

УДК 669.017:539.4 + 548.571

А. Г. АНИСОВИЧ

**ОСОБЕННОСТИ РЕЛАКСАЦИОННОГО ПРОЦЕССА В МЕТАЛЛАХ  
ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ***Физико-технический институт НАН Беларуси**(Поступила в редакцию 04.09.2014)*

Эволюция структуры металла при внешних воздействиях может рассматриваться как результат деформации, сопровождающейся накоплением дефектов кристаллического строения, и совокупности процессов разупрочнения. Общим для процессов разупрочнения является релаксация напряжений. Существующая классификация релаксационных процессов основана на экспериментальных данных по изменению физико-механических свойств деформированных или облученных металлов при их отжиге и учитывает вид дефектов кристаллического строения, участвующих в процессах релаксации, а также механизмы их перераспределения. Этапы релаксации отличаются по энергии активации элементарных механизмов (таблица) [1].

**Элементарные процессы восстановления электросопротивления в меди**

Элементарный процесс	Стадия восстановления	Интервал температур, К	Энергия активации, эВ	Предполагаемая суть элементарных процессов
Отдых	I	30–40 (0,03 $T_{пл}$ )	0,1–0,2	Рекомбинация пар: межузельный атом + вакансия
	II	90–200 (0,1–0,15 $T_{пл}$ )	0,2–0,5	Миграция межузельных атомов. Миграция групп вакансий (бивакансий и др.)
	III	210–320 (0,16–0,20 $T_{пл}$ )	0,7	Миграция вакансий к ловушкам. Миграция бивакансий
Полигонизация	IV	~ 400 (0,27–0,35 $T_{пл}$ )	1,2	Миграция вакансий к дислокациям, способствующая их перераспределению с образованием малоугловых границ и частичной аннигиляцией дислокаций
Первичная рекристаллизация	V	> 500 (0,35–0,40 $T_{пл}$ )	2,1	Перемещение и термически активируемое скольжение дислокаций, вызывающее их частичную аннигиляцию и образование высокоугловых подвижных границ

Элементарные механизмы релаксационных процессов весьма разнообразны. К их числу могут быть отнесены:

- перемещение, сток и аннигиляция точечных дефектов и их комбинаций;
- простое и поперечное скольжение дислокаций (октаэдрическое скольжение), сопровождающееся их частичной аннигиляцией;
- переползание дислокаций;
- формирование и миграция малоугловых границ;
- фрагментация;
- формирование и миграция высокоугловых границ.

Классификация, основанная на учете типа дефектов, участвующих в релаксации, и элементарных механизмов их перемещения, сводится к следующему: отдых; «собственно» возврат [2]; полигонизация; рекристаллизация.

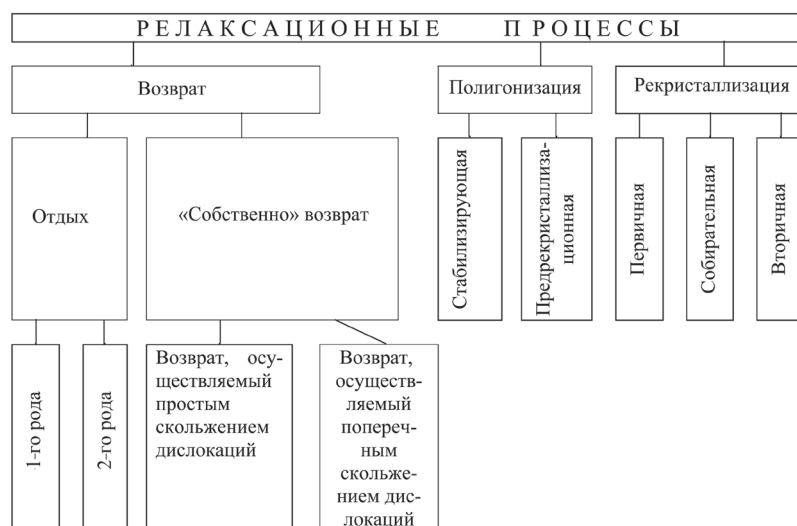


Рис. 1. Классификация релаксационных процессов

Основной механизм на стадии отдыха вакансионный, на всех последующих стадиях релаксации дислокационный. Стадийность релаксации, а следовательно, трансформация структуры деформированного металла зависят от структуры, сформировавшейся в процессе деформации, а также температурно-временного режима отжига. Классификационная схема релаксационных процессов, созданная на основе анализа данных [1–5], приведена на рис. 1.

