

УДК 621.77.08

К вопросу оценки разноструктурности микроструктуры при построении диаграмм рекристаллизации

Баженев Евгений Олегович^{1(*)}

bazhenov98evgenii@mail.ru

SPIN-код: 7411-6302

Галкин Владимир Викторович¹

lumi1950@mail.ru

SPIN-код: 3658-0503

Гаврилов Геннадий Николаевич¹

gavrilov1109@mail.ru

SPIN-код: 5312-7494

Дербенев Андрей Анатольевич²

a.derbenev@rsk-mig.ru

Вашурин Алексей Вячеславович²¹ НГТУ им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия² НАЗ «Сокол» — филиал АО «РСК «МиГ», Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Для определения оптимальных режимов горячей деформации предложено проводить оценку разноструктурности микроструктуры металлических сплавов при построении диаграмм рекристаллизации. Для совместной оценки величины зерна и его разноструктурности использован способ построения диаграмм рекристаллизации, при котором в продольных сечениях двух осажённых образцов со степенями обжатия 10 и 50 % проводились замеры зерна в центрах ячеек координатной сетки с размером 2,0×2,0 мм и их сопоставление с показателем интенсивности деформации, определённых методом математического моделирования с использованием метода конечных элементов, в частности программного комплекса DEFORM. Обсчёт микроструктуры средней площади зерна, неравномерности зерна в соответствии с баллом (гистограммы распределения) проводился на шлифах продольных сечений осажённых образцов с применением программного обеспечения Thixomet. Построенная диаграмма рекристаллизации аустенитной стали 08X18H10T в интервале температур 900–1150 °С в соответствии с оценкой дисперсности структуры позволила выявить механизмы рекристаллизации на её участках в зависимости от степени деформации и прогнозировать изменение показателя ударной вязкости в зависимости от режимов горячей деформации.

Ключевые слова: диаграмма рекристаллизации, рекристаллизация металлов и сплавов, интенсивность деформации, микроструктура, величина зерна

On the issue of assessing the grain size nonhomogeneity of microstructure in the construction of recrystallization diagrams

Bazhenov Evgeny Olegovich^{1(*)}

bazhenov98evgenii@mail.ru

SPIN-code: 7411-6302

Galkin Vladimir Viktorovich¹

lumi1950@mail.ru

SPIN-code: 3658-0503

Gavrilov Gennady Nikolaevich¹

gavrilov1109@mail.ru

SPIN-code: 5312-7494

Derbenev Andrey Anatolievich²

a.derbenev@rsk-mig.ru

Vashurin Alexey Vyacheslavovich²

¹ NNSTU n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

² Nizhny Novgorod aircraft building plant «Sokol» Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. To determine the optimal modes of hot deformation, it is proposed to evaluate the grain diversity of the microstructure of metal alloys when constructing recrystallization diagrams. For a joint assessment of the grain size and its grain size, a method for constructing recrystallization diagrams was used, in which the longitudinal sections of 2 deposited samples with compression degrees of 10 and 50 %. grain measurements were carried out in the centers of the cells of the coordinate grid with a size of 2.0×2.0 mm and their comparison with the strain intensity index determined by mathematical modeling using the finite element method, in particular the DEFORM software package. The calculation of the microstructure: the average grain area, grain unevenness in accordance with the score (distribution histograms) was carried out on the longitudinal sections of the deposited samples using the Thixomet software. The constructed diagram of the recrystallization of austenitic steel 08X18H10T, in the temperature range 900–1150 °C in accordance with the assessment of the dispersion of the structure, made it possible to identify the mechanisms of recrystallization in its sections depending on the degree of deformation and predict changes in the impact strength index depending on the modes of hot deformation.

Keywords: recrystallization diagram, recrystallization of metals and alloys, strain intensity, microstructure, grain size

Введение. В настоящее время для изготовления ответственных изделий машиностроительного назначения широко применяются высоколегированные конструкционные стали и сплавы. Важной технологической задачей является получение однородной структуры в процессе их производства [1]. Величина зерна и степень ее однородности являются важными характеристиками металлов и сплавов, определяющие уровень их структурно чувствительных механических и физических свойств [2, 3]. Разнозернистость материала оказывает существенное влияние на механические свойства, что делает ее одним из наиболее важных факторов при разработке и производстве изделий ответственного назначения. Укрупнение зерна стали практически не отражается на статических характеристиках ее механических свойств (твердость, сопротивление разрыву, предел текучести, относительное удлинение), но сильно снижает работу удара. Очевидно, что прогнозирование изменения показателя

ударной вязкости в зависимости от режимов горячей деформации является важной технической задачей.

