

М. В. Майсурадзе^{*}, М. А. Рыжков

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург

^{*}*spirallog@gmail.com*

ПРОЯВЛЕНИЕ СТРУКТУРНОЙ ПОЛОСЧАТОСТИ В СТАЛИ 40ХН2МА ПРИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ВЫДЕРЖКЕ В БЕЙНИТНОЙ ОБЛАСТИ

Проведено исследование микроструктуры стали 40ХН2МА после изотермической обработки в бейнитной области превращения аустенита с разным временем выдержки от 15 до 1800 с. Определена доля образовавшегося бейнита, и построены гистограммы, показывающие соотношение количества бейнита в структурных полосах и вклад полос с различным содержанием бейнита в суммарное количество бейнита в стали. Установлено различие химического состава отдельных полос стали.

Ключевые слова: сталь, структурная полосчатость, изотермическая выдержка, бейнит.

M. V. Maisuradze, M. A. Ryzhkov

MICROSTRUCTURE BANDING IN 4340 STEEL AFTER THE ISOTHERMAL TREATMENT IN THE TEMPERATURE RANGE OF BAINITE TRANSFORMATION

The microstructure of 4340 steel is studied after isothermal treatment in the temperature range of the bainite transformation with holding times 15...1800 s. The fraction of the bainite is determined and histograms are plotted showing the amount of bainite in different microstructure bands and the contribution of the bands with different bainite content to the total amount of bainite in the steel. The difference in the chemical composition of individual microstructure bands is obtained.

Keywords: steel, microstructure banding, isothermal holding, bainite.

Структурная полосчатость является распространённым дефектом конструкционных сталей. Актуальность изучения данного явления объясняется тем, что анализ различных видов структурной полосчатости, количественное определение степени полосчатости микроструктуры, позволяет обеспечить надлежащий контроль качества изготавливаемой продукции. Объектом исследования является конструкционная легированная сталь 40ХН2МА, химический состав которой приведен в таблице.

Образцы исследуемой стали были нагреты до температуры аустенитизации 860 °С (продолжительность выдержки 40 мин.), после чего были помещены в расплав соли (50 % KNO₃, 50 % NaNO₃) с температурой 400 °С. Данная температура соответствует минимальному инкубационному периоду бейнитного превращения в стали 40ХН2МА, согласно данным, приведенным в литературе [1]. Изотермическая выдержка при температуре 400 °С производилась в течение 15...1000 с. После выдержки охлаждение образцов производилось в воде для того, чтобы непревращенный аустенит претерпел мартенситное превращение.

Таблица

Химический состав стали 40ХН2МА, масс. %

| C | Si | Mn | Cr | Ni | Mo | Cu | S | P |
|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| 0,40 | 0,20 | 0,54 | 0,69 | 1,27 | 0,18 | 0,22 | 0,009 | 0,011 |

Количественная оценка доли бейнита в структуре образца в целом и в отдельных структурных полосах производилась при помощи коммерческого программного обеспечения. Для каждого времени выдержки анализировалось не менее 15 полей зрения, на каждом из которых наблюдалось не менее 15...20 структурных полос с различным содержанием бейнита.

Для наглядного представления полученных результатов и оценки изменения кинетики бейнитного превращения в полосах с различной устойчивостью переохлажденного аустенита все полосы с различным содержанием бейнита были упорядочены в вариационный ряд по доле бейнита. Для каждой полосы была определена занимаемая ею площадь на фотографии, F_i , а также рассчитана ее относительная площадь, F_i' , по формуле (1):

$$F_i' = F_i/F_0, \quad (1)$$

где F_0 – суммарная исследованная площадь образца (в пикселях).

Впоследствии вариационный ряд, полученный для каждого времени выдержки, был разделен на 10 интервалов по относительной площади, занимаемой полосами. Таким образом, каждый из интервалов охватывал 10 % исследуемой площади образца. Для каждого интервала была определена средняя доля бейнита, содержащаяся в попавших в него полосах.

На рис. 1 приведена микроструктура стали 40ХН2МА после реализации изотермической выдержки при температуре 400 °С в течение различного времени выдержки. С увеличением времени выдержки при

температуре 400 °С средняя доля бейнита в исследуемой стали возрастает от 0,11 до 0,72. При этом в структуре наблюдается существенное различие в количестве образовавшегося бейнита в отдельных полосах. К примеру, в случае выдержки в течение 40 с, в отдельных полосах образуется до 0,85 бейнита, при этом также имеются полосы, в которых доля бейнита не превышает 0,05.

