

Вера Вячеславовна Назарова¹, Михаил Васильевич Майсурадзе^{1*}, Максим Александрович Рыжков¹

¹Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

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

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НИКЕЛЬСОДЕРЖАЩИХ СТАЛЕЙ

Изучены низкоуглеродистые стали 18Х2Н4МА, 25Х2Н4МА и 25ХН3МА. Исследовано влияние бейнитной структуры на механические свойства после изотермической закалки (в температурной области образования верхнего и нижнего бейнита) и после непрерывного охлаждения с разной интенсивностью (закалка в масле, охлаждение на спокойном воздухе, замедленное охлаждение в теплоизолированном контейнере). Определено количество остаточного аустенита после реализации разных вариантов термической обработки. Показано, что микроструктура, содержащая верхний бейнит, обладает пониженной ударной вязкостью, как по сравнению со смесью нижнего бейнита и мартенсита, так и по сравнению с полностью мартенситной структурой.

Ключевые слова: сталь, изотермическая закалка, мартенсит, бейнит, остаточный аустенит, механические свойства

Vera V. Nazarova, Mikhail V. Maisuradze, Maksim A. Ryzhkov

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

EFFECT OF HEAT TREATMENT ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF NICKEL-CONTAINING STEEL

Low-carbon steels 18Cr2Ni4Mo, 25Cr2Ni4Mo and 25CrNi3Mo were studied. The effect of the bainite on the mechanical properties after austempering (upper and lower bainite) and after continuous cooling with different intensities (oil quenching, still air cooling, slow cooling in a container) was studied. The amount of retained austenite was determined after different heat treatment. It has been shown that a microstructure containing upper bainite has reduced impact strength, both compared to a mixture of lower bainite and martensite, and compared to a completely martensitic structure.

Key words: steel, austempering, dilatometry, martensite, bainite, retained austenite, mechanical properties.

Бейнитная структура в легированных сталях может формироваться как при непрерывном охлаждении, так и при изотермической закалке [1...3]. В ряде работ показано [4, 5], что наилучший комплекс механических свойств стали достигается в случае формирования при термической обработке

смешанных бейнито-мартенситных структур. Однако в некоторых случаях формирование даже небольшого количества бейнита приводит к существенному снижению вязкостно-пластических свойств стали [6].

В работе исследованы промышленные никельсодержащие стали 18X2H4MA, 25X2H4MA и 25XH3MA. Образцы размером 15×15×70 мм нагревали до температуры аустенитизации 880 °С, выдерживали 60 мин. Непрерывное охлаждение производили в различных средах: закалочное масло И20А, спокойный воздух, теплоизолированных контейнер, заполненный чугуной стружкой. Средняя скорость охлаждения образцов, достигаемая в температурном интервале 200...500 °С, составила 25 °С/с при охлаждении в масле, 1 °С/с при охлаждении на спокойном воздухе, 0,2 °С/с при охлаждении в контейнере. При реализации изотермической закалки образцы после аустенитизации переносились в расплав соли (50% KNO₃ + 50% NaNO₃). Температура изотермической закалки составляла: для стали 18X2H4MA – 330 и 400 °С; для стали 25X2H4MA – 280 и 370 °С; для стали 25XH3MA – 280 и 400 °С. Время выдержки составляло 2 ч. Охлаждение после выдержки производилось в закалочном масле И20А. После термической обработки проводили отпуск для снятия напряжений (180 °С, 3 ч).

Условия проведения термической обработки, количественный состав микроструктуры (на основании данных дилатометрии и рентгеноструктурного анализа) и соответствующие механические свойства исследуемых сталей приведены в табл. 1.

Таблица 1

Состав микроструктуры и механические свойства после изотермической закалки исследуемых сталей*

Сталь	t, °С	P _Б	P _М	P _А	σ _{0,2} , МПа	σ _в , МПа	δ, %	ψ, %	KCV, МДж/м ²	KCV/ KCV _(М)
Верхний бейнит + М2										
18X2H4MA	400	0,58	0,31	0,11	1100	1325	12,0	57,9	0,8	0,75
25XH3MA	400	0,77	0,14	0,09	90	1260	12,5	49,7	0,4	0,68
25X2H4MA	370	0,65	0,21	0,14	1050	1375	12,0	43,8	0,5	0,98
Нижний бейнит + М1 (P _{М2} = 0,02...0,05)										
18X2H4MA	330	0,47	0,42	0,06	950	1220	14,0	61,3	1,3	1,24
25XH3MA	300	0,58	0,34	0,04	1255	1465	12,5	62,9	0,6	1,00
25X2H4MA	300	0,78	0,17	0,03	1200	1440	13,0	58,7	0,6	1,25

*Примечание: М1 – «первичный» мартенсит; М2 – «вторичный» мартенсит; P_Б – доля бейнита; P_М – суммарная доля мартенсита; P_А – доля остаточного аустенита; KCV/KCV_(М) – отношение ударной вязкости смешанной структуры, содержащей бейнит, к ударной вязкости полностью мартенситной структуры (табл. 2).