Для выявления зависимости величины зерна от степени деформации и температуры строятся диаграммы рекристаллизации, которые представляются в трехмерном изображении.

Однако следует отметить, что на диаграммах рекристаллизации отсутствуют сведения о разноструктурности в силу большой трудоемкости и неточности количественного ее подсчета методами, приведенными в ГОСТ 5639–82. В силу очевидной целесообразности оценки разноструктурности микроструктуры металлических сплавов при построении диаграмм рекристаллизации, задача данного исследования — выявление способа, позволяющего выполнить совместную оценку измерения величины зерна и его разноструктурности.

Материалы и методы; результаты. Для решения поставленной задачи при построении диаграмм рекристаллизации был применен способ, который устранил нерешенные вопросы: большую трудоемкость построения диаграмм; неточность построения начального участка диаграмм до значения пороговой деформации; отсутствие информации о характере разноструктурности деформируемой структуры; отсутствие возможности применения диаграмм рекристаллизации в производственном процессе, характеризующимся сложным напряженным состоянием.

Разработанный способ [4] был основан на следующих положениях:

- использование неравномерности деформации материала при осадке, которая позволяет на продольных сечениях двух осаженных образцов с относительными деформациями 10 и 50 % определять значения фактических деформации осаживаемых образцов со степенями относительного обжатия по высоте 3, 5, 7, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 и 80 %;

- применение математического моделирования для определения степени деформации в показателе интенсивности в центрах ячеек координатной сетки размером $\sim 2,0 \times 2,0$ мм на продольных сечениях осаженных образцов;

- построении диаграмм рекристаллизации путем сопоставления значений интенсивности деформации и размера среднего диаметра зерна (средней площади), определяемых металлографическим методом в ячейках координатной сетки продольных сечений осаженных образцов.

Апробация предложенного способа была проведена при построении диаграммы рекристаллизации и оценке разноструктурности стали аустенитного класса 08X18H10T. При испытании использовались цилиндрические образцы с размерами: диаметр $d_0 = 50$ мм, высота $h_0 = 70$ мм, относительная длина $a_0 = h_0/d_0 = 1,4$. Образцы подвергались горячей осадке при температурах 900, 1000, 1050, 1100 и 1150 °С на кривошипном горячештамповочном прессе со скоростью деформации $\dot{\epsilon} = 0,2 \text{ с}^{-1}$ и двумя относительными степенями деформации ϵ_h : $\epsilon_h^1 = 10\%$ ($h_1 = 63$ мм, $d_T^1 = 25$ мм, $d_{\max}^1 = 52$ мм); $\epsilon_h^2 = 50\%$ ($h_2 = 35$ мм, $d_T^2 = 46$ мм, $d_{\max}^2 = 48$ мм);

Определение деформированного состояния в продольных сечениях осаженных образцов со степенями деформации 10 и 50 % выполнялось матема-

тическим моделированием с использованием программного комплекса DEFORM и упрощенных твердотельных моделей технологической оснастки и заготовки — цилиндрического образца, разработанных в программном пакете SolidWorks 2007 (рис. 1, а).

