

**Александра Александровна Куклина^{1,2}, Вера Вячеславовна Назарова¹,
Михаил Васильевич Майсурадзе^{1*}, Максим Александрович Рыжков¹**

¹ФГАОУ ВО Уральский Федеральный Университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация

²ФГБОУ ВО Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург,
Российская Федерация

**m.v.maisuradze@urfu.ru*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ПЕРЕОХЛАЖДЕННОГО АУСТЕНИТА В НИКЕЛЬСОДЕРЖАЩИХ СТАЛЯХ ПРИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ЗАКАЛКЕ

Проведено исследование низкоуглеродистых никельсодержащих машиностроительных сталей 18X2H4MA, 25X2H4MA и 23XH3MA. Дилатометрическим методом изучены особенности формирования бейнитной структуры при изотермической закалке. При помощи уравнения Остина-Риккета проанализирована экспериментальная кинетика изотермического бейнитного превращения. На основании анализа дилатометрических данных установлено количественное соотношение структурных составляющих, формирующихся в результате изотермической закалки исследуемых сталей.

Ключевые слова: сталь, изотермическая закалка, дилатометрия, термическая обработка, мартенсит, бейнит.

Aleksandra A. Kuklina^{1,2}, Vera V. Nazarova¹, Mikhail V. Maisuradze¹, Maksim A. Ryzhkov¹

¹Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation

²Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russian Federation

STUDY OF THE AUSTENITE TRANSFORMATION IN NICKEL- CONTAINING STEELS DURING AUSTEMPERING

A study of low-carbon nickel-containing engineering steels 18Cr2Ni4Mo, 25Cr2Ni4Mo and 23CrNi3Mo was carried out. The features of the formation of a bainite during austempering were studied using the dilatometric method. The experimental kinetics of isothermal bainite transformation is analyzed using the Austin-Rickett equation. A quantitative ratio of the microstructure components formed as a result of austempering was established based on the analysis of dilatometric data.

Key words: steel, austempering, dilatometry, heat treatment, martensite, bainite.

Низкоуглеродистые легированные цементуемые стали широко применяются в машиностроении для изготовления ответственных деталей [1]. Бейнито-мартенситная структура в таких сталях может формироваться как при

непрерывном охлаждении (например, при нормализации или конвективном охлаждении в потоке газа), так и при изотермической закалке [2]. Известно [3], что верхний бейнит в большинстве сталей обладает пониженной прочностью и вязкостью, поэтому его образование при термической обработке нежелательно. Нижний бейнит обычно обладает высокой ударной вязкостью при сохранении хорошей прочности, что обусловлено выделением дисперсных карбидных частиц внутри пластин α -фазы мартенситного типа.

В работе исследованы промышленные никельсодержащие стали 18X2H4MA, 25X2H4MA и 23XH3MA. Исследование превращений переохлажденного аустенита, протекающих при изотермической закалке, осуществлялось при помощи дилатометра LINSEIS L78 R.I.T.A. Нагрев образцов (диаметром 4 мм, длиной 10 мм) до температуры аустенитизации (880 °C) и выдержка (15 мин) производились в вакуумной камере дилатометра. Далее образцы охлаждались со скоростью 20 °C/с до температуры изотермической закалки (250, 300, 330, 370, 400, 430 °C), выдерживались при заданной температуре 3 ч, после чего производилось охлаждение до комнатной температуры.

В ходе экспериментов регистрировались превращения переохлажденного аустенита, происходящие при охлаждении от температуры аустенитизации до изотермической выдержки, во время выдержки и после изотермической выдержки при охлаждении до комнатной температуры. Были получены графики зависимости доли превращения переохлажденного аустенита от температуры (рис. 1), на которых можно наблюдать температурные интервалы образования структурных составляющих. Например, в случае проведения изотермической закалки стали 25X2H4MA при температуре выше M_n превращение переохлажденного аустенита начинается с образования бейнита (Б), а при последующем охлаждении после изотермической выдержки формируется обогащенный углеродом «вторичный» мартенсит (M2), характеризующийся пониженной температурой M_n по сравнению с исходным составом стали (рис. 1, а). В случае проведения изотермической закалки при температуре ниже M_n на графике наблюдается образование «первичного» мартенсита (M1) во время охлаждения до температуры изотермической выдержки, образование изотермического бейнита (Б) во время выдержки, а также образование небольшого количества «вторичного» мартенсита (M2) при охлаждении до комнатной температуры (рис. 1, б).

Данные графики позволили оценить количественное соотношение структурных составляющих, образующихся в исследуемых сталях после изотермической закалки при различных температурах (рис. 2). Как видно, наиболее обширная область образования бейнита на структурной диаграмме характерна для стали 23XH3MA, обладающей меньшей устойчивостью переохлажденного аустенита вследствие меньшего содержания легирующих элементов. Максимальное содержание бейнита в структуре каждой исследованной стали (около 80% для стали 18X2H4MA, более 95% для сталей 23XH3MA и 25X2H4MA) достигается только при температуре в районе M_n .

