

ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ ВОЗВРАТА ПРИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОМ ОТЖИГЕ ДЕФОРМИРОВАННЫХ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Голубков Н.А., Васильев А.А., Соколов С.Ф.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация,
golubkovna@gmail.com

Конечная структура низкоуглеродистых автомобильных сталей формируется в результате рекристаллизации холоднокатаного листа при его последующем отжиге. В связи с этим в последние годы значительное внимание уделяется как экспериментальным исследованиям данного процесса [1], так и разработке соответствующих математических моделей [2,3]. При заданных параметрах холодной деформации термодинамическая движущая сила рекристаллизации, определяемая, в основном, энергией созданных дислокаций, непрерывно снижается со временем отжига за счет возврата, предшествующего началу этого процесса и развивающегося одновременно с ним в нерекристаллизованной части объема. Поэтому создание физически обоснованной модели рекристаллизации требует также разработки модели возврата. В настоящей работе представлены результаты исследования возврата при изотермическом отжиге деформированных низкоуглеродистых автомобильных сталей и математическая модель для описания его кинетики.

Эксперименты по исследованию кинетики возврата методом двойного нагружения проводили с помощью модуля HydraWedge испытательного комплекса Gleeble 3800 для IF-стали (0.004C, 0.14Mn, 0.06Ti) и низкоуглеродистой стали 08пс (0.06C, 0.17Mn) (приведены содержания только основных легирующих элементов в масс. %). Испытываемые образцы, имеющие форму цилиндра высотой 15 и диаметром 10 мм, вырезали из пластин (подката) промышленного металла, дополнительно подвергнутых горячей прокатке на лабораторном стане и охлажденных на воздухе. Полученный в результате размер зерна феррита для IF-стали и стали 08пс составлял, соответственно, ~ 70 и 30 мкм. Данные исследования выполняли по схеме: нагрев образцов до температуры испытаний в интервале 400÷550 °С со скоростью 10 °С/с → деформация сжатием (~ 0.6) со скоростью 1 с⁻¹ → полная разгрузка испытываемого образца → изотермическая выдержка варьируемой длительности → повторная деформация сжатием (~ 0.2) со скоростью 1 с⁻¹. Примеры кривых двойного нагружения для IF-стали представлены на рис. 1.

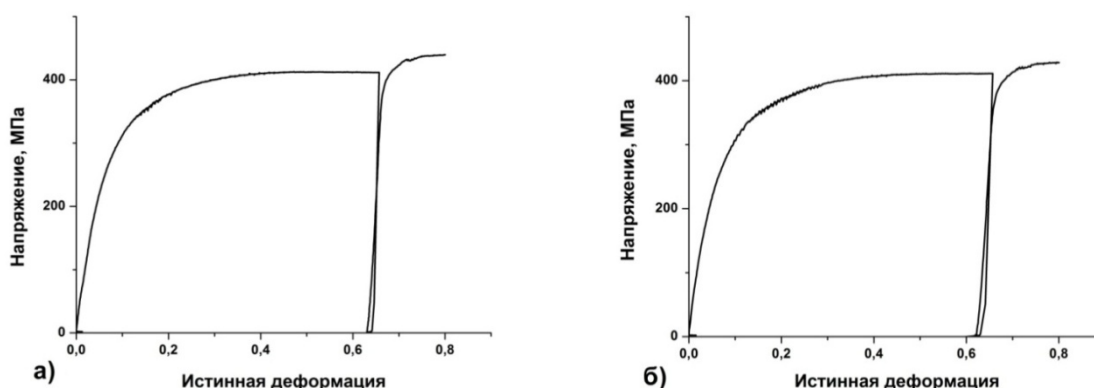


Рисунок 1 - Кривые двойного нагружения, полученные для IF-стали при температуре 450°С и длительностях междеформационной паузы 3 (а) и 180 мин (б)

Исходное упрочнение в результате первой деформации при заданной температуре определяли усреднением его значений для 5 образцов. Упрочнение образцов, снижающееся во время междеформационной паузы за счет возврата, рассчитывали на основании соответствующих средних значений напряжения

пластического течения в конце первого нагружения и предела текучести при повторном нагружении. Полученные данные по разупрочнению использованы при калибровке математической модели для описания кинетики возврата.

Для расчета скорости падения внутренних напряжений $\Delta\sigma$ в результате возврата использовали следующее уравнение, предложенное в работе [4]:

$$\frac{d\Delta\sigma}{dt} = -\frac{64\Delta\sigma^2\nu_D}{9M^3\alpha_p^2E(T)} \exp\left(-\frac{E_a^{rec}}{RT}\right) \sinh\left(\frac{\Delta\sigma V_a}{k_B T}\right), \quad (1)$$

где E_a^{rec} – энергия активации возврата; V_a – активационный объем; ν_D – частота Дебая ($2 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$); M – фактор Тейлора, принимаемый равным 2.7; $\alpha_p = 0.33$ эмпирический параметр; R – газовая постоянная; k_B – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; $E(T)$ – модуль Юнга, вычисляемый по формуле [5]:

$$E(T) \approx 2.11 \cdot 10^{11} \left[1 - \frac{T - 300}{1989}\right] \text{ (Па)}. \quad (2)$$

Уравнение (1) содержит два физических параметра E_a^{rec} и V_a . В рассматриваемой модели энергию активации возврата принимали равной энергии активации самодиффузии $E_{SD}(T)$ в α -железе, для расчета которой в зависимости от температуры использовали экспериментальные данные работы [6]:

$$E_{SD}(T) = 236.5 + \Delta E_{SD}(T) \text{ (кДж / моль)}, \quad (3)$$

где зависящий от температуры вклад $\Delta E_{SD}(T)$ обусловлен магнитными эффектами. Как видно из рис. 2, набор экспериментальных значений данного вклада, полученных для разных температур, с хорошей точностью описывается с помощью функции Больцмана с найденными значениями соответствующих эмпирических параметров.