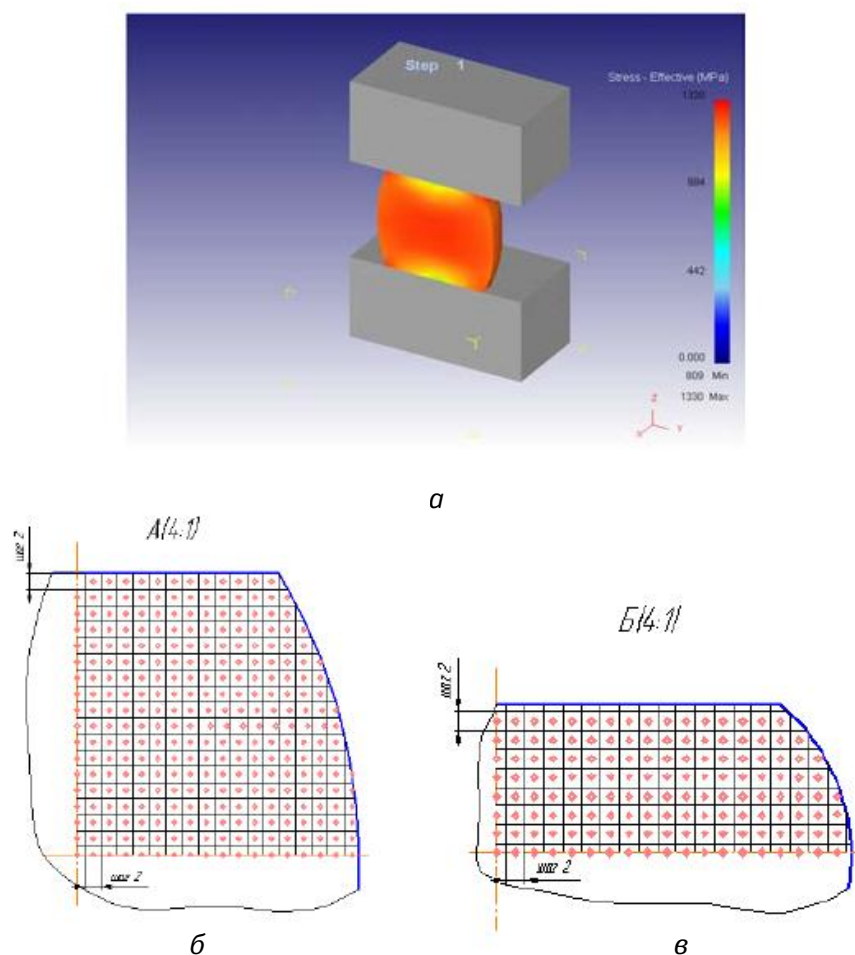


Рис. 1. Картина деформированного состояния осаженного образца (а) при моделировании (DEFORM); координатная сетка с ячейкой размером 2,0×2,0 мм на 1/4 части продольного сечения осаженного образца со степенями деформации 10 % (б) и 50 % (в)

В соответствии с координатной сеткой на продольных сечениях в ячейках размером 2,0×2,0 мм (рис. 1, б, в) определены значения интенсивности деформации. В порядке возрастания деформированного состояния выбраны для анализа 9 ячеек (табл. 1).

Таблица 1

Значение интенсивности деформации ε_i в порядке возрастания на поверхности шлифов образцов с относительными степенями деформации $\varepsilon_h^1 = 10\%$ и $\varepsilon_h^2 = 50\%$

$\varepsilon_h, \%$	Значение интенсивности деформации ε_i					
10	–	–	–	0,08	0,1	0,12
50	0,142	0,294	0,426	0,607	0,709	0,736

Осаженные образцы разрезались проволоочной электроэрозионной резкой по середине высоты, а далее одна из половинок по продольному сечению на четыре части для изготовления шлифа и последующего металлографического анализа (рис. 2).



Рис. 2. Внешний вид разрезанных образцов со степенями деформации 10 % (а) и 50 % (б) для изготовления шлифов

Металлографический анализ включил оценку среднего размера зерна по ГОСТ 5639–82 «Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна» с использованием программного обеспечения Thixomet. Программа обеспечивает мониторинг микроструктуры цифровых фотографий с увеличением до $\times 1000$, определение средней площади зерна, числа зерен на фотографии и их распределение по баллу зерна. Фотографии микроструктуры исследуемых ячеек шлифов продольных сечений были получены с применением оптического микроскопа KEYENCEVHX1000.

На основании сопоставления полученных данных величины зерна производилось построение диаграммы рекристаллизации и определение разнотерности микроструктуры.

