

Юлия Владимировна Калетина^{1*}, Андрей Юрьевич Калетин¹

¹Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

*kaletina@imp.uran.ru

РЕВЕРТИРОВАННЫЙ АУСТЕНИТ В СТРУКТУРЕ МАРТЕНСИТНОСТАРЕЮЩЕЙ СТАЛИ

Исследована структура и свойства стали 03X11H8M2Ф после закалки и нагрева в межкритический интервал температур. Показано влияние температуры нагрева и времени выдержки в межкритической области, внешних воздействий (термоциклической обработки, длительного отпуска) на структуру, количество и устойчивость ревертированного аустенита и свойства стали. Установлено, что ревертированный аустенит наиболее стабилен при температурах 620-660°C. Показано, что при одинаковой прочности стали закалка из межкритического интервала температур позволяет существенно повысить ударную вязкость по сравнению с закалкой на мартенсит.

Ключевые слова: мартенситностареющие стали, структура, мартенсит, ревертированный аустенит, ударная вязкость.

Yulia V. Kaletina, Andrey Yu. Kaletin

REVERTED AUSTENITE IN THE STRUCTURE OF MARAGING STEEL

The structure and properties of 03Kh11N8M2F steel after quenching and heating in the intercritical temperature range were investigated. The influence of the heating temperature and holding time in the intercritical region, external effects (thermal cycling treatment, long-term tempering) on the structure, amount and stability of reverted austenite and the properties of steel was shown. It was established that reverted austenite is most stable at temperatures of 620-660 °C. It was shown that with the same strength of steel, quenching from the intercritical temperature range allows to significantly increase the impact toughness compared to martensite quenching.

Key words: maraging steels, structure, martensite, reverted austenite, impact toughness.

Мартенситностареющие стали широко используются в различных отраслях специального машиностроения, при производстве ответственных изделий, требующих сочетания высокой прочности, надежности и хорошей ударной вязкости, например, в прецизионных деталях аэрокосмической техники и компонентах ядерных реакторов [1-3]. Для повышения

хладостойкости и ударной вязкости малоуглеродистых сталей разрабатываются режимы закалки из межкритического интервала температур, которые обеспечивают получение в структуре большого количества ревертированного аустенита [4]. Эффективность закалки стали из межкритического интервала температур в значительной степени зависит от состава стали и режима термообработки.

В мартенситностарееющей стали 03X11H8M2Ф в результате разной термообработки (закалки от 950 °С в воде и нагрева в межкритическую область) получено два состояния, различающиеся фазовым составом, соответственно с мартенситной и мартенситно-аустенитной структурой.

После закалки от 950 °С в воде исследуемая сталь имеет мартенситную структуру с небольшим (2–5 %) количеством остаточного аустенита, который обычно располагается в виде тонких прослоек вдоль границ реек мартенсита (рис. 1).

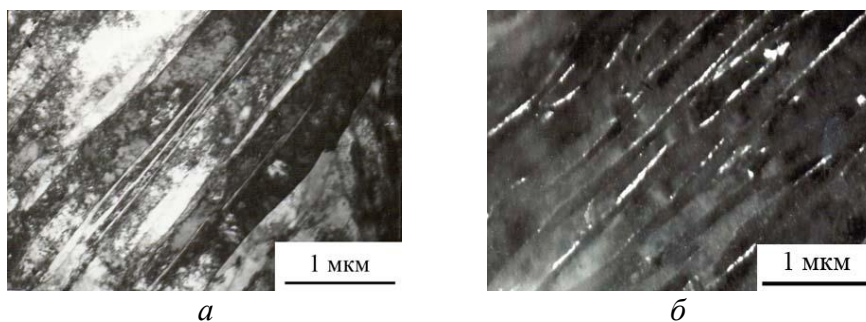


Рис. 1. Структура стали 03X11H8M2Ф после закалки от 950 °С в воде: а – светлпольное изображение; б – темнопольное изображение в рефлексе 200_γ.

Закалка из межкритического интервала существенно изменяет фазовый состав стали, по сравнению с закалкой от высоких температур. Кинетику образования аустенита исследовали при нагреве закаленной на мартенсит стали 03X11H8M2Ф в область межкритического интервала температур от 560 до 740 °С.

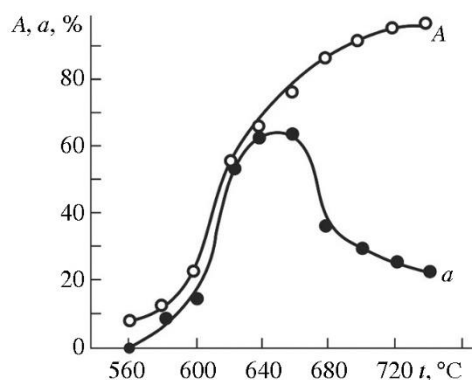


Рис. 2. Зависимость количества остаточного аустенита в стали 03X11H8M2Ф от температуры нагрева: A – количество аустенита, образовавшегося при определенной температуре нагрева; a – количество аустенита, сохранившегося при охлаждении до комнатной температуры.

Количество аустенита, образовавшегося при температуре аустенитизации, с повышением температуры нагрева монотонно увеличивается (рис. 2). После закалки от 950 °С и последующего нагрева в межкритический интервал 560-740 °С структура стали характеризуется наличием большого количества остаточного (ревертированного) аустенита. Количество ревертированного аустенита изменяется по более сложной экстремальной кривой с максимумом около 640 °С (см. рис. 2). Это связано как с устойчивостью образовавшегося аустенита, так и с его количеством [4].

