

Елена Илларионовна Корзунова^{1*}, Игорь Игоревич Горбачёв¹, Владимир Владимирович Попов¹

¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

*korzunova1996@imp.uran.ru

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗМЕРА АУСТЕНИТНОГО ЗЕРНА НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ПРИ МНОГОПРОХОДНОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Предложен алгоритм для прогнозирования размера зерна низколегированных сталей, подвергаемых горячей прокатке в несколько проходов. Алгоритм основан на совместном моделировании эволюции дислокационной структуры и среднего размера зерна. В алгоритме учитывается возможность протекания процессов возврата и статической рекристаллизации. Выполнено сравнение результатов расчёта с литературными данными.

Ключевые слова: многопроходная деформация, размер зерна, рекристаллизация.

Elena I. Korzunova, Igor I. Gorbachev, Vladimir V. Popov

M.N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

PREDICTION OF THE AUSTENITE GRAIN SIZE OF LOW ALLOYED STEEL UPON MULTIPASS DEFORMATION

An algorithm is proposed for predicting the grain size of low-alloyed steel upon multipass hot-rolling. The algorithm is based on a simultaneous simulation of dislocation structure evolution and the average grain size. The algorithm takes into account the possibility of recovery processes and static recrystallization. The calculation results are compared with published data.

Key words: multipass deformation, grain size, recrystallization.

Производство конструкционных сталей требует наиболее тщательного подбора режимов термической и термомеханической обработки, обеспечивающих требуемые характеристики материала. Во многом механические свойства стали определяются размером зерна. Поэтому прогнозирование размера зерна на различных стадиях обработки стали позволяет значительно снизить объём дорогостоящих и трудоемких экспериментальных исследований. Это обуславливает высокую актуальность исследований в данной области уже в течение нескольких десятилетий, см., например [1-3]. Недавно нами также были предложены подходы для прогнозирования размера аустенитного зерна в сталях при термической и термомеханической обработке [4,5]. В настоящей работе рассматривается

возможность применения предложенных нами моделей для прогнозирования размера аустенитного зерна низколегированных сталей в режиме многопроходной горячей прокатки.

В качестве основы был взят алгоритм из нашей работы [5] для прогнозирования размера аустенитного зерна в условиях горячей деформации.

Динамика изменения аустенитного зерна (с учетом измельчения при рекристаллизации) определяется по формуле:

$$\frac{dD}{dt} = M\gamma \left(\alpha \frac{1}{D} - \beta \sum_i \left(\frac{f_i}{r_i} \right) \right) - \frac{D}{3} \frac{dX}{dt} \ln(N),$$

где D – средний диаметр зерна, t – время, γ – энергия границы зерна, α и β – константы, f_i – объёмная доля выделений вторых фаз радиуса r_i . M – подвижность границы зерна, X – доля рекристаллизованного материала, N – число рекристаллизованных зёрен, приходящихся на одно старое.

Дислокационная структура описывается с помощью функции распределения по плотностям дислокаций $H(\rho, t)$, заданная в виде гистограммы. Доля интервала гистограммы H_i соответствует объёмной доле материала со средней плотностью дислокаций ρ_i .

При моделировании деформации и рекристаллизации плотность дислокаций, соответствующая i -му интервалу, изменяется на некоторую величину $\Delta\rho_i$, что приводит к изменению вида гистограммы.

$$\rho'_i = \rho_i + \Delta\rho_i.$$

Затем гистограмма пересчитывается к исходной сетке плотностей дислокаций:

$$H_i = \sum_j H_j \omega_i^j,$$

где ω_i^j – отношение длины пересечения i -го и j -го интервалов η_i^j к длине исходного отрезка гистограммы. При этом i соответствует номерам интервалов на исходной гистограмме, j – номерам интервалов на новой гистограмме (после их смещения).

