

АНАЛИЗ КИНЕТИКИ ДИНАМИЧЕСКОЙ И СТАТИЧЕСКОЙ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ ВО ВРЕМЯ ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ ТОЛСТОЛИСТОВОГО ПРОКАТА ИЗ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ БЕЙНИТНОЙ СТАЛИ

THE ANALYSIS OF KINETIC OF DYNAMIC AND STATIC RECRYSTALLIZATION OF AUSTENITE IN HIGH CARBON BAINITIC STEEL DURING PLATE HOT ROLLING

Дембичак Томаш^{а)}, Кнапиньски Марчин^{а)}, Гарбаж Богдан^{б)}, Савицки Сильвестер^{а)}

^{а)} Ченстоховский Политехнический Университет, al. Armii Krajowej 19, 42-200 Ченстохова, Факультет инжиниринга процессов, материалов и прикладной физики, Отделение моделирования и автоматизации процессов пластической переработки.

^{б)} Институт металлургии железа, ul. Karola Miarki 12-14, 44-100 Гливице

Abstract

This paper presents results of experimental studies using a Gleeble 3800 simulator. On the basis of plastic flow curves constitutive equations and mathematical model of dynamic and static recrystallization for the investigated steel were determinate. Develop models were implemented into program Forge 2008[®] which based on the finite element method. The results will be used for the optimization of high carbon steel plates hot rolling technology used in armor constructions.

1. Введение. Динамичное развитие современных технологий пластической переработки металлов имеет целью не только придать требуемую форму изделиям, а также получить как можно более подходящую структуру материала, имеющую основное влияние на механические свойства изделия. Моделирование процессов термопластической переработки является в настоящее время одним из наиболее эффективных исследовательских методов, используемых при оптимизации технологических параметров этих процессов. Самое главное достоинство этого метода заключается в получении количественного описания физических явлений, ход которых во время пластической переработки формирует окончательную микроструктуру и механические свойства изделий из стали. Благодаря этому можно также анализировать влияние эволюции зерна аустенита в фазе формирования металла при высокой температуре на динамику его распределения во время охлаждения, а также получение микроструктуры изделия или заготовки

после охлаждения до температуры окружающей среды.

2. Материал для исследований. Материал, который использовался для исследования – это высокоуглеродистая бейнитная сталь, разработанная в Институте металлургии железа в г. Гливице (Польша), содержащая около 0,8% угля и добавки Si, Mn, Mo, Co, а также микродобавки других элементов. Высокоуглеродистые бейнитные стали дают возможность получения очень высоких показателей прочности (твердость до ок. 700 HV, прочность до 2,5÷3,0 GPa) и одновременно хорошей вязкости. Разработанная высокоуглеродистая бейнитная сталь является новым материалом, который еще до сих пор не производился в промышленных масштабах. Внедрение бейнитной стали нового поколения в промышленность планируется в 2013 году. В таблице 1 представлен химический состав полупромышленной плавки высокоуглеродистой бейнитной стали, изготовленной в ИМЖ, из которой сделаны образцы для исследований.

Таблица 1. Химический состав исследуемой высокоуглеродистой бейнитной стали, % от массы

<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Mo</i>
0,83	2,20	1,65	0,009	0,014	0,016	0,02	0,39
<i>Co</i>	<i>V</i>	<i>Ti</i>	<i>Al</i> <i>полный</i>	<i>Al</i> <i>металл</i>	<i>Cu</i>	<i>N</i>	<i>O</i>
1,58	0,092	0,002	0,039	0,038	0,018	0,004	0,0009

3. Ход и результаты исследования. На основании экспериментальных исследований были определены кривые пластического течения, которые представлены на рисунке 1. Исследования проводились на параллелепипедных образцах 10×15×20 мм с использованием устройства Gleeble 3800.

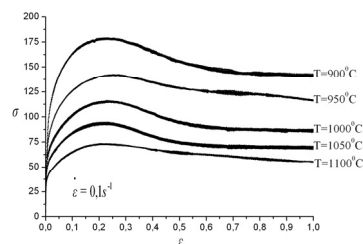


Рис. 1. Кривые пластического течения в диапазоне температур 900÷1100°C, для скорости деформации 0,1с⁻¹

4. Динамическая рекристаллизация.

Критическая деформация, после превышения которой начинается динамическая рекристаллизация для исследуемой марки стали определена уравнением (1):

$$\varepsilon_{kr} = 0,65\varepsilon_p \quad (1)$$

где: ε_{kr} - критическая деформация, ε_p – деформация, при которой напряжение достигает максимальной величины (на разговорном языке: деформация пика), $k = 0,65$ - постоянная величина, определенная из отношения $\varepsilon_{kr}/\varepsilon_p$ для величин из кривых пластического течения.