Полученные результаты показывают, что микроструктура, содержащая верхний бейнит, обладает пониженной ударной вязкостью, как по сравнению

со смесью нижнего бейнита и «первичного» мартенсита, так и по сравнению с полностью мартенситной структурой после закалки в масло (табл. 2): отношение $KCV/KCV_{(M)} < 1$. Формирование нижнего бейнита в сталях 18X2H4MA и 25X2H4MA приводит к повышению ударной вязкости на 25% относительно полностью мартенситной структуры, несмотря на то, что количество остаточного аустенита, в этом случае составляет всего 3...6 %, что в 2...4 раза меньше, чем при образовании верхнего бейнита (9...14 %). Более высокое содержание остаточного аустенита в смешанной структуре верхнего бейнита и «вторичного» мартенсита не приводит также и к ожидаемому повышению пластичности стали. Это связано с образованием крупных карбидов в процессе образования верхнего бейнита и с образованием обогащенного углеродом «вторичного» мартенсита, вязкость которого ниже, чем у низкоуглеродистого мартенсита.

Таблица 2

Механические свойства исследуемых сталей после охлаждения от температуры аустенитизации 880 °С в различных средах

Сталь	Среда охлаждения	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	KCV, МДж/м ²	R _A
18X2H4MA	Масло	1234	1423	12,9	62,3	1,0	0,04
	Воздух	1097	1381	14,3	63,8	1,1	0,05
	Контейнер	983	1214	14,5	62,1	1,4	0,10
25XH3MA	Масло	1361	1588	12,8	60,1	0,6	0,05
	Воздух	1192	1440	13,1	60,0	0,7	0,06
	Контейнер	961	1246	13,6	51,0	0,4	0,09
25X2H4MA	Масло	1403	1632	11,7	55,3	0,5	0,04
	Воздух	1342	1648	10,7	48,7	0,4	0,06
	Контейнер	1306	1520	11,1	52,8	0,5	0,10

Уменьшение интенсивности закалочного охлаждения от 25 °С/с до 0,2 °С/с для сталей с содержанием углерода более 0,24 масс. % приводит либо к снижению ударной вязкости (25XH3MA), либо практически не влияет на ее величину (25X2H4MA). Это определяется количеством верхнего бейнита, формирующегося в стали при охлаждении. Несмотря на то, что в стали 18X2H4MA при замедленном охлаждении в теплоизолированном контейнере формируется верхний бейнит, тем не менее, уровень ударной вязкости (1,4 МДж/м²) выше, чем после закалки в масло (1,0 МДж/м²) и после изотермической закалки в температурной области верхнего бейнита (0,8 МДж/м²). Сталь 18X2H4MA содержит наименьшее количество углерода среди исследованных сталей, вследствие чего даже верхний бейнит данной

стали обладает более высокой ударной вязкостью, чем нижний бейнит в сталях 25X2H4MA и 25XH3MA.

Сталь 25X2H4MA, обладающая наибольшей устойчивостью переохлажденного аустенита, и не склонная к формированию значимого количества верхнего бейнита при замедленном охлаждении, обеспечивает стабильный комплекс вязкостно-прочностных свойств в широком диапазоне интенсивности охлаждения.

При сравнении механических свойств в координатах «прочность – вязкость» (рис. 1) наблюдается тенденция к повышению ударной вязкости сталей с понижением прочности. Однако в случае стали 25XH3MA после замедленного охлаждения в контейнере и после изотермической заковки при температуре 400 °С (во всех случаях в структуре данной стали формируется верхний бейнит) понижается одновременно и прочность, и ударная вязкость. Таким образом, образование верхнего бейнита в сталях неоднозначно влияет на показатели ударной вязкости: в стали 18X2H4MA наличие верхнего бейнита наряду с нижним бейнитом приводит к повышению ударной вязкости; в стали 25XH3MA – к снижению.