Изменение плотности дислокаций при деформации и возврате для i -го интервала гистограммы рассчитывается в соответствии с выражением:

$$\dot{\rho}_i = \frac{\dot{\epsilon}}{bl} - k_0 \dot{\epsilon}^{1-q} \rho_i - k_1 \rho_i^2.$$

Здесь $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации, l – длина свободного пробега дислокации (обычно принимаемая равной размеру ячейки или субзерна), k_0 – коэффициент динамического возврата, k_1 – коэффициент статического возврата, q – параметр материала.

Критерием наступления статической рекристаллизации считается превышение максимального размера субзерна (ячейки) критического размера, который для i -го интервала плотностей дислокаций определяется как

$$d_{cr}^i = \frac{4\gamma}{\tau\rho_i},$$

где τ – энергия дислокации, приходящаяся на единицу ее длины.

Если это условие выполняется для i -го интервала, то доля H_i уменьшается, а H_0 (доля материала с наименьшей плотностью дислокаций) – увеличивается на соответствующую величину:

$$H_0^{t+\Delta t} = H_0^t + H_i^t \cdot \left(1 - 2^{-\frac{\Delta t}{t_{0.5}}}\right),$$

$$H_i^{t+\Delta t} = H_i^t \cdot 2^{-\frac{\Delta t}{t_{0.5}}},$$

где $t_{0.5}$ – время, необходимое для рекристаллизации половины объёма.

Чтобы оценить адекватность работы предложенного алгоритма для многопроходной прокатки, было проведено сравнение (см. рис.) результатов, полученных в ходе моделирования, с данными, приведенными в работе [6]. Расчеты были выполнены для стали с 0.07%С, 0.5%Si, 1.2%Mn, 0.052%P, 0.01%S (масс.%). Режим обработки указан в таблице.

Таблица

Параметры моделирования для многопроходной деформации [6]

№ прохода	1	2	3	4	5	6
Температура, °С	1027	1023	1023	1000	950	910
Скорость деформации, с ⁻¹	3.724	4.770	3.964	5.632	10	12.024
Степень деформации	0.288	0.405	0.288	0.511	0.693	0.889

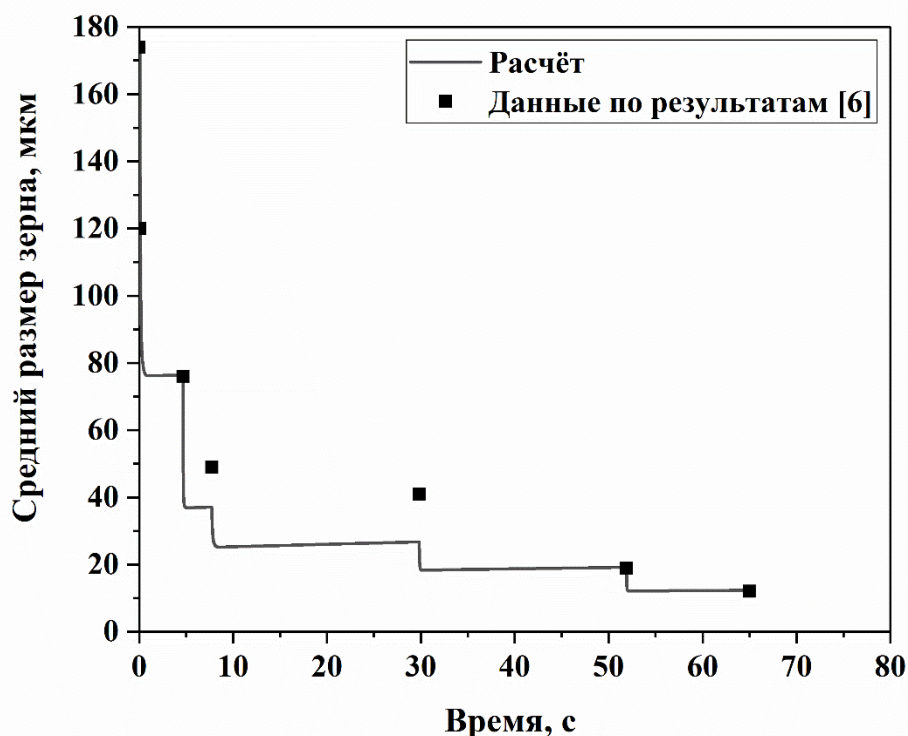


Рис. Сравнение результатов расчетов и данных из работы [6]

