

## Влияние термической обработки на свойства литой мартенситно-старееющей стали

Магистрант Франчук А.А., студент группы 10404120 Ткач Н.В.  
Научные руководители Рудницкий Ф.И., Шаршнева Д.В.  
Белорусский национальный технический университет  
г. Минск

Мартенситностареющие стали – это сплавы с никелем, кобальтом и другими карбидообразующими элементами, которые придают сталям высокий комплекс эксплуатационных свойств после соответствующей термообработки. На самом деле, эти материалы трудно назвать сталями, т.к. в них обычно содержится менее 0,03 % углерода, а как известно, стали это сплавы железа с более высоким содержанием углеродом, который обеспечивает высокую конструкционную прочность изделия.

Мартенситностареющие стали обладают очень стабильными свойствами и даже после избыточного, из-за чрезмерной термообработки, нагрева лишь слегка смягчаются. Эти сплавы сохраняют свои свойства при умеренно высоких рабочих температурах и имеют максимальную рабочую температуру более 400 °С. Они подходят для таких деталей двигателя, как коленчатые валы и шестерни, а также бойки автоматического оружия, когда цикл нагревания и охлаждения повторяется несколько раз при значительной нагрузке. Их равномерное расширение и лёгкая обрабатываемость делают мартенситностареющую сталь полезной в высоко изнашиваемых деталях конвейерных линий и штампов.

Мартенситностареющие стали применяют в самолетостроении, ракетостроении, т. е. в тех отраслях, в которых важна удельная прочность, а также в криогенной технике, где они нашли применение благодаря высокой пластичности и вязкости при низких температурах.

Для проведения исследований использовали литую сталь X10H5T2ФМЛ, получаемую переплавом отходов высоколегированных сталей. Испытуемые образцы помещали в нагревательную печь, нагревали температур 400 °С, 500 °С, 600°С, 700 °С, продолжительность выдержки составляла 1 – 2 часа с последующим охлаждением.

На следующем этапе образцы подвергали закалке при 1000 °С с последующем отпуском (старением) при температурах 400 °С, 500 °С, 550 °С. На всех образцах была замеряли твердость по длине образца. Твердость измеряли с использованием универсального твердомера по Роквеллу (рис. 1). Результаты измерений представлены в таблицах 1 и 2.



Рисунок 1 - Твердомер универсальный

Таблица 1 - Твердость мартенситностареющей стали после отпуска (старения) без закалки

| Сталь      | Твердость (HRC) после отпуска (старения) |                 |                  |                  |                  |
|------------|--|-----------------|------------------|------------------|------------------|
|            | Без ТО                                   | 400 °С<br>1 час | 500 °С<br>2 часа | 600 °С<br>2 часа | 700 °С<br>2 часа |
| X10H5T2ФМЛ | 1 – 36                                   | 1– 36           | 1 – 37,5         | 1 – 38           | 1 – 39           |
|            | 2 – 36                                   | 2– 37           | 2 – 37,5         | 2 – 38           | 2 – 39           |
|            | 3 – 36                                   | 3– 37           | 3 – 37,5         | 3 – 37,5         | 3 – 39           |
|            | 4 – 36                                   | 4– 37           | 4 – 37,5         | 4 – 38           | 4 – 39           |
|            | 5 – 36                                   | 5– 37           | 5 – 37,5         | 5 – 38           | 5 – 39           |

Судя по полученным результатам эффект дисперсионного твердения в экспериментальной стали не фиксируется. Очевидно, это связано с невысокой скоростью охлаждения образцов при кристаллизации. В связи с этим на втором этапе работы литые образцы подвергали закалке с последующим старением.

Рекомендуемый режим термической обработки для мартенситностареющей стали, основываясь на литературных источниках заключается в нагреве до критических точек в пределах 950-1000°С и последующего старения при температурах 450-500°С, что обеспечивает выделение карбидообразующей фазы и за счет этого повышая твердость стали до 50–60 HRC.

Собственные эксперименты показали, что максимальная твердость с использованием закалки достигается при температуре отпуска 550 °С.

Таблица 2 - Твердость мартенситностареющей стали после закалки с низким отпуском (старением)

| Сталь      | Твердость (HRC) после отпуска (старения) |                |                |               |
|------------|--|----------------|----------------|---------------|
|            | Без отпуска                              | 400 °С, 2 часа | 500 °С, 2 часа | 550 °С 2 часа |
| X10H5T2ФМЛ | 1 – 50                                   | 1 – 53         | 1 – 55         | 1– 56         |
|            | 2 – 49                                   | 2 – 53         | 2 – 55         | 2 – 57        |
|            | 3 – 48                                   | 3 – 53         | 3 – 55         | 3 – 56        |
|            | 4 – 49                                   | 4 – 54         | 4 – 55         | 4 – 57        |

Проведенные эксперименты показали, что в экспериментальной стали можно достичь повышения твердости за счет эффекта мартенситного старения с использованием закалки и последующего отпуска.

Полученные выводы подтверждены анализом микроструктуры литой стали (рис. 2), в структуре которой присутствуют аустенит, мартенсит, а также первичные карбиды.

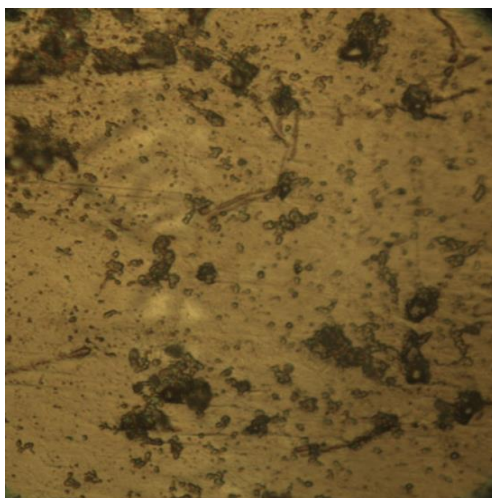


Рисунок 2 - Микроструктура литой мартенситностареющей стали после закалки 1000 °С и отпуска на 550°С 2 часа

Поскольку при выборе параметров термической обработки опирались на классический состав мартенситно-старяющей стали, которая существенно отличается по составу от экспериментальной легирующими элементами, влияющими на инкубационный период и расположение критических точек, условия упрочнения за счет мартенситного превращения подлежат корректировке.

#### **Список использованных источников**

1. Рудницкий Ф.И, Шарснева Д.В. Использование технологии модифицирования при производстве литого инструмента и оснастки из быстрорежущей стали / Ф.И. Рудницкий, Д.В. Шарснева // Ресурсо- и энергосберегающие инновационные технологии в литейном производстве.: сб. материалов международной научной и научно-технической конференции / под ред. С.А.Алимбаева; Ташкент, 2022. – С.170-172.

2. Рудницкий Ф.И, Шарснева Д.В. Влияние термической обработки на свойства литой мартенситно-старяющей стали / Ф. И. Рудницкий, Д.В. Шарснева // Литейное производство и металлургия 2022. Беларусь: 30-я Международная научно-техническая конференция и информационная выставка: труды участников конференции / Белорусский национальный технический университет; под общ. ред. Е. И. Марукович. – Минск: БНТУ, 2022. – С. 54-56.