Коэффициенты, выступающие в уравнении (2) определяют величины деформации пика, определенной на основании проведенных экспериментальных исследований в соответствии с методикой, описанной в работе [1,2]:

$$\varepsilon_p = AZ^b \quad (2)$$

где: A- постоянная материала, определенная экспериментально, b- показатель степени, определенный экспериментально, Z- параметр

Зенера – Холломона $Z = \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right)$, $\dot{\varepsilon}$ - скорость деформации, Q- энергия активации, R- газовая постоянная, T- температура деформации.

На рисунках 2 и 3 представлена методика определения коэффициентов конstitutивных уравнений математической модели динамической рекристаллизации исследуемого материала.

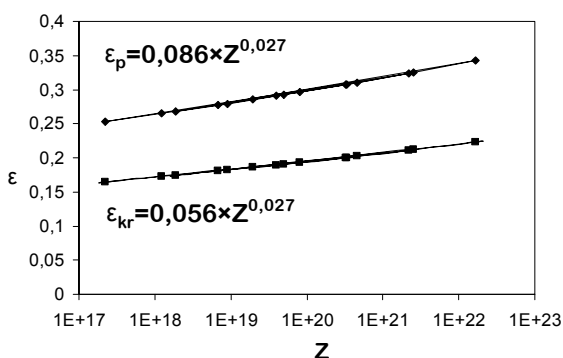


Рис.2. Отношения, представляющие ε_p и ε_{kr} в функции параметра Зенера Холломона

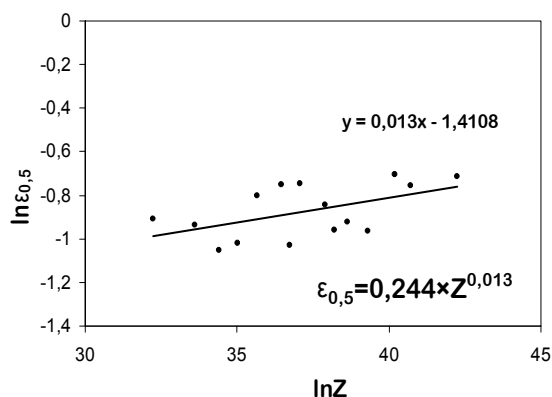


Рис.3. Отношение, представляющее $\varepsilon_{0,5}$ в функции параметра Зенера Холломона

Величина зерна рекристаллизованного аустенита в результате динамической рекристаллизации определена уравнением (3), для которого способ определения и величины коэффициентов представлены на рисунке 4.

$$d_{RDX} = AZ^b \quad (3)$$

где: A, b - постоянные материала, определенные для исследуемой марки материала

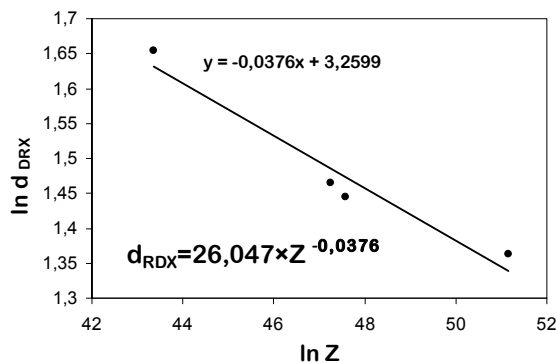


Рис.4. Отношение, представляющее величину зерна динамически рекристаллизованного аустенита в функции параметра Зенера Холломона.

Часть объема динамически рекристаллизованного зерна легированного аустенита определена на основании уравнения (4), используя методику, описанную в работе [1]:

$$X_{dyn} = \left[1 + k_v \left(1 - \frac{\varepsilon - \varepsilon_{kr}}{\varepsilon_{0,5} - \varepsilon_{kr}}\right)\right]^{-1} \quad (4)$$

где: X_{dyn} - часть объема, рекристаллизованная динамически, k_v - постоянная, связанная со скоростью динамической рекристаллизации, ε - пластическая деформация, ε_{kr} - критическая деформация, $\varepsilon_{0,5}$ - деформация, при которой наступает 50 % динамической рекристаллизации.

Величина постоянной k_v для исследуемой марки материала была определена на основании линейной регрессии отношения $\ln((1-X_{dyn})/(X_{dyn}))$ от $1 - (\varepsilon - \varepsilon_{kr})/(\varepsilon_{0,5} - \varepsilon_{kr})$, которое представлено на рисунке 5. Определенная величина параметра ($\ln k_v$) составила 15,41. Кинетика динамической рекристаллизации представлена на рисунке 6.