Предварительный микроструктурный анализ деформированных образцов в интервале температур 900–1150 °С показал, что для стали X18H10T процессы рекристаллизации проявляются при температурах выше 1050 °С, поэтому были построены диаграммы рекристаллизации в диапазоне 1050–1150 °С. При температурах 1050–1100 °С при малой степени деформации $\varepsilon_i = 0,043$ первичная рекристаллизация структуры проявляется незначительно. При температуре 1150 °С картина процесса рекристаллизации совершенно изменилась (рис. 3). С начала деформации до степени деформации $\varepsilon_i = 0,294$, структура характеризуется значительным увеличением средней площади зерна в интервале (14386–16928) мкм^2 . Структура состоит из новых рекристаллизованных зерен и частично из сохранившихся еще исходных зерен. При дальнейшем повышении степени деформации средняя площадь зерна уменьшилась до значения $\sim 6000\text{--}7600 \text{ мкм}^2$ (4 балл).

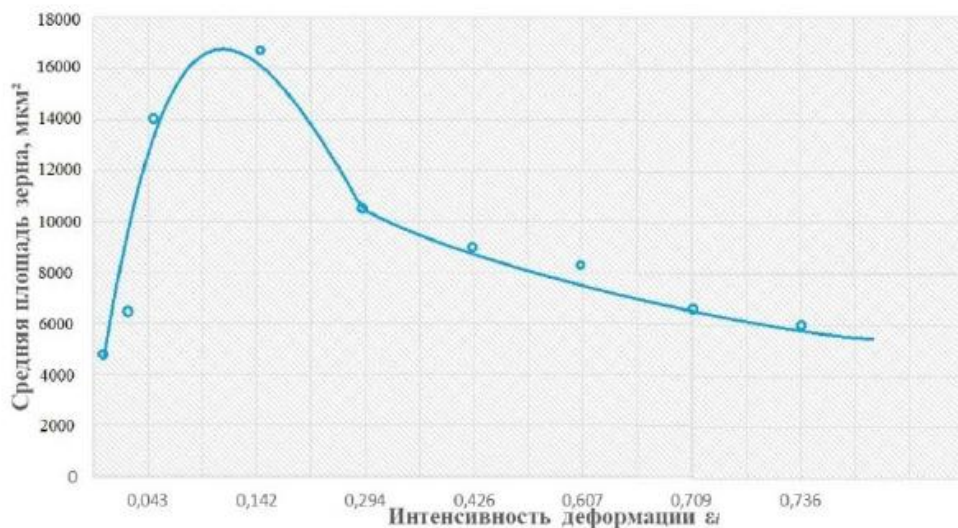


Рис. 3. Температурное сечение диаграммы рекристаллизации 2-го рода, полученное при анализе осаженных образцов при температуре 1150 °С

Построение диаграмм осуществлялось на основании данных, полученных при обработке изображений микроструктур в Thixomet (рис. 4, а, б). В данной программе средний размер зерна рассчитывается по найденному числу зерен и площади, которую они занимают на поверхности шлифа. Это также позволяет произвести обсчет микроструктуры по неравномерности зерна в соответствии с его баллом (рис. 4, в).