Стоит отметить резкое уменьшение количества «вторичного» мартенсита (не более 2...5 %) в структуре исследуемых сталей при понижении температуры изотермической закалки ниже M_n .

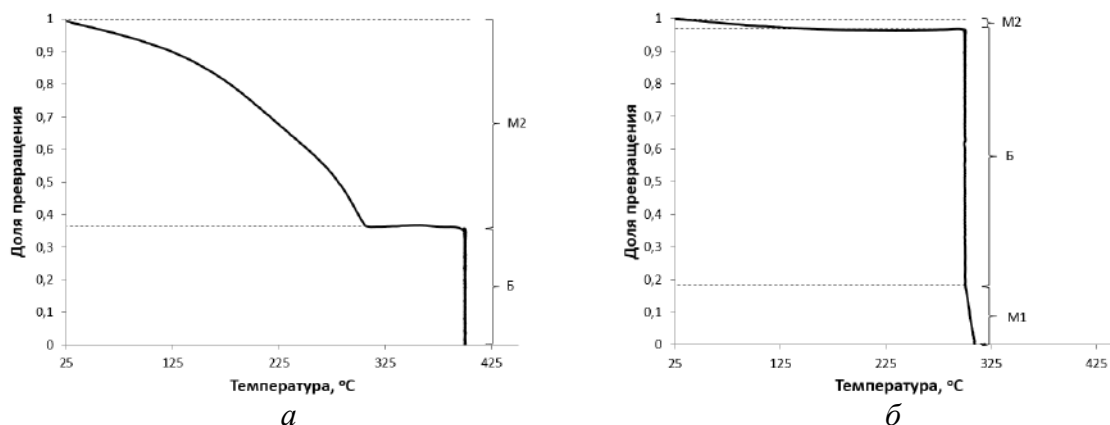


Рис. 1. Зависимость доли превращения переохлажденного аустенита в стали 25Х2Н4МА от температуры при изотермической закалке: а) температура выдержки 400 °С (выше M_n); б) температура выдержки 300 °С (ниже M_n)

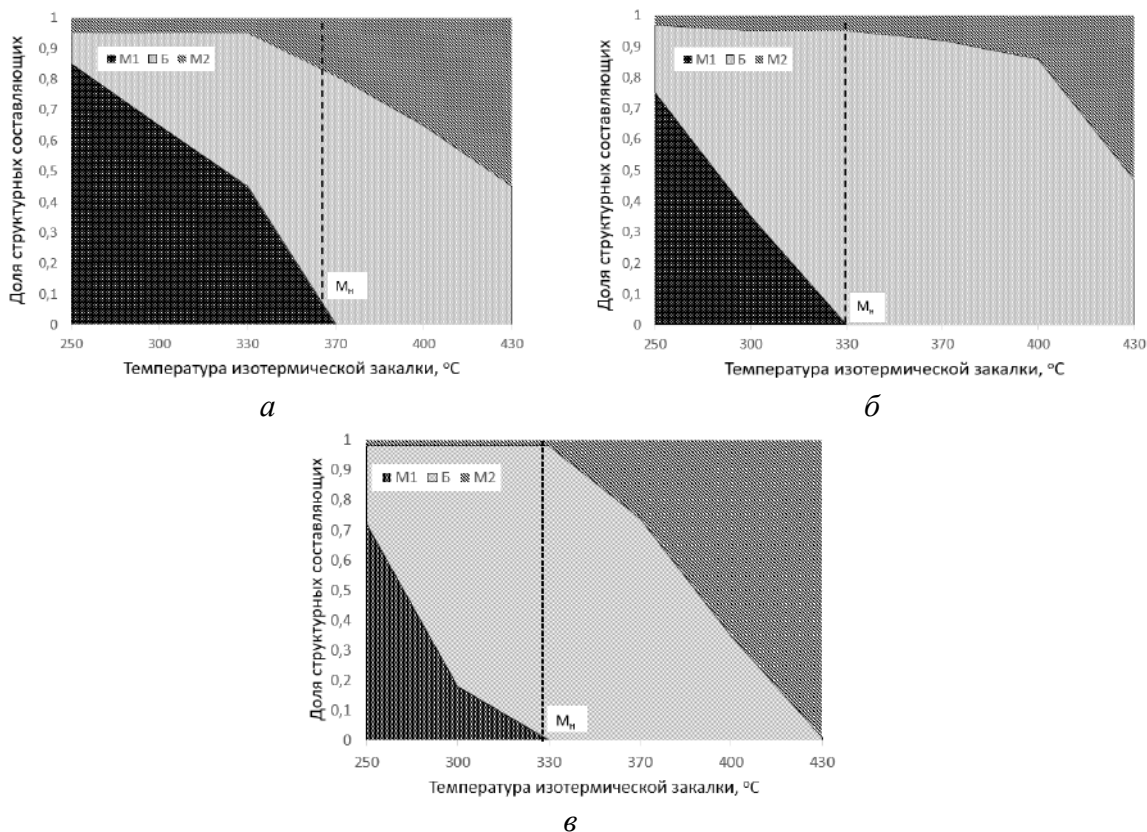


Рис. 2. Количественное соотношение структурных составляющих, формирующихся в сталях после изотермической закалки: а) 18Х2Н4МА; б) 25ХН3МА; в) 25Х2Н4МА