На рис. 2 приведено изменение доли бейнита в зависимости от времени выдержки в интервале 15...60 с. На данном графике представлена кинетика превращения в полосах с максимальной и минимальной устойчивостью переохлажденного аустенита. Как видно, разброс доли бейнита между отдельными полосами составляет 0,01...0,40 для времени выдержки 15 с и 0,07...0,94 для времени выдержки 60 с. То есть с увеличением времени выдержки в интервале 15...60 с наблюдается увеличение разброса доли бейнита в структуре полос исследуемой стали.

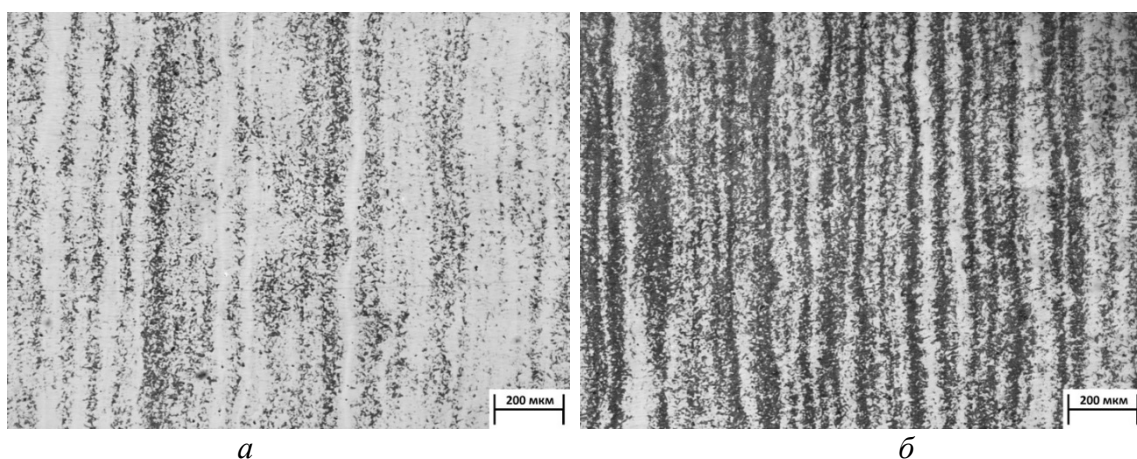


Рис. 1. Микроструктура стали 40ХН2МА после изотермической выдержки при температуре 400 °С в течение 25 с (а) и 40 с (б)

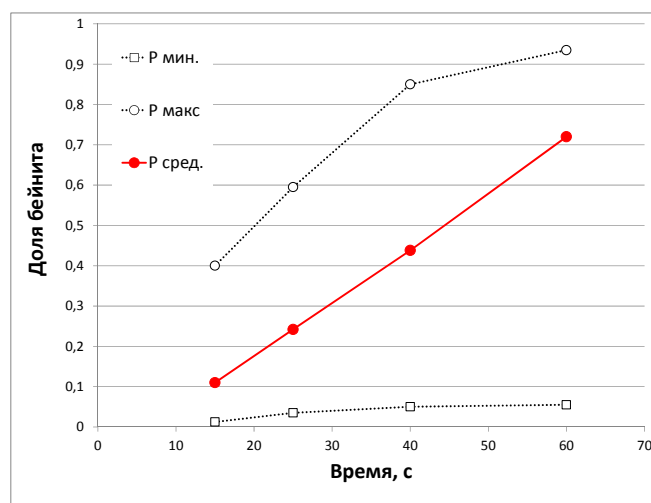


Рис. 2. Изменение доли бейнита в стали 40ХН2МА с течением времени изотермической выдержки при 400 °С

Статистический анализ полосчатой структуры показал, что средняя доля бейнита в стали не соответствует середине интервала разброса доли бейнита при любой продолжительности выдержки. Это связано с тем, что полосы с различным количеством бейнита занимают различную площадь на исследованной поверхности образца. На рис. 3 приведена зависимость доли бейнита от времени выдержки для десяти интервалов относительной площади, занимаемой полосами (P1...P10). Таким образом, каждому маркеру P1...P10 на рис. 3 соответствует 10 % от исследованной площади образца. Как видно, кинетика, соответствующая изменению средней доли бейнита в стали, наблюдается лишь для 10...30 % исследованной площади образца. В остальном объеме образца превращение идет с иной скоростью.