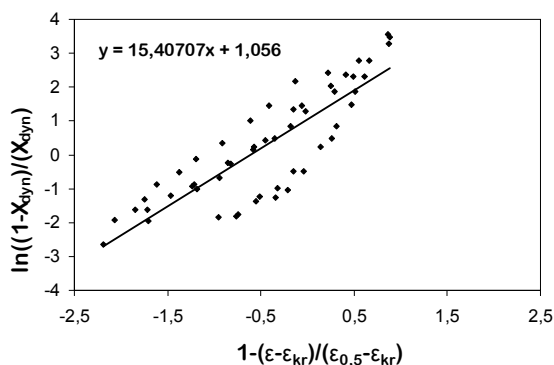


Рис.5. График, представляющий отношение $\ln((1-X_{dyn})/X_{dyn})$ от $1-(\epsilon-\epsilon_{kr})/(\epsilon_{0,5}-\epsilon_{kr})$

5. Статическая рекристаллизация. Для оценки количества статически рекристаллизованной фазы использовался коэффициент мягкости, определенный выражением (5) [3,4,5]. На рисунке 7 представлена методика определения коэффициента мягкости.

$$X_m = \frac{S_0 - S_2}{S_0 - S_1} \times 100\% \quad (5)$$

где X_m - коэффициент мягкости материала в %, S_0 - поле поверхности под кривой для постоянной деформации, S_1, S_2 - поля поверхности под кривыми первичной и вторичной деформации, соответственно.

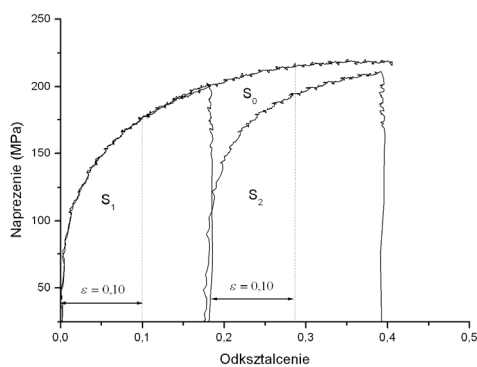


Рис.7. Метод определения коэффициента мягкости (X_m) для $T=950^\circ\text{C}$, $\dot{\epsilon}=0,1 \text{ c}^{-1}$

Изменение объема материала статически рекристаллизованного после пластической деформации было определено с использованием уравнения Аврами:

$$X_s = 1 - \exp\left(-0,693 \frac{t}{t_{0,5}}\right)^{0,116} \quad (6)$$

где: X_s - часть статически рекристаллизованной фазы, $t_{0,5}$ - время, необходимое для проведения статической рекристаллизации в 50% объема материала, n - показатель Аврами, выведенный логарифмируя уравнение с обеих сторон (6),

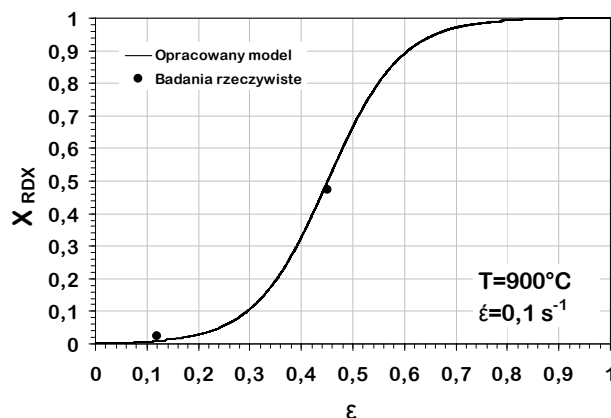


Рис.6. Кинетика динамической рекристаллизации для исследуемой марки стали

$\ln[\ln(1/1-X)] = \ln 0,693 + n \ln t - n \ln t_{0,5}$, t - время от момента завершения пластической деформации. Время, необходимое для рекристаллизации 50% объема материала было определено с помощью уравнения:

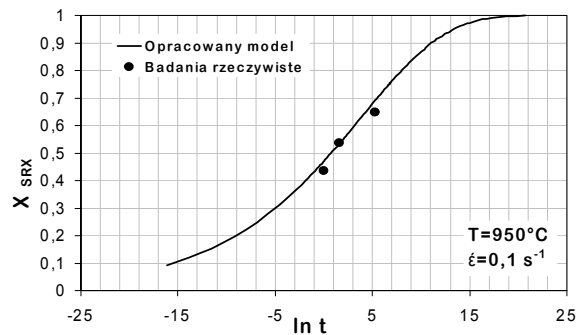
$$t_{0,5} = 0,0397 \epsilon^{0,5167} \dot{\epsilon}^{-0,2389} d_0^{0,8641} \exp\left(\frac{30427}{RT}\right) \quad (7)$$

