

Научная статья

УДК 669.1

## Моделирование кинетики выделения дисперсных фаз в низкоуглеродистых сталях при горячей деформации

**Даниил Дмитриевич Сацкий<sup>1</sup>, Людмила Андреевна Лобанова<sup>2</sup>,  
Сергей Владимирович Данилов<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup> Уральский федеральный университет им. первого Президента  
России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

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

**Аннотация.** В работе проведено численное моделирование кинетики зарождения и роста частиц дисперсных фаз внедрения, образующихся при горячей прокатке малоуглеродистых низколегированных сталей. В результате моделирования получены зависимости роста частиц AlN, выделяющихся в процессе горячей прокатки сплава Fe — 3%Si.

**Ключевые слова:** численные расчеты, низкоуглеродистые стали, дисперсные частицы, контролируемая термомеханическая обработка

**Благодарности.** Работа поддержана грантом Президента РФ, проект сп-3775.2021.1. Авторы выражают благодарность научному руководителю — доктору технических наук, профессору М. Л. Лобанову.

Original article

## Modeling of the Phases Precipitate Kinetic in Low-Carbon Steels by Hot Deformation

**Daniil D. Satsky<sup>1</sup>, Lyudmila A. Lobanova<sup>2</sup>, Sergey V. Danilov<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup> Ural Federal University named after the first President  
of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

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

**Abstract.** In this work considered a numerical simulation of the kinetics of nucleation and growth of particles of dispersed phases formed during hot rolling of low-carbon low-alloy steels are carried out. As a result of modeling, the dependences of the growth of AlN particles released during hot rolling of the Fe — 3 % Si alloy were obtained.

**Keywords:** numerical calculations, low-carbon steels, precipitates, thermo-mechanical controlled processing

**Acknowledgments.** The work was supported by a grant from the President of the Russian Federation, project sp-3775.2021.1. The authors expresses their gratitude to the scientific advisor — doctor of technical sciences, professor M. L. Lobanov.

**А**нализ влияния дисперсных фаз на механические свойства материалов и процессы формирования структуры, реализующиеся при производстве изделий, предполагает получение информации о количестве и объемной доли частиц в различных температурных интервалах [1; 2].

В данной работе показана возможность моделирования кинетики выделения частиц вторых фаз в низкоуглеродистых сталях с построением зависимостей количества и размеров дисперсных частиц от количества и технологических параметров (температура, время) проходов при горячей прокатке.

Моделирование проведено на примере процесса выделения частиц AlN при горячей прокатке технического сплава Fe — 3%Si [2; 3], содержащего в мас. %: C — 0,03; Si — 3,10; Mn — 0,30; S — 0,006; Al — 0,015; N — 0,01; Cu — 0,54; P — 0,01; Ni — 0,05; Cr — 0,05; Ti — 0,003.

Моделирование проводилось по следующему алгоритму:

- 1) с использованием программы Thermo-Calc определялись температуры начала выделения AlN и зависимость массовой доли выделенной нитридной фазы от температуры;
- 2) процесс горячей деформации разбивался на несколько температурных интервалов (ступеней), для каждого из которых задавалось средняя температура и масса выделившегося AlN (рис., *a*);
- 3) для каждой ступени рассчитывался объем ячейки материала  $r^3$ , в которой зарождается и растет частица AlN ( $r$  — характеристический диффузионный путь равный  $(8 \cdot D \cdot \tau_i)^{1/2}$ ,  $D$  — коэффициент диффузии, рассчитываемый при заданной температуре

ступени по закону Аррениуса,  $\tau_i$  — время прохода при горячей прокатке) (рис., а) [4];

- 4) при переходе к следующей ступени производился пересчет объема ячейки материала сплава в соответствие с новым характеристическим диффузионным путем. При этом учитывалось, что часть ячеек уже содержит частицу AlN, а в другой части ячеек частицы только возникали. Рассчитывались размеры ранее существовавших и вновь возникающих частиц;
- 5) процедура «3–4» повторялась для каждой последующей ступени. Таким образом, на каждой ступени возникал, а в дальнейшем увеличивался в размерах новый класс частиц (рис., а).

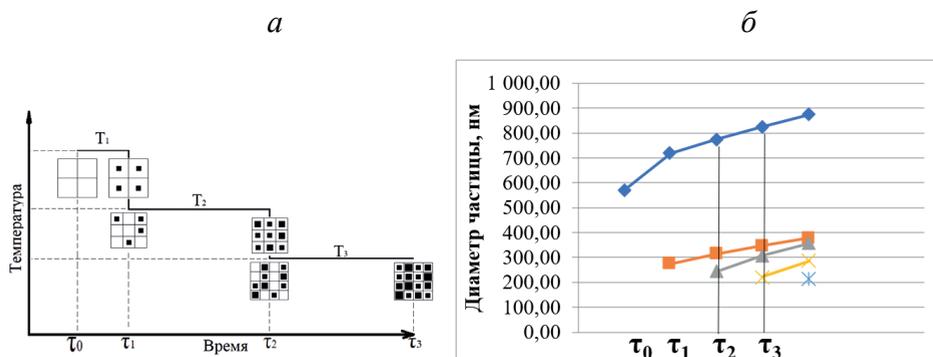


Рис. Моделирование роста и зарождение частиц вторых фаз в процессе многопроходной горячей деформации:

а — схема моделирования; б — рост размеров частиц с течением времени  $\tau$

В результате моделирования получены зависимости роста частиц AlN, выделяющихся в процессе горячей прокатки сплава Fe — 3%Si (рис., б).

### Список источников

1. Гольдштейн М. И., Попов. В. В. Растворимость фаз внедрения при термической обработке стали. М. : Metallurgy, 1989. 200 с.
2. Конструкционные и функциональные материалы на металлической основе : учеб. пособие / В. М. Фарбер, Н. В. Лежнин, В. А. Хотинков [и др.] ; под общ. ред. А. А. Попова. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. 252 с.

3. Лобанов М. Л., Редикульцев А. А., Зорина М. А. Металлофизика материалов для электромашиностроения : учеб. пособие. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2019. 144 с.
4. Лобанов М. Л., Зорина М. А. Методы определения коэффициентов диффузии : учеб. пособие. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. 100 с.

### References

1. Goldstein M. I., Popov. V. V. Solubility of introduction phases during heat treatment of steel. M. : Metallurgy, 1989. 200 p.
2. Structural and functional materials based on metal / V. M. Farber, N. V. Lezhnin, V. A. Khotinov [et al.] ; under the general editorship of A. A. Popov. Ekaterinburg : Ural University Publishing, 2014. 252 p.
3. Lobanov M. L., Redikultsev A. A., Zorina M. A. Metallophysics of materials for electrical engineering. Ekaterinburg : Ural University Publishing, 2019. 144 p.
4. Lobanov M. L., Zorina M. A. Methods for determining diffusion coefficients: study guide. Ekaterinburg : Ural University Publishing, 2017. 100 p.