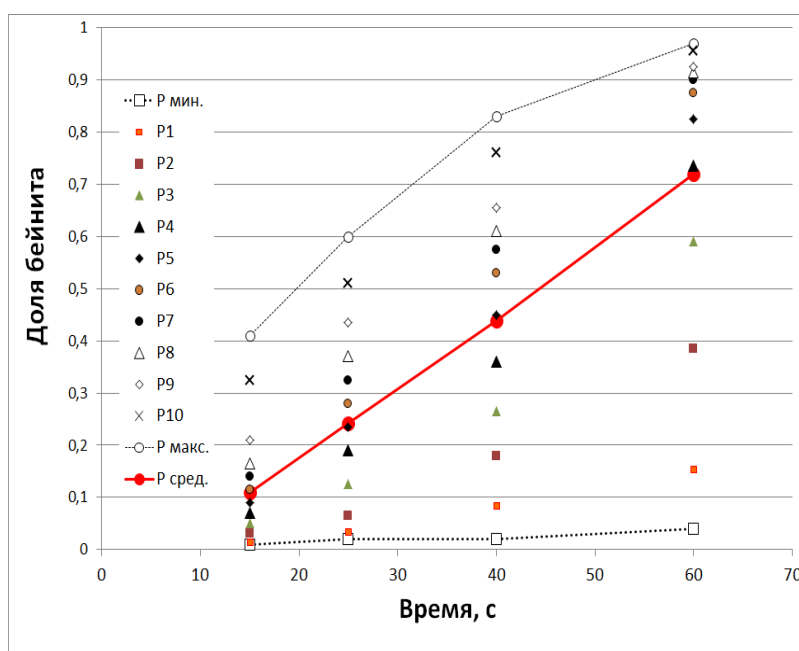


Рис. 3. Изменение доли бейнита в отдельных группах полос стали 40ХН2МА с течением времени изотермической выдержки (каждому маркеру P1...P10 соответствует 10 % от исследованной площади образца)

Был проведен микрорентгеноспектральный анализ полос, содержащих минимальное и максимальное количество бейнита после изотермической выдержки в течение 60 с. Всего было проанализировано 20 полос каждого типа. В результате установлено, что наибольший разброс имеют следующие легирующие элементы: Mn – 0,55...0,95 масс. %; Cr – 0,6...0,9 масс. %; Ni – 1,2...1,5 масс. %; Mo – 0,10...0,45 масс. %. Согласно литературным данным [2–4], в полосах, содержащих повышенное количество марганца и молибдена, также должно содержаться повышенное количество углерода.

Таким образом, на ширину интервала, в котором происходит изменение доли бейнита в отдельных полосах стали с течением времени,

оказывает непосредственное влияние химическая неоднородность, что также было отмечено ранее в работах [2, 3, 5, 6].

Учет влияния химической неоднородности на кинетику протекания превращений в сталях может существенно повысить адекватность расчетных методов моделирования процессов термической обработки изделий.

Работа выполнена в рамках Гранта Президента РФ для молодых ученых – кандидатов наук МК-7929.2016.8.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попова Л. Е. Диаграммы превращения аустенита в сталях и бета – растворах в сплавах титана / Л. Е. Попова, А. А. Попов. Москва : Металлургия, 1991. 503 с.
2. Krauss G. Solidification, segregation, and banding in carbon and alloy steels / G. Krauss // Metallurgical and Materials Transactions B. 2003. Vol. 34. № 6. P. 781–794.
3. Bastien P. G. The mechanism of formation of banded structures / P. G. Bastien // Journal of Iron and Steel Institute. 1957. Vol. 187. P. 281–291.
4. Microstructure and distribution of chemical elements in continuous-cast pipe blank / D. A. Silin [et al.] // Steel in Translation. 2006. Vol. 36. № 4. P. 86–90.
5. Verhoeven J. D. A review of microsegregation induced banding phenomena in steels / J. D. Verhoeven // Journal of Materials Engineering and Performance. 2000. Vol. 9. № 3. P. 286–291.
6. Grange R. A. Effect of microstructural banding in steel / R. A. Grange // Metallurgical Transactions. 1971. Vol. 2, № 2. P. 417–422.