

УДК 669.15

М. В. Майсурадзе^{1*}, А. А. Куклина¹, Д. И. Лебедев^{1,2}, А. А. Леонтьева¹

¹ Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

² Институт физики металлов им. М. Н. Михеева, г. Екатеринбург

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

СТАБИЛИЗАЦИЯ ОСТАТОЧНОГО АУСТЕНИТА ПРИ БЕЙНИТНОМ ПРЕВРАЩЕНИИ В СТАЛИ 25Г2С2Н2МА

Исследованы особенности формирования верхнего и нижнего бейнита в стали 25Г2С2Н2МА (HY-TUF). Определено количество остаточного аустенита в формируемой микроструктуре, а также содержание в нем углерода. Показано, что с понижением температуры превращения количество углерода в остаточном аустените возрастает согласно концентрационной зависимости температуры T_0 , определяющей условия приостановки бейнитного превращения.

Ключевые слова: сталь, термическая обработка, бейнит, остаточный аустенит, изотермическая закалка

M. V. Maisuradze, A. A. Kuklina, D. I. Lebedev, A. A. Leont'eva

STABILIZATION OF THE RETAINED AUSTENITE DURING THE BAINITE TRANSFORMATION IN HY-TUF STEEL

The isothermal bainite transformation in HY-TUF steel was studied. The amount of the retained austenite in the microstructure was determined. The carbon content in the retained austenite was calculated. The decrease of the transformation temperature led to the increase of the carbon content in the retained austenite according to the theoretical T_0 dependence.

Key words: steel, heat treatment, bainite, retained austenite, isothermal holding

Исследуемая сталь HY-TUF (масс. %: С — 0,24; Cr — 0,31; Mn — 1,35; Si — 1,42; Ni — 1,71; Mo — 0,40 [1]) подвергалась изотермической закалке в температурном интервале 300...490 °С.

Исследование микроструктуры показало, что с изменением температуры изотермической выдержки происходит изменение морфологии

образующегося бейнита: нижний бейнит с тонкопластинчатым строением формируется при температуре 370 °С и ниже; верхний бейнит, состоящий из массивных пластин α -фазы — в температурном диапазоне 370...490 °С. Микроструктура, полученная после изотермической закалки ниже температуры M_n (при 300...330 °С), содержит кроме нижнего бейнита также пакеты «первичного» мартенсита, образовавшегося при охлаждении до температуры выдержки. Рентгеноструктурный фазовый анализ также показал наличие 10...15 % остаточного аустенита в микроструктуре исследуемой стали после изотермической закалки в изучаемом интервале температур.

Исследование механических свойств изотермически обработанной стали НУ-TUF указывает на изменение морфологии бейнита, при температуре 370...400 °С. Ударная вязкость верхнего бейнита, образовавшегося в результате изотермической выдержки при температуре 400 ...430 °С, оказалась низкой (0,15 ...0,20 МДж/м²), несмотря на значительное содержание остаточного аустенита (10...15 %). Снижение температуры изотермической выдержки до 370 °С обеспечило более высокую ударную вязкость (0,75 МДж/м²) вследствие появления в структуре нижнего бейнита. Однако прочность при этом уменьшилась с 1300 ...1400 МПа (при температуре выдержки 400 ...430 °С) до 1180 МПа. Снижение прочности обусловлено более полным протеканием бейнитного превращения при температуре 370 °С и, как следствие, меньшим количеством мартенсита в структуре стали после окончательного охлаждения.

Причина низкой ударной вязкости верхнего бейнита заключается в пониженном содержании углерода в остаточном аустените. Рентгеноструктурный анализ показал, что параметр решетки остаточного аустенита после изотермической выдержки при температуре 430 °С составляет 3,5951 Å, а после превращения при температуре 370 °С — 3,6055 Å. Согласно уравнению (1) [2], данные значения параметра решетки аустенита соответствуют содержанию в нем углерода 1,04 мас. % (для 430 °С) и 1,24 мас. % (для температуры 370 °С):

$$a_\gamma = 3,5467 + 0,0467c_\gamma, \quad (1)$$

где a_γ — параметр решетки, Å; c_γ — концентрация углерода, мас. %.

Полученное содержание углерода в остаточном аустените объясняется термодинамическими условиями процесса образования бейнита в исследуемой стали. В результате расчета, произведенного по методике [3] для стали НУ-TUF, определена концентрационная зависи-

мость температуры T_0 , характеризующая условие приостановки бейнитного превращения при изотермической выдержке. Расчет показал, что при температуре изотермической выдержки $430\text{ }^\circ\text{C}$ бейнитное превращение приостанавливается, когда концентрация углерода в непревращенном аустените увеличивается до $1,05\text{ мас. \%}$, а при температуре $370\text{ }^\circ\text{C}$ — до $1,23\text{ мас. \%}$. Полученные расчетные значения концентрации углерода в остаточном аустените идеально совпадают с экспериментальными данными.

Содержание углерода в непревращенном аустените определяет степень его стабилизации при комнатной температуре. В случае низкой концентрации углерода в аустените его стабильность оказывается невысокой, вследствие чего хрупкий высокоуглеродистый мартенсит образуется как при охлаждении от температуры изотермической выдержки, так и при невысоких нагрузках в процессе деформации. На рис. приведены дилатометрические кривые, зафиксированные при охлаждении образцов стали НУ-TUF после окончания изотермической выдержки.

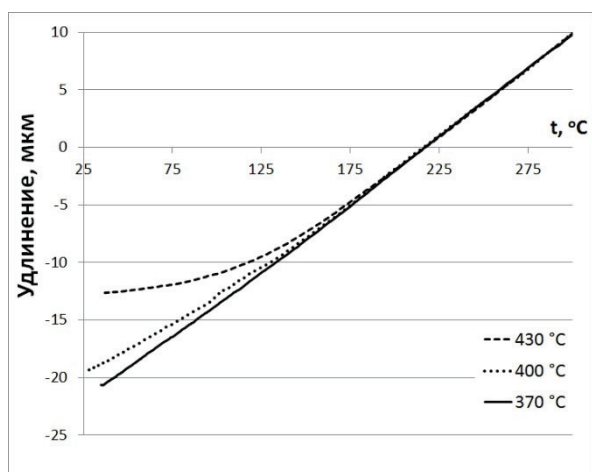


Рис. Зависимость удлинения от температуры при охлаждении образцов стали НУ-TUF после окончания изотермической выдержки

Видно, что в процессе охлаждения после изотермической выдержки при температуре $430\text{ }^\circ\text{C}$ образуется значительное количество мартенсита. Это связано с недостаточным содержанием углерода в непревращенном аустените для понижения температуры M_n до комнатной. При охлаждении с температуры изотермической выдержки $370\text{ }^\circ\text{C}$ не наблю-

дается отклонений от линейной зависимости удлинение—температура. Таким образом, изотермическое превращение при температуре 370 °С приводит к обогащению остаточного аустенита углеродом, достаточному для его стабилизации при комнатной температуре.

Литература

1. Майсурадзе М. В., Юдин Ю. В., Куклина А. А. Повышение ударной вязкости при формировании бейнитной структуры в высокопрочной стали HY-TUF // *Металлург*. 2019. № 8. С. 69–76.
2. Effects of Volume Fraction and Stability of Retained Austenite on Ductility of TRIP-aided Dual-phase Steels / K. Sugimoto, N. Usui, M. Kobayashi, S. Hashimoto // *ISIJ International*. 1992. V. 32. № 12. P. 1311–1318.
3. Bhadeshia H., R. Honeycombe *Steels: Microstructure and Properties*. Elsevier Ltd., 2017. 488 p.