

УДК 621.8

## Влияние скорости пластической деформации и схемы напряжённого состояния на первичную рекристаллизацию металлов

Кокорева О.Г.

Представлены результаты исследования влияния скорости пластической деформации и схемы напряжённого состояния на первичную рекристаллизацию металлов. Зависимость микроструктуры металлов от скорости поверхностной пластической деформации и схемы напряжённого состояния является определяющим фактором, формирующим механические свойства металлов в целом, особенно при их нагреве после пластической деформации. Для этого использовались классические способы рентгенографического и микроструктурного анализа. Анализ полученных результатов показал, что скорость рекристаллизации уменьшается в результате предварительного упрочнения металлов, величина которого оценивалась по степени деформации в зависимости от схемы напряжённого состояния. Выполнена количественная оценка определяющих характеристик с помощью рентгенографического и структурного анализа опытных металлических образцов. Установлено, что скорость рекристаллизации металлов уменьшается при предварительном их упрочнении.

*Ключевые слова:* пластическая деформация, напряжённое состояние, рекристаллизация металлов, упрочнение, механические свойства, микроструктура, рентгенографический анализ, кристаллическая решётка, растяжение, сжатие.

## The effect of plastic deformation rate and stressed state scheme on the primary metal recrystallization

Kokoreva O.G.

The paper presents the research results on the effect of plastic deformation rate and the stressed state scheme on the primary metal recrystallization. The dependence of metal microstructure on the surface plastic deformation rate and the stressed state scheme is the major factor in identifying the mechanical properties of metals in general, especially when heating metals after their plastic deformation. Classical methods of x-ray and microstructure analysis are used. According to the obtained results, recrystallization rate is reduced as a result of prior metal hardening, the value of which is estimated according to the degree of strain depending on the stressed state scheme. The quantitative estimate of critical characteristics is completed by means of both X-ray and structural analysis of experimental metal samples. The recrystallization rate of metals decreases in their pre-hardening.

*Keywords:* plastic deformation, stress state, metal recrystallization, hardening, mechanical properties, microstructure, X-ray analysis, the crystal lattice, tension, compression.

### Введение

Одним из важных процессов упрочнения металлов и сплавов является рекристаллизация, которая формирует структуру и изменяет механические свойства при нагреве металла после пластической деформации. На рекристаллизацию металлов оказывает влияние большое число факторов, в том числе скорость

и вид деформации (схема напряжённого состояния) [1]. Однако влияние этих факторов недостаточно изучено и, на наш взгляд, требует дальнейшего исследования.

Цель исследования – рассмотреть вопросы влияния скорости пластической деформации и схемы напряжённого состояния на первичную рекристаллизацию металлов.

### Результаты исследования

Для исследования были выбраны металлы с разным типом кристаллической решетки: медь (99,91% Cu), имеющую ГЦК-решетку и армко-Fe (99,45 % Fe), имеющее ОЦК-решетку. Образцы из этих металлов предварительно отжигались и деформировались при комнатной температуре с разными скоростями. Статическая деформация измерялась на универсальной гидравлической машине УММ-50, динамическая - на пороховом копре.

При исследовании влияния схемы напряженного состояния были выбраны два вида деформации – растяжение и сжатие. Образцы подвергались предварительной деформации на величину  $\varepsilon = 10\%$ .

В качестве эквивалентной деформации принят октаэдрический сдвиг  $q_{окт} = 0,145$ , рассчитываемый по формулам:

- для растяжения

$$q_{окт} = \sqrt{2 \ln \frac{F_0}{F}};$$

- для сжатия

$$q_{окт} = \sqrt{2 \ln \frac{H_0}{H}}.$$

где  $F_0$ , – начальная площадь полученного сечения, мм<sup>2</sup>;

$H_0$  – начальная высота образца, мм;

$F$ ,  $H$  – соответственно текущие размеры

образцов.

Отжиг деформируемых образцов производился в специальной безинерционной печи с выдержкой от 30 мин до 60 мин.

В качестве параметров рекристаллизации были выбраны: температура начала  $T_p^H$  и температура конца  $T_p^K$  рекристаллизации и скорость роста зародышей рекристаллизованных зерен  $\tau_p^H$ . Эти параметры определялись: методом измерения твердости (по Виккерсу), рентгено- и микроструктурными методами.

$T_p^H$  определялась по резкому снижению твердости с повышением температуры нагрева и уточнялась рентгенографическим методом по появлению точечных «рефлексов» на рентгенограммах [2]  $T_p^K$  определялась по твердости и исчезновению фона на рентгенограммах.

Характеристикой скорости рекристаллизации являлось время  $\tau_p^H$  появления зародышей, фиксируемых по рефлексу на рентгенограмме, которое уточнялось с помощью микроструктурного анализа [3].

Анализ результатов исследования показывает, что скорость деформации почти не оказывает существенного влияния на  $T_p^H$  и  $T_p^K$ , хотя есть склонность к снижению  $T_p^H$  и температурного интервала  $T_p^K - T_p^H$  (табл.1).