Как видно из приведённого сравнения, результаты расчетов достаточно хорошо согласуются с данными из работы [6]. Таким образом, показана возможность применения предложенной модели для прогнозирования размера аустенитного зерна при обработке низколегированных сталей в режиме многопроходной прокатки.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-29-01106).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Sandström R. A model for hot working occurring by recrystallization / R. Sandström, R. Lagneborg // *Acta Metall.* 1975. V. 23. P. 387-398. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(75\)90132-7](https://doi.org/10.1016/0001-6160(75)90132-7)
2. Madej L. Perceptive comparison of mean and full field dynamic recrystallization models / L. Madej, M. Sitko, M. Pietrzyk // *Archives of Civil and Mechanical Engineering.* 2016. V. 16. №. 4. P. 801-813. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2016.03.010>.
3. Lenart J.G. Mathematical and physical simulation of the properties of hot rolled products / J.G. Lenart, M. Pietrzyk, L. Cser // Amsterdam-Lausanne-New York-Oxford-Shannon-Singapore-Tokyo: Elsevier. 1999. 264 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-042701-0.X5000-1>
4. Горбачев И.И. Моделирование роста аустенитного зерна в низколегированных сталях при аустенитизации / И.И. Горбачев [и др.] // *Физика металлов и металловедение.* 2023. Т. 124. № 3. С. 303–309. doi: 10.31857/S0015323022601738
5. Горбачев И.И. Модель для прогнозирования размера аустенитного зерна при горячей деформации низколегированных сталей с учётом эволюции дислокационной структуры / И.И. Горбачев [и др.] // *Физика металлов и металловедение.* 2023. В печати.
6. Lin X. Multi-scale modeling of microstructure evolution during multi-pass hot-rolling and cooling process / X. Lin [et. al.] // *Materials.* 2021. V. 14. P. 2947. <https://doi.org/10.3390/ma14112947>

REFERENCES

1. Sandström R. A model for hot working occurring by recrystallization / R. Sandström, R. Lagneborg // *Acta Metall.* 1975. V. 23. P. 387-398. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(75\)90132-7](https://doi.org/10.1016/0001-6160(75)90132-7)
2. Madej L. Perceptive comparison of mean and full field dynamic recrystallization models / L. Madej, M. Sitko, M. Pietrzyk // *Archives of Civil and Mechanical Engineering.* 2016. V. 16. №. 4. P. 801-813. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2016.03.010>.
3. Lenart J.G. Mathematical and physical simulation of the properties of hot rolled products / J.G. Lenart, M. Pietrzyk, L. Cser // Amsterdam-Lausanne-New York-Oxford-Shannon-Singapore-Tokyo: Elsevier. 1999. 264 P. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-042701-0.X5000-1>

4. Gorbachev I.I. Simulation of Austenite Grain Growth in Low-Alloyed Steels upon Austenitization / I.I. Gorbachev [et. al.] // Physics of Metals and Metallography. 2023. Vol. 124. No. 3. P. 290-295. doi: 10.1134/S0031918X23600100
5. Gorbachev I.I. Model for prediction of the size of austenite grains upon hot deformation of low-alloyed steels taking into account the evolution of the dislocation structure/ I.I. Gorbachev [et. al.] // Physics of Metals and Metallography. 2023.Publishing.
6. Lin X. Multi-scale modeling of microstructure evolution during multi-pass hot-rolling and cooling process / X. Lin [et. al.] //Materials. 2021. V. 14. P. 2947. <https://doi.org/10.3390/ma14112947>