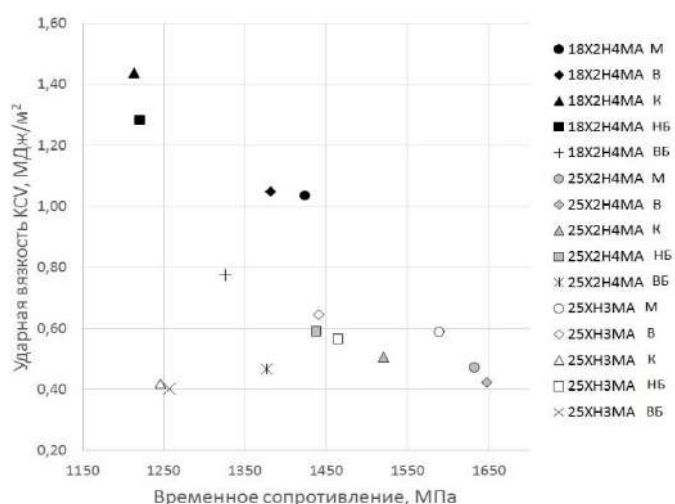


Рис. 1. Диаграмма механических свойств, полученных в результате термической обработки исследуемых сталей (прочность – ударная вязкость) (М – охлаждение в масле; В – охлаждение на спокойном воздухе; К – охлаждение в теплоизолированном контейнере; НБ – изотермическая заковка в области нижнего бейнита; ВБ – изотермическая заковка в области верхнего бейнита)

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

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Caballero F.G. Influence of bainite morphology on impact toughness of continuously cooled cementite free bainitic steels / F.G. Caballero [и др.] // Materials Science and Technology. 2012. Vol. 28(1). P. 95-102. DOI: 10.1179/1743284710Y.0000000047.

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. Zhu J.G. Bainite Transformation-Kinetics-Microstructure Characterization of Austempered 4140 Steel / J.G. Zhu [и др.] // *Metals*. 2020. Vol. 10(2). Article ID 236. DOI: 10.3390/met10020236.
4. Abbaszadeh K. Effect of Bainite Morphology on Mechanical Properties of the Mixed Bainite-martensite Microstructure in D6AC Steel / K. Abbaszadeh, H. Saghafian, S. Kheirandish // *Journal of Materials Science & Technology*. 2012. Vol. 28(4). P. 336-342. DOI: 10.1016/S1005-0302(12)60065-6.
5. Yao Z. Microstructure and Wear Properties of a Bainite/Martensite Multi-phase Wear Resistant Steel / Z. Yao [и др.] // *ISIJ International*. 2021. Vol. 61(1). P. 434-441. DOI: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-327.
6. Maisuradze M.V. Effect of Heat Treatment on Mechanical Properties and Microstructure of Advanced High-Strength Steel / M.V. Maisuradze [и др.] // *Metal Science and Heat Treatment*. 2023. Vol. 64. № 9-10. P. 565-571. DOI: 10.1007/s11041-023-00845-x

REFERENCES

1. Caballero F.G. Influence of bainite morphology on impact toughness of continuously cooled cementite free bainitic steels / F.G. Caballero [et al.] // *Materials Science and Technology*. 2012. Vol. 28(1). P. 95-102. DOI: 10.1179/1743284710Y.0000000047.
2. Maisuradze M.V. Simulated and Experimental Study of Structure Formation upon Thermal Treatment of Steel 20Kh2G2SNMA / M.V. Maisuradze [et al.] // *Steel in Translation*. 2023. Vol. 53. №2. P. 176-184. DOI:10.3103/S0967091223020122.
3. Zhu J.G. Bainite Transformation-Kinetics-Microstructure Characterization of Austempered 4140 Steel / J.G. Zhu [et al.] // *Metals*. 2020. Vol. 10(2). Article ID 236. DOI: 10.3390/met10020236.
4. Abbaszadeh K. Effect of Bainite Morphology on Mechanical Properties of the Mixed Bainite-martensite Microstructure in D6AC Steel / K. Abbaszadeh, H. Saghafian, S. Kheirandish // *Journal of Materials Science & Technology*. 2012. Vol. 28(4). P. 336-342. DOI: 10.1016/S1005-0302(12)60065-6.
5. Yao Z. Microstructure and Wear Properties of a Bainite/Martensite Multi-phase Wear Resistant Steel / Z. Yao [et al.] // *ISIJ International*. 2021. Vol. 61(1). P. 434-441. DOI: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-327.
6. Maisuradze M.V. Effect of Heat Treatment on Mechanical Properties and Microstructure of Advanced High-Strength Steel / M.V. Maisuradze [et al.] // *Metal Science and Heat Treatment*. 2023. Vol. 64. № 9-10. P. 565-571. DOI: 10.1007/s11041-023-00845-x