Таблица 1

Металл, степень чистоты	Исслед. область темпе- рат.	Скорость деформации					
		2 мм/мин			50 м/с		
		Параметры первичной рекристаллизации					
		$t_p^H$ °C	$t_p^K$ °C	$\tau_p^H$	$t_p^H$	$t_p^K$	$\tau_p^H$ МИН
Медь (99,91%Cu)	200-270	160	250	15	140	200	6,5
Армко-Fe (99,45%Fe)	550-700	550	650	10	530	610	7,0

Таблица 2

Металл, степень чистоты	Иssl. обл. темпер.	Механическая схема деформации							
		Растяжение				Сжатие			
		Параметры первичной рекристаллизации							
		$T_p^H$ , °C	$T_p^K$ , °C	$\tau_p^H$	$\tau_{окт}$	$T_p^H$ , °C	$T_p^K$ , °C	$\tau_p^H$	$\tau_{окт}$
Медь (99,91%Cu)	320-370	270	480	15,5	8	280	480	18,2	6
Армко-Fe (99,45%Fe)	650-700	630	700	28,2	16	630	700	12,7	22

Скорость рекристаллизации, оцененная по  $\tau_p^H$ , увеличивается с возрастанием скорости деформации (табл.1). Об этом свидетельствуют результаты микроструктурного анализа.

Полученные результаты можно объяснить тем, что с увеличением скорости деформации возникает большее число искажений кристаллической решетки, большая доля запасенной (скрытой) энергии при деформации [4, 5, 6], которая является движущей силой первичной рекристаллизации.

Анализ результатов исследования образцов, подвергнутых деформированию растяжением и сжатием, имеющих различную схему напряженного состояния, показал, что вид деформации (схема напряженного состояния) не влияет на  $T_p^H$  и  $T_p^K$ . Скорость рекристаллизации, оцененная по  $\tau_p^H$ , уменьшается в последовательности растяжение-сжатие у меди, и сжатие-растяжение у армко-Fe. Это связано с ранней степенью упрочнения при различных схемах напряженного состояния. Величина степени упрочнения оценивалась по экстаэдрическому напряжению  $\tau_{окт}$  в зависимости от эквивалентной деформации (октаэдрический сдвиг  $q_{окт}$ ). Изменение упрочнения связано с изменениями в тонкой кристаллической структуре и разной плотностью дислокаций, возникающих при различных схемах напряженного состояния у металлов с разным типом кристаллической решетки (табл. 2).

Следует учесть, что время начала рекристаллизации  $\tau_p^H$  определялось при  $t=180^\circ\text{C}$  для меди, при  $t=550^\circ\text{C}$  для армко-Fe.

### Заключение

Таким образом, проведенные исследования показали, что скорость пластической деформации и схема напряженного состояния оказывают непосредственное влияние на рекристаллизации металлов. Выполнена количественная оценка определяющих характеристик с помощью рентгенографического и структурного анализа опытных металлических образцов.

В результате исследований установили, что скорость рекристаллизации металлов уменьшается при предварительном их упрочнении методом поверхностной пластической деформации, что оказывает влияние на механические свойства металлов.

### Литература

1. Горелик С.С. Рекристаллизация металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1967, 403 с.
2. Иверонова В.И., Жданов Г.С. К теории отдыха и рекристаллизации // Сборник «Рентгенография в применении к исследованию металлов». – М.-Л.: ОНТИ, НКТП, 1936.
3. Засимчук Е.О., Лариков Л.Н. Линейная скорость центров рекристаллизации в сильно деформированных никеле и железе // Доклады АН СССР, 1959, №1.
4. Большанина М.А., Панин В.Е. Скрытая энергия деформации // Сб. «Исследование по физике твердого тела». – М.: Из-во АН ССР, 1957.

5. Эпштейн Г.Н., Ноткин А.Б. Особенности рекристаллизации никеля после высокоскоростной деформации под давлением // Физика металлов и металловедение, 1971, т.32, в.4.

6. Апрощенко О.С., Пашков П.О., Рядинская И.М. Исследование упрочненного взрывом армко-Fe. // Физика металлов и металловедение, 1966, т.21, в.1.

### References

1. Gorelik S.S. Rekrystallizacija metallov i splavov [Recrystallization of metals and alloys]. – Moscow: Mettallurgia, 1967, 403 p.

2. Iveronova V.I., Zhdanov G.S. K teorii otdyha i rekrystallizacii [On the theory of relaxation and recrystallization] // Rentgenografija v primenenii k issledovaniju metallov [Radiography in the application to the study of metals]. – Moscow: ONTI, NKTP, 1936.

3. Z asimchuk E.O., Larikov L.N. Linejnaja skorost' centrov rekrystallizacii v sil'no deformiro-

vannyh nikelje i zheleze [The linear velocity of the center of recrystallization in heavily deformed nickel and iron] // Doklady AN SSSR [Reports of the USSR Academy of Sciences], 1959, №1.

4. Bolshanina M.A., Panin V.E. Skrytaja jenergija deformacii [Latent energy of deformation] // Issledovanie po fizike tverdogo tela [The research in solid state physics]. – Moscow, 1957.

5. Jepshtejn G.N., Notkin A.B. Osobennosti rekrystallizacii nikelja posle vysokoskorostnoj deformacii pod davleniem [Properties after recrystallization nickel high deformation under pressure] // Fizika metallov i metallovedenie [The Physics of Metals and Metallography], 1971, vol.32, Issue 4.

6. Atroshhenko O.S., Pashkov P.O., Rjadinskaja I.M. Issledovanie uprochnennogo vzryvom armko-Fe. [The study reinforced the explosion of Armco-Fe] // Fizika metallov i metallovedenie [The Physics of Metals and Metallography], 1966, vol.21, Issue 1.

**Статья поступила в редакцию 1 сентября 2014 г.**

---

*Кокорева Ольга Григорьевна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Муромского института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Муром, Россия. E-mail: kokoreva\_olga\_2.11@mail.ru

---

*Kokoreva Olga Grigorjevna* – Ph.D., Murom Institute of Vladimir State University, Murom, Russia. E-mail: kokoreva\_olga\_2.11@mail.ru