где: $\epsilon, \dot{\epsilon}$ - величина деформации и скорость деформации, R - газовая постоянная, T - температура [K], d_0 - величина зерна аустенита до деформации. Коэффициенты, выступающие в уравнении (7) были получены из отношения $\ln t_{0,5} - \ln d_0$, $\ln t_{0,5} - \ln \dot{\epsilon}$, $\ln t_{0,5} - \ln \epsilon$, а также $\ln t_{0,5} - 1/T$. Величина статически рекристаллизованного зерна аустенита рассчитана по формуле (8):

$$d_{SRX} = 278111,1 d_0^{-0,248} \dot{\epsilon}^{5,2482} \exp\left(-\frac{8465,4}{RT}\right) \quad (8)$$

где: d_0 - первоначальная величина зерна аустенита. Коэффициенты, выступающие в уравнении (8) получены из отношения $\ln d_{SRX} - \ln d_0$, $\ln d_{SRX} - \ln \dot{\epsilon}$, а также $\ln d_{SRX} - 1/T$

На рисунке 8 представлена кинетика статической рекристаллизации, определенная с помощью разработанной экспериментальной модели.



где: — разработанная модель, • реальные исследования

Рис.8. Часть рекристаллизации в функции времени, определенная на основании модели и экспериментальных исследований для температуры 950°C .

6. Численное моделирование. На основании разработанных в математических моделях коэффициентов конститутивных уравнений были проведены численные симуляции процесса горячей

а)



прокатки толстолистного металла для прокатной линии LPS. На рисунок 9 представлена численные симуляции в программу Forge 2008.

б)

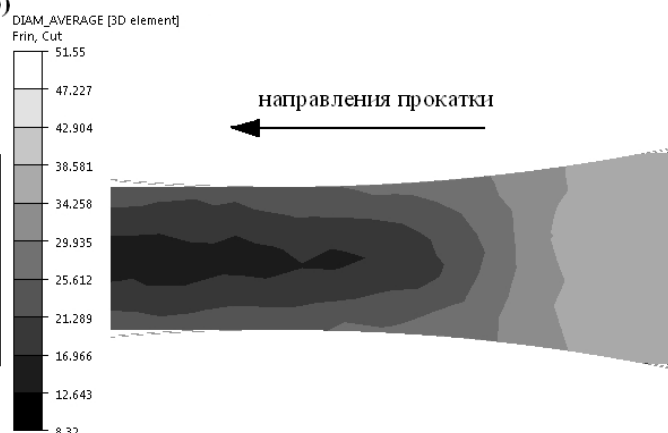


Рис.9. Результаты исследования численное моделирование во время: а) пластическая деформация, б) средний диаметр зерна аустенита

7. Подведение итогов. Целью проведенных исследований было определение кинетики динамической и статической рекристаллизации легированного аустенита в высокоуглеродистой легированной конструкционной стали. На основании экспериментальных исследований были определены конститутивные уравнения, которые служат для разработки модели развития микроструктуры исследуемого сорта стали в условиях появления динамической и статической рекристаллизации. Разработанные математические модели были проверены на основании результатов опытов. Модели также использовались в коммерческом программном обеспечении для симуляции процессов пластической переработки Forge 3. При использовании этого коммерческого обеспечения были проведены численные симуляции развития микроструктуры легированного аустенита в условиях горячекатаного толстолистного проката.

Библиография

1. Liu J., Cui Z., Ruan L.: A new kinetics model of dynamic recrystallization for magnesium alloy AZ31B, *Materials Science and Engineering*, A529, 2011.
2. Shaban M., Eghbali B.: Determination of critical conditions for dynamic recrystallization of a microalloyed steel, *Materials Science and Engineering*, A527, 2010.
3. Kliber J.: Determination of degree of softening in steel by means of torsion plastometer, *prezentacija podczas konferencji Mezdunarodnoy Kazachstanskoy metalurgitcheskoy konferenciji "Kazachstanskoy Magnitkie 50 liet"*, Temirtau, 2010.
4. Jung K.H., Lee H.W., Im Y.T.: Numerical prediction of austenite grain size in bar rolling process using an evolution model based on a hot compression test, *Materials Science and Engineering A* 519, 2009.
5. Jung K.H., Lee H.W., Im Y.T.: A microstructure evolution model for numerical prediction of austenite grain size distribution, *International Journal of Mechanical Science* 52, 2010.