

Научная статья

УДК 669.1

## Моделирование выделения и эволюции частиц NbC при горячей прокатке низкоуглеродистых трубных сталей

**Даниил Дмитриевич Сацкий<sup>1</sup>, Полина Андреевна Падерина<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup> Уральский федеральный университет им. первого Президента  
России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

<sup>1</sup> daniil.sackii@mail.ru

**Аннотация.** В настоящей работе построен алгоритм моделирования выделения и роста частиц NbC в малоуглеродистых низколегированных трубных сталях в процессе горячей прокатки. В работе использованы возможности программы Thermo-Calc, позволяющей спрогнозировать температуру выделения и массу выделившейся фазы.

**Ключевые слова:** термодинамические расчеты, низкоуглеродистая трубная сталь, контролируемая термомеханическая обработка, численные расчеты, дисперсные фазы внедрения, NbC

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность научному руководителю — доктору технических наук, профессору М. Л. Лобанову.

Original article

## The Precipitation and Evolution Modeling of NbC During the Low-Carbon Pipe Steels Hot Rolling

**Daniil D. Satsky<sup>1</sup>, Polina A. Paderina<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup> Ural Federal University named after the first President  
of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

<sup>1</sup> daniil.sackii@mail.ru

**Abstract.** The algorithm of modelling the precipitation and growth of NbC particles in low-carbon low-alloy pipe steels during hot rolling was constructed in this work. The paper has used the capabilities of the Thermo-Calc program, which makes it possible to predict the temperature of precipitation and mass of the precipitated phase.

**Keywords:** thermodynamic calculations, low-carbon pipe steel, controlled thermo mechanical processing, numerical calculations, dispersed interstitial phases, NbC

**Acknowledgments.** The authors express their gratitude to the scientific supervisor — doctor of sciences in engineering, professor M. L. Lobanov.

Дисперсные фазы играют важную роль в получении заданных механических свойств и формировании необходимой структуры при производстве малоуглеродистых низколегированных трубных сталей [1; 2]. Например, выделение карбидов NbC в процессе горячей прокатки (ГП) листов трубной стали 06Г2МБ предотвращает рекристаллизацию аустенитных зерен, что существенно способствует диспергированию бейнитной структуры в процессе  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения при последующем охлаждении [3]. Частицы NbC выделяются на границах аустенитных зерен еще на стадии черновой ГП и препятствуют развитию рекристаллизационных процессов на стадии чистовой ГП. Таким образом, выделение и рост частиц NbC является важным управляющим элементом структуры горячекатаной полосы.

В настоящей работе предложен алгоритм моделирования выделения и роста частиц NbC в малоуглеродистых низколегированных трубных сталях в процессе горячей прокатки.

Для моделирования использовался химический состав стали 06 Г2 МБ: С ~ 0,06 мас. %; Mn ~ 1,6 мас. %; Mo ~ 0,5 мас. %; Nb ~ 0,05 мас. %; остальное — железо и неизбежные примеси.

Проведенные с использованием Thermo-Calc расчеты показали, что небольшие вариации содержаний С и Nb оказывают заметное влияние на температуру начала выделения NbC. С использованием термодинамических расчетов (рис. 1, а) были определены температуры фазовых превращений, соотношения количеств фаз при различных температурах, а также было охарактеризовано равновесие NbC-аустенит в виде логарифма произведения растворимости:  $\lg [\text{Nb}] [\text{C}] = K_1/T + K_2$ . (рис. 1, б).

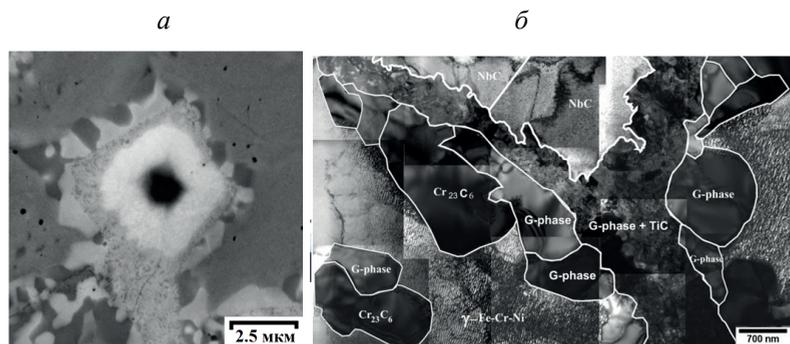


Рис. 1. Моделирование фазового состава при различных температурах в стали 06Г2МБ:

- а* — фазовая диаграмма (FCC\_A1 — аустенит, FCC\_A1#2 — NbC, FCC\_A1#3 — TiN, MNS — MnS, BCC\_A2 — феррит, LIQUID — жидкая фаза, CEMENTITE — цементит);  
*б* — зависимость растворимости NbC от температуры

Моделирование кинетики зарождения и роста проводилось по алгоритму, представленному ниже.

