

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА КРАТКОВРЕМЕННЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ 9%Cr СТАЛИ

Федосеева А.Э., Долженко А.С.

*Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород*

Повышение жаропрочности теплотехнических 9-12%-хромистых мартенситных сталей, предназначенных для изготовления элементов котлов и паропроводов тепловых электростанций, работающих на суперсверхкритических параметрах пара (температура 600-620°C, давление 25-30 МПа), - одна из важнейших задач, стоящая перед тепловой энергетикой. В более ранних работах было установлено [1-3], что основным препятствием для повышения температуры эксплуатации высокохромистых сталей мартенситного класса является перелом на кривой длительной прочности, одной из причин появления которого является трансформация неравновесных мелких карбонитридов  $M(C,N)$  в крупные частицы Z-фазы ( $Cr(V,Nb,Ta)N$ ). Появление перелома на кривой длительной прочности сильно снижает сопротивление ползучести и затрудняет прогнозирование на длительных ресурсах [4]. В связи с этим, использование стабильных частиц Z-фазы, выделение которых на сегодняшний день является негативным эффектом при ползучести, для повышения дисперсионного упрочнения в структуре теплотехнических сталей, позволит значительно увеличить их жаропрочность. Этого можно добиться путем разработки термомеханической обработки для 9-12%Cr сталей, дополнительно легированных кобальтом, с содержанием азота более 0,02%, которая позволит выделить равновесные термически стабильные частицы Z-фазы размером около 50 нм в исходном состоянии вместо неравновесных карбонитридов  $M(C,N)$ .

В качестве материала исследования была использована низкоуглеродистая 9%Cr сталь со следующим химическим составом (в вес.%): Fe (баланс) – 0,02%С – 9%Cr – 3%Co – 2,2%W – 2%Cu – 0,3%Ta – 0,02%N – 0,002%B – 0,2%Si – 0,2%Mn – 0,2%Ni. Сталь была выплавлена в высокочастотной индукционной печи. Термомеханические обработки (ТМО) для получения равновесных частиц Z-фазы в исходном состоянии, представленные сериями в табл. 1, состояли из следующих этапов: (1) нормализация с температуры 1150°C, время выдержки 1 час, охлаждение на воздухе, (2) деформация при температуре 680°C до степеней деформации 10%, 30% и 60% с последующим отжигом при температуре 680°C в течение 10, 50 и 300 час, охлаждение на воздухе, и (3) отпуск при температуре 750°C, время выдержки 3 часа, охлаждение на воздухе. Для сравнения также была проведена стандартная термическая обработка, заключающаяся в нормализации с температуры 1150°C (1 ч, охлаждение на воздухе) с последующим отпуском при 750°C в течение 3 часов, охлаждение на воздухе.

Таблица 1. Условия термомеханической обработки вместе с фазовым составом 9%Cr стали

| Серия | Отличительные условия ТМО |                 | Обнаруженные фазы |     |
|-------|---------------------------|-----------------|-------------------|-----|
|       | Степень деформации, %     | Время отжига, ч | Z-фаза            |     |
|       |                           |                 | Z-фаза            | TaN |
| 1     | 10                        | 10              | -                 | +   |
|       | 10                        | 50              | -                 | +   |
|       | 10                        | 300             | -                 | +   |
| 2     | 30                        | 10              | +                 | +   |
|       | 30                        | 50              | +                 | -   |
|       | 30                        | 300             | +                 | -   |
| 3     | 50                        | 10              | +                 | +   |
|       | 50                        | 50              | +                 | -   |
|       | 50                        | 300             | +                 | -   |
| 4     | Стандартная ТО            |                 | -                 | +   |

Фазовый анализ анодированных осадков был проведен методом рентгеноструктурного

анализа (РСА), используя дифрактометр Rigaku Ultima IV, оснащенный источником излучения  $\text{Cu K}\alpha$  и полупроводниковым детектором. Образцы были просканированы в интервале  $15\text{-}120^\circ$  с шагом  $0,2^\circ$ . Кратковременные механические испытания включали в себя испытания на растяжение при комнатной температуре и температуре  $650^\circ\text{C}$ , испытания на твердость и ударную вязкость.