Электронно-микроскопические исследования показали, что кристаллы ревертированного аустенита имеют разную форму (рис. 3). Они могут быть неправильной, полиэдрической формы, а могут иметь вид довольно широких прослоек, которые занимают значительную долю объема (рис. 3, в).

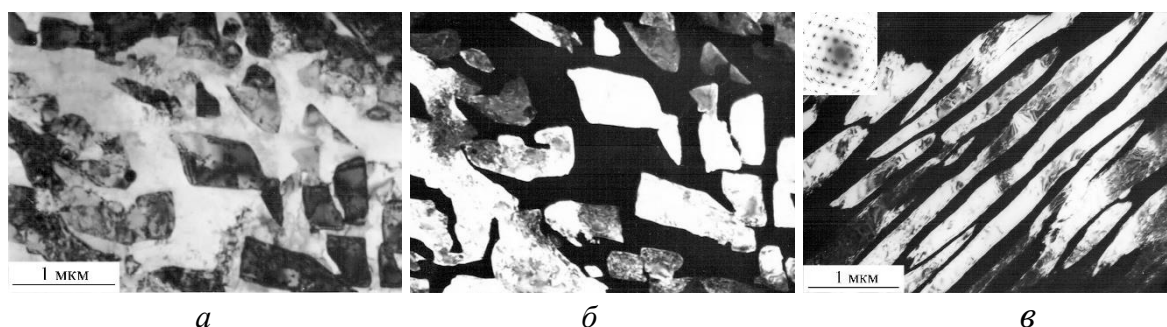


Рис. 3. Структура стали 03X11H8M2Ф после закалки из межкритического интервала температур от 660 °С, 1 ч, вода (предварительная обработка - закалка от 950 °С):

а – светлопольное изображение; *б, в* – темнопольное изображение в рефлексе аустенита (200)_γ.

Устойчивость ревертированного аустенита в стали 03X11H8M2Ф, полученного после закалки из $\alpha+\gamma$ области, изучали при термоциклировании и длительном отпуске.

По данным магнитометрического анализа было показано, что однократная и многократная термоциклическая обработка, заключающаяся в нагреве на 450 °С и последующем охлаждении до температуры -196 °С, а также длительный отпуск при 450 °С (до 100 ч) не приводят к превращению ревертированного аустенита. Количество аустенита, полученного при оптимальном режиме термообработки, после циклической обработки, а также длительного отпуска не изменяется и составляет приблизительно 40 %.

Показано, что в равнопрочном состоянии (с $\sigma_B \sim 1100$ МПа) сталь 03X11H8M2Ф с двухфазной мартенсито-аустенитной структурой, содержащей до 40 % ревертированного аустенита, имеет более высокие значения ударной вязкости при отрицательных температурах (1.0 МДж/м²), по сравнению со сталью той же прочности с чисто мартенситной структурой (0.65 МДж/м²). В стали с ревертированным аустенитом однократная и многократная термоциклическая обработка практически не приводят к падению ударной вязкости, и она сохраняется на уровне 1.0 МДж/м². Ударная вязкость стали, предварительно закаленной от 950 °С, после термоциклирования существенно уменьшается и составляет 0.2-0.3 МДж/м², что в 3 раза меньше ударной

вязкости образцов, закаленных из межкритического интервала. Эти преимущества реализуются только в условиях, когда аустенит стабилен. Опыты показали, что если ревертированный аустенит мало стабилен и превращается при испытаниях, то вязкие свойства падают.

Оценка термической и деформационной устойчивости аустенита показала, что стабильность ревертированного аустенита во многом определяется температурой и выдержкой в двухфазной области.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБНАУКИ России (темы «Структура» г.р. № 122021000033-2 и «Давление» г.р. № 122021000032-5).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Rosenauer A. Influence of delta ferrite on the impact toughness of a PH 13-8 Mo maraging steel / A. Rosenauer [et al] // Mater. Sci. Eng. A-Struct. Mater. Prop. Microstruct. Process. 2022. V. 856. P. 144024.
2. Schnitzer R. Reverted austenite in PH 13-8 Mo maraging steels / R.Schnitzer [et al] // Materials Chemistry and Physics. 2010. V.122. P. 138–145.
3. Jacob K. Suppression of Reverted Austenite in Cold-Rolled Maraging Steels and Its Impact on Mechanical Properties / K. Jacob [et al] // Metallurgical and Materials Transactions A. 2023. V. 54A. № 12. P. 4976-4993.
4. Счастливцев В.М. Остаточный аустенит в легированных сталях / В. М. Счастливцев, Ю. В. Калетина, Е. А. Фокина. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2014. 236 с.

REFERENCES

1. Rosenauer A. Influence of delta ferrite on the impact toughness of a PH 13-8 Mo maraging steel / A. Rosenauer [et al] // Mater. Sci. Eng. A-Struct. Mater. Prop. Microstruct. Process. 2022. V. 856. P. 144024.
2. Schnitzer R. Reverted austenite in PH 13-8 Mo maraging steels / R.Schnitzer [et al] // Materials Chemistry and Physics. 2010. V.122. P. 138–145.
3. Jacob K. Suppression of Reverted Austenite in Cold-Rolled Maraging Steels and Its Impact on Mechanical Properties / K. Jacob [et al] // Metallurgical and Materials Transactions A. 2023. V. 54A. № 12. P. 4976-4993.
4. Schastlivtsev V. M. Restaned austenite in alloy steels / V. M. Schastlivtsev, Yu. V. Kaletina, E. A. Fokina. Yekaterinburg: UBRAS. 2014. 236 p.