1. С использованием программы Thermo-Calc определялись температуры начала выделения NbC и зависимость массовой доли выделенной карбидной фазы от температуры (рис. 1).
2. Процесс горячей деформации разбивался на несколько температурных интервалов, ступеней (рис. 2, *а*), для каждого из которых задавалось средняя температура и масса выделившегося NbC.
3. Для температуры ступени рассчитывался характеристический диффузионный путь  $r = (6D\tau)^{1/2}$  (где  $D$  — коэффициент диффузии, рассчитываемый при температуре ступени по закону Аррениуса [4];  $\tau$  — время прохождения ступени) и  $(2r)^3$  — объем ячейки материала стали, в которой зарождается и растет частица NbC (рис. 2, *а*).
4. При переходе к следующей ступени производился пересчет объема ячейки материала стали в соответствие с новым характеристическим диффузионным путем. При этом учитывалось, что часть ячеек уже содержит частицу NbC, а в другой части ячеек частицы только возникали. Рассчитывались размеры ранее существовавших и вновь возникающих частиц.
5. Процедуры, описанные в пунктах 3–4, повторялись для каждой последующей ступени. Таким образом, на каждой ступени воз-

никал, а в дальнейшем увеличивался в размерах новый класс частиц (рис. 2, а, б).

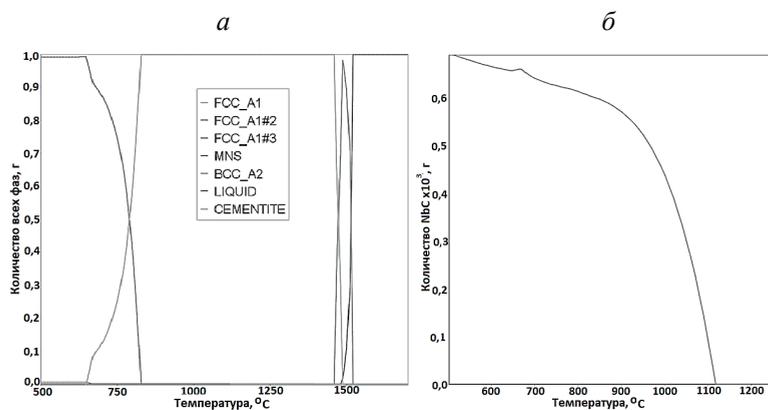


Рис. 2. Моделирование выделения фазы в ходе многопроходной горячей прокатки:  
 а — схема моделирования зарождения и роста частиц;  
 б — рост частиц NbC в стали 06Г2МБ

Получены законы возникновения и роста частиц NbC в ходе горячей прокатки стали 06Г2МБ, а также построено распределение частиц дисперсной фазы по размерам после окончания деформации (рис. 3).

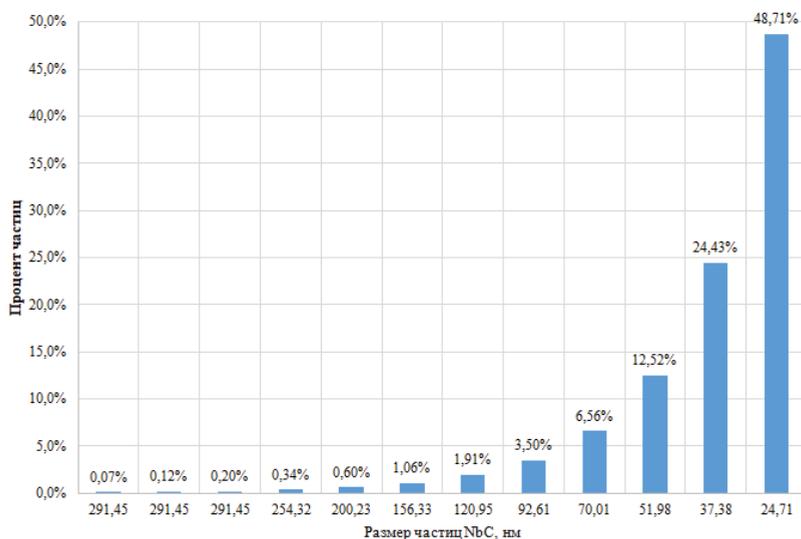


Рис. 3. Распределение частиц NbC по размерам после горячей прокатки в стали 06Г2МБ

Ключевым фактором высокой дисперсности NbC является низкая температура прокатки, именно при ней выделяется больше всего мелко-размерных частиц, влияющих на рекристаллизационные процессы, регулирующие размеры зерен в конечном изделии.

#### **Список источников**

1. Гольдштейн М. И., Попов В. В. Растворимость фаз внедрения при термической обработке стали. М. : Металлургия, 1989. 200 с.
2. Фарбер В. М. Конструкционные и функциональные материалы на металлической основе / под общ. ред. А. А. Попова. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. 252 с.
3. Влияние скорости охлаждения на структуру низкоуглеродистой стали после контролируемой термомеханической обработки / М. Л. Лобанов [и др.] // МИТОМ. 2019. Т. 763, № 1. С. 31–37.
4. Лобанов М. Л., Зорина М. А. Методы определения коэффициентов диффузии. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. 100 с.

#### **References**

1. Goldstein M. I., Popov V. V. Solubility of interstitial phases during heat treatment of steel. M. : Metallurgiya, 1989. 200 p.
2. V Farber VM Structural and functional materials on a metal basis: textbook. Allowance / under ed. A. A. Popov. Ekaterinburg : Ural University Publishing House, 2014. 252 p.
3. Influence of cooling rate on the structure of low-carbon steel after controlled thermomechanical treatment / M. L. Lobanov [et al.] // MITOM. 2019. Vol. 763, no. 1. P. 31–37.
4. Lobanov M. L., Zorina M. A. Methods for determining diffusion coefficients: textbook. Manual. Ekaterinburg : Publishing house of the Ural University, 2017. 100 p.