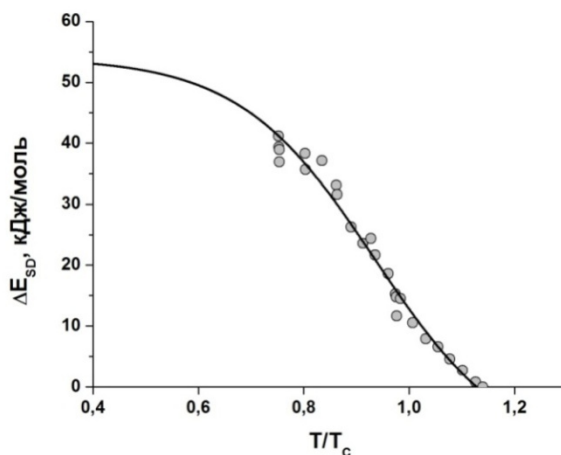


Рисунок 2 - Зависимость величины $\Delta E_{SD}(T)$ от отношения T/T_C (T_C – температура Кюри). Представленные экспериментальные данные [6] аппроксимированы с помощью функции Больцмана.

Единственным неопределенным параметром в (1) остается активационный объем, величина которого в обсуждаемой модели рассматривается в качестве эмпирического подгоночного параметра. Оптимальное значение данного параметра было определено с использованием полученных экспериментальных данных по разупрочнению исследованных сталей и оказалось равным $5.26 \cdot 10^{-28} \text{ м}^3$ (31.7 б^3 , где б

– модуль вектора Бюргерса для α -железа). Указанная величина активационного объема согласуется с данными, приводимыми в литературе [7].

Как видно из рис. 3, результаты расчета кинетики возврата с помощью предложенной модели хорошо согласуются с экспериментом.

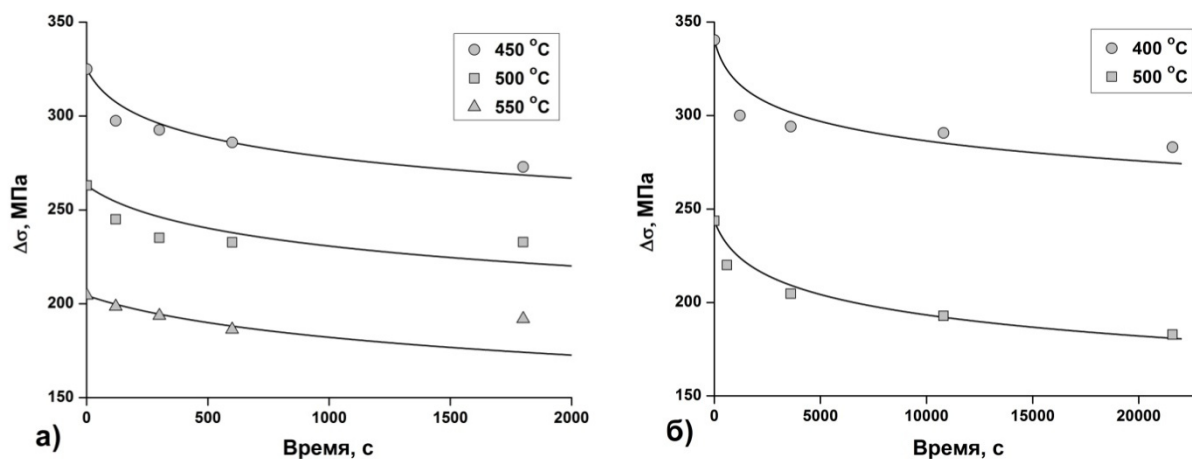


Рисунок 3 - Расчетные кинетические кривые разупрочнения при возврате деформированных ИФ-стали (а) и стали 08пс (б) и соответствующие экспериментальные данные для разных температур отжига.

Настоящее исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-19-01178).

Список литературы

1. Ferry M., Muljono D., Dunne D.P. Recrystallization Kinetics of Low and Ultra Low Carbon Steels during High-rate Annealing // *ISIJ Int.*, 2001, V.41, No.9, pp.1053-1060.
2. Senuma T. Present Status and Future Prospects of Simulation Models for Predicting the Microstructure of Cold-rolled Steel Sheets // *ISIJ Int.*, 2012, V.52, No.4, pp.679-687.
3. Zhu B., Miltzer M. 3D Phase Field Modeling of Recrystallization in a Low-carbon Steel // *Mater. Sci. Eng. A*, 2012, V.20, pp.1-17.
4. Verdier M., Brechet Y., Guyot P. Recovery of AlMg Alloys Flow Stress and Strain-hardening Properties // *Acta mater.*, 1999, V.47, No.1, pp.127-134.
5. Gorni A.A. Steel Forming and Heat Treating Handbook [Электронный ресурс], 2016, 189p. DOI: 10.13140/RG.2.1.1695.9764.
6. Kucera J., Stransky K. Diffusion in Iron, Iron Solid Solutions and Steels // *Mater. Sci. Eng.*, 1982, V.52, pp.1-38.
7. Martinez-de-Guerenu A., Arizti F., Gutiérrez I. Recovery during Annealing in a Cold Rolled Low Carbon Steel. Part II: Modelling the Kinetics // *Acta Mater.*, 2004, V.52, No.12, pp.3665-3670.