

DOI: 10.17223/978-5-907442-03-0-2021-195

**РАЗРАБОТКА РЕЖИМОВ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ
ОБРАЗОВАНИЯ СТАБИЛЬНЫХ ЧАСТИЦ В НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ 9%Cr
СТАЛИ МАРТЕНСИТНОГО КЛАССА**

Федосеева А.Э.

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород

Существенное повышение жаропрочности 9-12%Cr стали мартенситного класса, предназначенных для изготовления элементов котлов и паропроводов, а также элементов роторов и лопаток паровых турбин, работающих при суперсверхкритических параметрах острого пара (температура 600-620°C, давление 25-30 МПа), связано с дисперсией наноразмерных карбонитридов MX, где М означает металл (ванадий, ниобий, титан, тантал или их комбинации) и X означает углерод и/или азот. Карбонитриды MX, выделяющиеся равномерно по объему матрицы в процессе отпуска при температурах 720-800°C, выступают в качестве препятствий для перестройки свободных дислокаций в низкоэнергетические конфигурации либо встраивания свободных дислокаций в уже существующие дислокационные реечные границы [1]. Считается, что дисперсионное упрочнение от этих частиц вносит существенный вклад в общее упрочнение 9-12% Cr мартенситных сталей, стабилизируя реечную структуру троостита отпуска в условиях эксплуатации [1,2].

Основным недостатком карбонитридов MX в 9-12%Cr сталях является их термодинамическая нестабильность в интервале температур 600-700°C, что ведет к замене этих наноразмерных карбонитридов стабильными частицами Z-фазы (CrMN, где М означает ванадий, ниобий, титан, тантал или их комбинации) в процессе ползучести, размер которых может достигать нескольких микрон, что полностью устраняет дисперсионное упрочнение от частиц вторичных фаз [1-3] и резко снижает сопротивление ползучести 9-12%Cr сталей [4]. В более ранних работах было установлено [5-7], что процесс трансформации наноразмерных карбонитридов MX в частицы Z-фазы не вносит существенный вклад в деградацию структуры 9%Cr-3%Co стали в процессе ползучести, пока размер частиц Z-фазы сопоставим с размерами частиц карбонитридов MX [7]. Пластическая деформация – основной фактор, провоцирующий выделение частиц Z-фазы в процессе ползучести [6]. Таким образом, проблема выделения частиц Z-фазы актуальна для жаропрочных сталей, содержащих 9-12%Cr и дополнительно легированных кобальтом, однако, есть все предпосылки предполагать, что частицы Z-фазы можно использовать и для повышения длительной прочности.

Разработка термомеханической обработки для 9-12%Cr сталей с содержанием азота более 0,01% позволит выделить сразу мелкодисперсные стабильные равновесные частицы Z-фазы в исходном состоянии вместо неравновесных карбонитридов MX. Предполагается, что термомеханическая обработка для получения равновесных стабильных частиц Z-фазы в исходном состоянии будет состоять из следующих этапов: нормализация с температур в интервале от 1050 до 1150°C (охлаждение на воздухе), деформация при температуре в интервале от 600 до 680°C со степенями деформации в интервале от 10% до 60% и последующим отжигом при температуре в интервале от 600 до 680°C в течение от 1 до 1000 час, окончательный отпуск при температурах в интервале от 750 до 780°C в течение 3 час. Цель настоящего исследования – провести компьютерное моделирование фазового состава и кинетики выделения и укрупнения вторичных фаз для низкоуглеродистой 9%Cr стали, легированной Co, W и Ta, с использованием программного обеспечения Thermo-Calc и Prisma для определения оптимальных режимов проведения термомеханической обработки.