Для «собственно» возврата [2] преимущественным элементарным механизмом является поперечное скольжение дислокаций. Полигонизация осуществляется переползанием дислокаций. Такой механизм возможен только под действием высоких напряжений при достаточно высоких температурах, обеспечивающих высокую подвижность вакансий. Дислокационные механизмы «собственно» возврата и полигонизации могут быть описаны в представлениях трансляции и взаимодействия индивидуальных дислокаций и их комплексов. «Собственно» возврат реализуется в металлах, предварительная деформация которых соответствует второй или началу третьей стадии деформационного упрочнения, когда распределение дислокаций относительно равномерное или имеет место несовершенная ячеистая структура. В этом случае при отжиге металла дислокации перегруппировываются с их частичной аннигиляцией путем скольжения в собственной плоскости скольжения, а также восхождением в перпендикулярные им плоскости по механизмам поперечного скольжения и переползания (при более высоких температурах). При этом формируется ячеистая структура, подобная структуре, формирующейся при динамическом возврате.

В случае нагрева металла с ячеистой структурой ее эволюция включает «сплющивание» объемных дислокационных сплетений (стенок) и превращение их в плоские дислокационные стенки (такие стенки являются границами полигональных блоков). Границы этих блоков – границы большой кривизны и высокой подвижности.

«Классическим» релаксационным (разупрочняющим) процессом является рекристаллизация, включающая в себя формирование и рост зародышей с высокоугловыми границами (первичная рекристаллизация). Движущая сила собирательной рекристаллизации – уменьшение зернограничной энергии за счет сокращения протяженности границ зерен.

В соответствии с современными представлениями [6–13] пластическая деформация является релаксационным процессом. Реализация релаксационных процессов во время деформирования металла подтверждается кривой деформационного упрочнения, третий участок которой соответствует стадии динамического возврата, осуществляемого поперечным скольжением дислокаций, что обеспечивает формирование ячеистой структуры. Зарождение пластического сдвига при деформировании металла может проходить в зонах локализации напряжений. Последующее пластическое течение способствует перераспределению локальных напряжений по всему объему кристалла и рассматривается как релаксационный процесс. На этом основании утверждается, что кривая пластической деформации твердого тела определяется тремя процессами:

зарождением пластического сдвига в локальной зоне сдвигового возбуждения;  
релаксацией напряжений вследствие движения дефектов, участвующих в формировании новой структуры;

деформационным упрочнением вследствие взаимодействия дефектов.

При пластической деформации металла могут осуществляться трансляционные, изгибные и поворотные моды деформации. Последовательная смена мод деформации и дислокационной структуры свидетельствует о том, что каждый последующий этап трансформации структуры при пластической деформации является релаксационным по отношению к предыдущему этапу.

Реальная кривая деформационного упрочнения отражает зарождение пластического сдвига в зонах локализации напряжений при напряжении выше критического, дальнейшее развитие релаксационных процессов, связанных с перераспределением дислокаций, а также деформационное упрочнение металла, обусловленное взаимодействием дислокаций (рис. 2). Участки  $a'b'$ ,  $a''b''$ ,  $a'''b'''$  соответствуют релаксационным кривым напряжений. Участки параболического упрочнения кривых деформационного упрочнения моно- и поликристаллов могут быть объяснены как результирующие деформационного упрочнения и разупрочнения за счет развития релаксационных процессов отдыха, возврата, и «несовершенной» полигонизации, осуществляемой путем поперечного скольжения дислокаций. Участок 1 на кривой деформационного упрочнения монокристалла – результат роста  $\sigma$  за счет повышения концентрации точечных дефектов и линейных дислокаций (линейная зависимость) и снижения  $\sigma$  за счет развития отдыха (экспонента).

Развитие исследований в области пластической деформации позволило создать классификацию релаксационных процессов, в основу которой положен способ снижения внутренних упругих напряжений [14]:

пластическая релаксация, в процессе которой металл релаксирует упругую деформацию в пластическую путем возникновения и движения дислокаций;

аннигиляционная релаксация, связанная с уменьшением упругих напряжений вследствие понижения плотности дислокаций;

компенсационная релаксация за счет локализации упругой энергии при формировании конфигураций дефектов;

образование трещин.

Классификация основана на различии в способах перемещения дефектов: сдвиговой механизм, двойникование, диффузионно-сдвиговая релаксация, диффузионный механизм.

Условия пластической деформации при импульсных воздействиях на материалы существенно отличаются от условий статического деформирования из-за кратковременности и периодичности силового воздействия и разнообразия механизмов релаксации внутренних напряжений. В частности, при термоимпульсной (термоциклической) обработке металлов формирование структуры обеспечивается деформационной и тепловой компонентами с участием всех мод пластичности и дефектов разного вида (вакансии, дислокации, дефекты упаковки, диспланации и дисклинации). Кинетика процесса релаксации определяется типом импульсного воздействия (теплого, лазерного, магнитного и т. п.). Релаксационные процессы оказывают существенное влияние на подвижность атомов и массоперенос в материале. Вследствие этого структурообразование в металлах необходимо рассматривать как результат деформационного эффекта при импульсном нагружении и релаксационного эффекта при смене знака нагрузки. При импульсных воздействиях деформационные процессы и релаксация напряжений повторяются периодически (рис. 3).