Кинетика изотермического бейнитного превращения в исследуемых сталях значительно зависит от температуры выдержки. В случае изотермической закалки при температуре ниже M_n , образование бейнита резко начинается в момент достижения температуры выдержки. При повышении температуры изотермической закалки выше точки M_n начальная стадия образования бейнита замедляется. Это связано с тем, что предварительно

образовавшийся «первичный» мартенсит служит готовой подложкой для формирующегося изотермического бейнита. Приостановка бейнитного превращения в сталях 18X2H4MA и 23XH3MA происходит через 1000...1500 с после начала изотермической выдержки, для стали 25X2H4MA – через 2500...3000 с. Однако при пониженных температурах (250 °С) бейнитное превращение продолжается в течение 3 ч и более.

Применение уравнения Остина-Риккета [4] для анализа кинетики образования бейнита показало резкое изменение характера бейнитного превращения с повышением температуры выдержки, которое наблюдается при температуре выше M_n . В температурной области мартенситного превращения значение коэффициента n составляет 1,0...1,5, в случае изотермического превращения при температуре выше M_n величина коэффициента n повышается до 2,0...2,5. Полученные температурные зависимости коэффициентов k и n имеют экстремум, приходящийся на температуру 400 °С для сталей 18X2H4MA и 25XH3MA и в температурный интервал 330...370 °С для стали 25X2H4MA. Наличие экстремума на температурной зависимости коэффициентов уравнения Остина-Риккета связано с изменением морфологии образующегося бейнита [5]: преимущественно верхний бейнит формируется при температуре выше экстремума, преимущественно нижний бейнит – при температуре ниже экстремума.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00106.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Liang X. The Effect on Carburizing Process on Microstructure and Properties of 20MnCr5 Gear Steel / X. Liang [и др.] // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1885. Article ID 022024. DOI: 10.1088/1742-6596/1885/2/022024.
2. Maisuradze M.V. Simulated and Experimental Study of Structure Formation upon Thermal Treatment of Steel 20Kh2G2SNMA / M.V. Maisuradze [и др.] // Steel in Translation. 2023. Vol. 53. №2. P. 176-184. DOI:10.3103/S0967091223020122.
3. Hajizad O. Influence of Microstructure on Mechanical Properties of Bainitic Steels in Railway Applications / Hajizad O. [и др.] // Metals. 2019. Vol. 9(7). Article ID 778. DOI: 10.3390/met9070778.
4. Starink M. J. Kinetic equations for diffusion-controlled precipitation reactions // Journal of Materials Science. 1997. Vol. 32. P. 4061-4070. DOI: 10.1023/A:1018649823542.
5. Maisuradze M.V. A Novel Approach for Analytical Description of the Isothermal Bainite Transformation in Alloyed Steels / M.V. Maisuradze, Yu.V. Yudin, A.A. Kuklina // Materials Performance and Characterization. 2019. Vol. 8. №2. P. 80-95. DOI: 10.1520/MPC20170168

REFERENCES

1. Liang X. The Effect on Carburizing Process on Microstructure and Properties of 20MnCr5 Gear Steel / X. Liang [и др.] // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1885. Article ID 022024. DOI: 10.1088/1742-6596/1885/2/022024.
2. Maisuradze M.V. Simulated and Experimental Study of Structure Formation upon Thermal Treatment of Steel 20Kh2G2SNMA / M.V. Maisuradze [и др.] // Steel in Translation. 2023. Vol. 53. №2. P. 176-184. DOI:10.3103/S0967091223020122.
3. Hajizad O. Influence of Microstructure on Mechanical Properties of Bainitic Steels in Railway Applications / Hajizad O. [и др.] // Metals. 2019. Vol. 9(7). Article ID 778. DOI: 10.3390/met9070778.
4. Starink M. J. Kinetic equations for diffusion-controlled precipitation reactions // Journal of Materials Science. 1997. Vol. 32. P. 4061-4070. DOI: 10.1023/A:1018649823542.
5. Maisuradze M.V. A Novel Approach for Analytical Description of the Isothermal Bainite Transformation in Alloyed Steels / M.V. Maisuradze, Yu.V. Yudin, A.A. Kuklina // Materials Performance and Characterization. 2019. Vol. 8. №2. P. 80-95. DOI: 10.1520/MPC20170168