Для моделирования был использован модельный химический состав 9%Cr стали, легированной Co, W и Ta, соответствующий реальному содержанию легирующих элементов в исследуемой стали, но ограниченный по количеству элементов (в вес.%): Fe (баланс) – 9%Cr – 3%Co – 2.2%W – 0.3%Ta – 2%Cu – 0.02%N. Для определения температуры нормализации, расчет фазового состава осуществлялся при температурах 1050°C, 1070°C,

1100°C и 1150°C. При всех температурах доминирующей фазой являлся аустенит, в небольших количествах присутствовал нитрид TaN с химическим составом (в вес.%) 86%Ta-1%Cr-12%N. Появление δ -феррита не было предсказано компьютерным моделированием фазового состава. С увеличением температуры от 1050 до 1150°C массовая доля нитрида TaN снижается с 0,14% до 0,097% соответственно. Поскольку уход тантала из твердого раствора в виде частиц при аустенизации является нежелательным процессом, то в качестве температуры нормализации будет выбрана температура, обеспечивающая минимальное количество нитридной фазы.

Для определения температуры деформации и последующего отжига было проведено моделирование фазового состава при температурах 600°C, 620°C, 650°C, 680°C и 750°C (как температура стандартного отпуска). Было обнаружено, что при всех температурах, помимо феррита, предполагается присутствие следующих фаз: «Cu»-фаза, фаза Лавеса и Z-фаза. Химический состав Z-фазы представляет собой (в вес.%) 55%Ta-26%Cr-7%Fe-8%N. С увеличением температуры содержание «Cu»-фазы и фазы Лавеса существенно снижается, в то время как содержание Z-фазы остается неизменным и составляет 0,24%. В ранее проведенном исследовании было обнаружено [7], что увеличение температуры испытания до 675°C облегчает образование частиц Z-фазы в 9%Cr стали. В связи с этим, в качестве температуры деформации и последующего отжига будет выбрана температура 680°C, которая обеспечивает высокое содержание Z-фазы одновременно с низкими массовыми долями других вторичных фаз. Чтобы определиться с продолжительностью отжига после деформации был проведен расчет кинетики выделения и роста частиц нитридов TaN и CrTaN в программе Prisma при температуре 680°C. Для расчета в программе Prisma был использован следующий модельный химический состав 9%Cr стали (в вес.%): Fe (баланс) – 9%Cr – 3%Co – 0.3%Ta – 0.02%N. В качестве мест зарождения были выбраны дислокации. При плотности дислокаций $2 \times 10^{14} \text{ м}^{-2}$ количество мест зарождения составило $8,83 \times 10^{23} \text{ м}^{-3}$. Было обнаружено, что растворение нитрида TaN с одновременным ростом Z-фазы происходит через 10 часов выдержки при температуре 680°C. При этом размер частиц Z-фазы даже через 1000 час выдержки при температуре 680°C сохраняется в пределах 50 нм.

Таким образом, моделирование фазовых составов и кинетики выделения и укрупнения нитридной фазы и Z-фазы показало, что такие условия проведения термомеханической обработки как нормализация с температуры 1150°C (охлаждение на воздухе), деформация при температуре 680°C со степенями деформации в интервале от 10% до 60% и последующим отжигом при температуре 680°C в течение 10 час, окончательный отпуск при температуре 750°C в течение 3 час, могут обеспечить выделение частиц Z-фазы с размером около 50 нм в исходном состоянии. Последующие работы будут направлены на экспериментальную проверку этих условий.

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. Creep Resistant Steels / Abe F., Kern T. U., Viswanathan R., Woodhead Publ. – 2008. – 800 с.
2. Sawada K. et al. Effect of nitrogen content on microstructural aspects and creep behavior in extremely low carbon 9Cr heat-resistant steel // ISIJ international. 2004. Т. 44. № 7. С. 1243-1249.
3. Danielsen H. K. Review of Z phase precipitation in 9–12 wt-%Cr steels // Mater Sci Technol. 2016. V. 32. P. 126-137.
4. Strang A., Vodarek V. Z-phase formation in martensitic 12CrMoVNb steel // Mater Sci Technol. 1996. V. 12. P. 552-556.
5. Федосеева А.Э., Никитин И.С., Дудова Н.Р., Кайбышев Р.О. Об особенностях образования частиц Z-фазы в мартенситной стали, содержащей 9% Cr, в процессе ползучести при 650°C и их влиянии на ползучесть // Деформация и разрушение материалов. 2019. № 3. С. 8–15.
6. 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.
7. 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. 2021. V. 799. P. 140271.