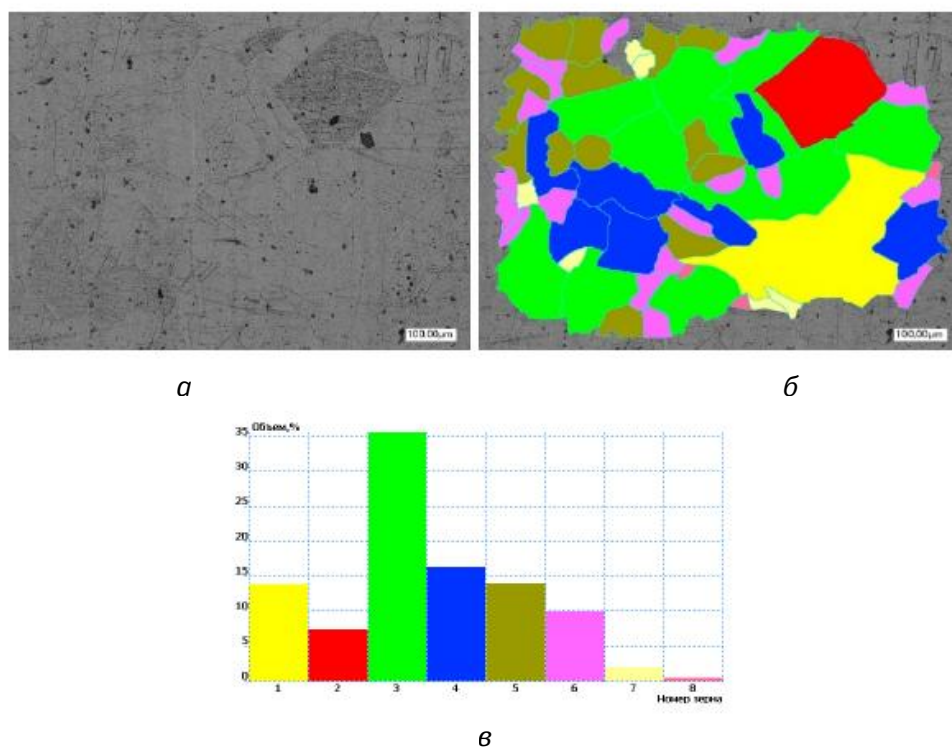


Рис. 4. Обработка микроструктуры образца (50 % осадка при $T = 1150$ °С) в точке соответствующей интенсивности деформации $\epsilon = 0,426$:
а — фотография микроструктуры; б — анализ изображения с помощью Thixomet;
в — гистограмма разнотерности

В табл. 2 сведены результаты оценки структуры материала по разностерности на определенных участках образца, осажденного при температуре 1150 °С, в зависимости от степени деформации.

Таблица 2

**Значения размера зерен и их распределение по баллу зерна
в их процентном соотношении по площади шлифа**

Интенсивность деформации	0,08	0,10	0,12	0,142	0,294	0,426	0,607	0,709	0,736
Балл зерна	G ₃ (13%)	G ₃ (29%)	G ₄ (18%)	G ₂ (29%)	G ₃ (36%)	G ₁ (14%)	G ₃ (43%)	G ₃ (13%)	G ₃ (26%)
	G ₄ (36%)	G ₄ (19%)	G ₅ (43%)	G ₃ (30%)	G ₄ (54%)	G ₃ (36%)	G ₄ (31%)	G ₄ (52%)	G ₄ (30%)
	G ₅ (11%)	G ₅ (26%)	G ₆ (26%)	G ₄ (19%)		G ₄ (16%)	G ₅ (16%)	G ₅ (22%)	G ₅ (22%)
	G ₆ (19%)	G ₆ (12%)	G ₇ (10%)	G ₅ (15%)		G ₅ (14%)			G ₆ (13%)
	G ₇ (10%)					G ₆ (10%)			

При анализе полученных данных определяются наиболее оптимальные режимы обработки стали, позволяющие создать условия для формирования микроструктуры с необходимым баллом зерна и с наименьшей степенью разностерности.

Закключение. Построенная диаграмма рекристаллизации аустенитной стали 08X18H10T в интервале температур (900–1150) °С, в соответствии с оценкой дисперсности структуры, позволяет выявить механизмы рекристаллизации на ее участках в зависимости от степени деформации и температуры. При анализе формирования структуры открывается возможность прогнозировать изменение показателя ударной вязкости в зависимости от режимов горячей деформации. Использование данного метода позволяет сформулировать научно-практические рекомендации для определения оптимальной режимов ковки и последующей термической обработки в производственном процессе для получения изделий и заготовок из крупногабаритных поковок высоколегированных сплавов и сталей ответственного назначения с прогнозированием механических свойств, в том числе ударной вязкости.

Список источников

- [1] Новиков И.И. *Теория термической обработки металлов*. Москва, Металлургия, 1986, 480 с.
- [2] Горелик С.С., Добаткин С.В., Капуткина Л.М. *Рекристаллизация металлов и сплавов*. Москва, МИСИС, 2005, 432 с.
- [3] Гуляев А.П. *Металловедение*. Москва, Металлургия, 1986, 542 с.
- [4] Галкин В.В., Гаврилов Г.Н., Вашурин А.В., Баженов Е.О., Итальянцев Д.С. *Способ построения зависимостей рекристаллизации*. Патент № 2817327 С1 РФ, бюл. № 11, 2024.