью 10 °C/c – 5544 МПа.

температур 600–400 °C, не идет до конца, поэтому непревращенный аустенит переохлаждается до температуры Мн и претерпевает бездиффузионное превращение, в результате чего в структуре наряду с бейнитом присутствует мартенсит. При скорости охлаждения более 5 °C/c промежуточное превращение подавляется и сдвиговым бездиффузионным путем и образуется только мартенситная составляющая (рис. 2, б).

Таким образом, дополнительное легирование марганцем приводит к повышению устойчивости переохлажденного аустенита, а верхняя критическая скорость заковки при этом снижается до 5 °C/c по сравнению с критической скоростью заковки базовой марки стали, которая составляет 8 °C/c (рис. 2, а).

Микроструктура стали с повышенным на 2,0 % содержанием никеля после охлаждения с различными скоростями приведена на рис. 3. Уже при малых скоростях охлаждения (1 °C/c) выделение феррита подавлено полностью. При скоростях охлаждения от 1 до

Таким образом, дополнительное легирование никелем также приводит к повышению устойчивости переохлажденного аустенита и значительному снижению критической скорости заковки до 3 °C/с.

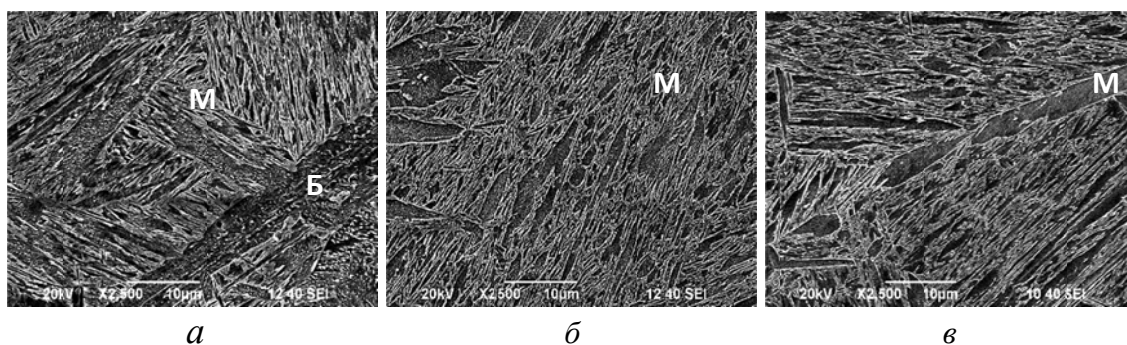


Рис. 3. Микроструктура стали с повышенным содержанием никеля после охлаждения со скоростями 1 (а), 3 (б) и 5 °C/с (в)

Ударная вязкость KCV<sup>-40</sup> базой марки стали составила 38 Дж/см<sup>2</sup>, стали с повышенным содержанием марганца – 35 Дж/см<sup>2</sup>, а никеля – 40 Дж/см<sup>2</sup>.

**Заключение.** Дополнительное легирование стали базового химического состава никелем привело к более значительному повышению устойчивости переохлажденного аустенита, снижению критической скорости заковки и некоторому повышению ударной вязкости по сравнению с дополнительным легированием марганцем.

*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 Государственного задания (согл. № 17.1.18.2412.01 от 09.01.2017 г., д.с. №1 от 25.01.2017 г.).*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Основные виды и области применения стратегического высокопрочного листового проката // М. В. Чукин [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2014. № 4. С. 41–44.
2. Физическое моделирование процессов производства горячекатаного листа с уникальным комплексом свойств / В. М. Салганик. [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2014. № 3. С. 37–39.
3. Koptseva N. V. 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 / N. V. Koptseva, M. V. Chukin, O. A. Nikitenko // Metal Science and Heat Treatment. 2012. Т. 54, № 7–8. С. 387–392.