Анализ фазового состава после проведения термомеханической обработки и стандартной термической обработки показал, что в исходном состоянии 9%Cr стали после стандартной термической обработки были обнаружены неравновесные частицы TaN, которые в процессе ползучести будут трансформированы в крупные частицы Z-фазы, что негативно отразится на сопротивлении ползучести. Для этого состояния предел текучести и временное сопротивление при комнатной температуре составили  $520\pm 20$  и  $720\pm 20$  МПа соответственно. Степень удлинения составила  $22\pm 1\%$ . После ТМО серии 1 (табл. 1) было обнаружено отсутствие частиц Z-фазы и наличие только нитридов TaN, что обеспечило похожие значения прочностных и пластических свойств исследуемой 9%Cr стали, как после стандартной термической обработки. После ТМО серий 2 и 3 после 10 ч отжига (табл. 1) в исследуемой 9%Cr стали частицы TaN были обнаружены вместе с частицами Z-фазы. Прирост прочностных свойств был несущественен и составил 50 МПа. Пластические свойства не изменились.

Отметим, что среди исследуемых ТМО были подобраны условия, при которых происходило выделение только частиц Z-фазы. К ним относятся ТМО серий 2 и 3 с большими степенями деформации и продолжительными временами отжига (табл. 1). Исследование кратковременных механических свойств на растяжение при комнатной и повышенной температуре не выявило существенного повышения прочностных свойств. Прирост предела текучести и временного сопротивления составил около 70-100 МПа, значительного снижения пластических свойств обнаружено не было. Добавим, что увеличение кратковременных прочностных свойств не было задачей исследования, поскольку дисперсионное упрочнение от мелкодисперсных частиц Z-фазы и TaN примерно одинаковое, и прирост упрочнения в состояниях после ТМО, скорее всего, вызвано изменениями в дислокационной структуре исследуемой 9%Cr стали. Твердость исследуемой 9%Cr стали после всех ТМО и стандартной термической обработки оставалась в интервале 220-250 НВ, что свидетельствуют об удовлетворительной свариваемости стали. Проведение ТМО незначительно повысило твердость по сравнению со стандартной термической обработкой. Ударная вязкость 9%Cr стали после всех ТМО и стандартной термической обработки превышала  $100 \text{ Дж/см}^2$ , что также удовлетворяет требованиям, предъявляемым к котельным сталям и сталям для лопаток паровых турбин ( $40 \text{ Дж/см}^2$ ).

Таким образом, анализ кратковременных механических свойств выявил, что исследуемая 9%Cr сталь после ТМО обладает либо схожими прочностными и пластическими свойствами, либо несущественно превосходит прочностные свойства этой стали после стандартной термической обработки. Величины твердости и ударной вязкости исследуемой стали удовлетворяют требованиям, предъявляемым к котельным сталям и сталям для лопаток паровых турбин.

*Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук (Конкурс - МК-2021) (номер гранта № МК-1995.2021.4).*

1. Федосеева А., Никитин И., Дудова Н., Кайбышев Р. Влияние условий ползучести и длительного отжига на образование частиц Z-фазы // Физика металлов и металловедение. 2020. Т. 121. № 6. С. 1–7.
2. Fedoseeva A., Nikitin I., Dudova N., Kaibyshev R. Effect of creep temperature on Z-phase formation in heat-resistant 9% Cr-3% Co martensitic steel // Mater Sci Eng A. Mater Sci Eng A. 2021. V. 799. P. 140271.
3. Fedoseeva A., Nikitin I., Dudova N., Kaibyshev R. Strain-induced Z-phase formation in a 9% Cr-3% Co martensitic steel during creep at elevated temperature // Mater Sci Eng A. 2018. V. 724. P. 29–36.
4. Sklenicka V., Kucharova K., Svoboda M., Kloc L., Bursik J., Kroupa A. Long-term creep behavior of 9-12%Cr power plant steels // Mater Char. 2003. V. 51. P. 35–48.