Механизм структурообразования при импульсных воздействиях, как и в случае реализации диффузионно-сдвигового механизма релаксации [14]

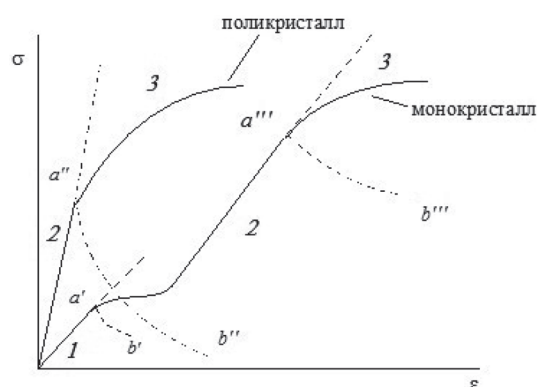


Рис. 2. Кривые деформационного упрочнения моно- и поликристаллов: 1, 2, 3 – номера стадий на кривой пластической деформации

при пластической деформации, подобен таковому при термомеханической обработке. Однако отличительной особенностью импульсных воздействий является то, что структурообразование протекает в условиях значительного повышения концентрации вакансий. Коэффициент диффузии при термоциклической обработке (в частности, для алюминиевых сплавов) может увеличиваться на три порядка [15].

Формирование структуры происходит поэтапно и зависит от количества циклов обработки. При небольшом количестве циклов релаксируют напряжения, связанные с образованием дислокационных скоплений в плоскостях скольжения, что делает возможным скольжение дислокаций в первичных системах на последующих циклах. При этом осуществляются множественное скольжение дислокаций, их поперечное скольжение с образованием дислокационных сеток и ячеистой структуры.

В результате действия деформационной компоненты уровень напряжений по границам зерен возрастает и при наращивании воздействия имеет место возникновение активированных [16] или атом-вакансионных [13] состояний. На этой стадии обработки основным релаксационным процессом является специфический процесс фрагментации, главная особенность которого – формирование высокоугловых границ деформационного типа с повышенной плотностью зернограницных дислокаций. (Под фрагментом в данном случае понимается участок структуры, отделенный высокоугловой границей; плотность дислокаций внутри фрагмента мала.) Процессу фрагментации предшествует существенное повышение концентрации дефектов структуры на межзеренных границах. Образование фрагментов происходит с участием ротационных мод пластической деформации в зонах локализации напряжений, преимущественно около высокоугловых границ исходной структуры. Поскольку дислокации по телу фрагментов отсутствуют (или их плотность минимальна), основной вклад в величину их плотности вносят зернограницные дислокации. Анализ экспериментальных данных показывает, что фрагментированной структуре соответствует максимальная плотность дислокаций.

Если в металле запасено максимальное количество энергии, которую он способен сохранить, то образуется поверхность раздела с максимальной плотностью дислокаций [17]. Брэггом показано, что энергия наклепа связана с образованием локализованных дислокаций или интеркристаллитных границ. Формирование таких границ происходит при импульсных воздействиях. Сформированные фрагменты проявляются при микроструктурном анализе как вновь образованные мелкие зерна. С этим этапом связано диспергирование структуры.

Изменение масштабного фактора структуры вызывает уширение интерференционных линий рентгенограммы [2, 17]. Существующие теории деформационного упрочнения исходят из прямо пропорциональной зависимости между квадратом напряжения течения и плотностью дислокаций. В [2] обосновано подобие кривых упрочнения и физического уширения интерференционных линий при пластической деформации.

При формировании фрагментированной структуры в металлической системе запасается энергия, которая может существовать посредством дефектов кристаллического строения и регистрироваться экспериментально как энергия искажений кристаллической решетки, т. е. напряжений 2-го рода. Их энергия  $W$  в единице объема твердого тела связана с физическим уширением интерференционной линии [18]:

$$W = \frac{E}{2} \frac{\beta^2}{16 \operatorname{tg}^2 \theta},$$

где  $E$  – модуль упругости;  $\beta$  – физическое уширение, связанное с углом дифракции  $\theta$  и средней деформацией решетки  $\Delta a/a$  соотношением  $\beta = 4 \frac{\Delta a}{a} \operatorname{tg} \theta$ .

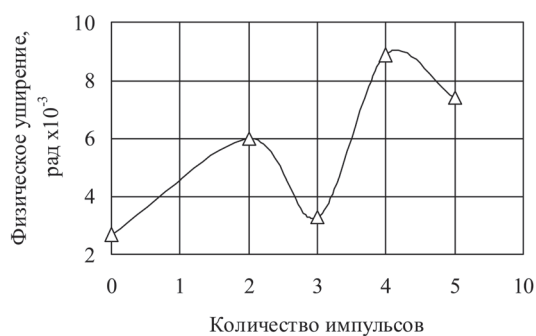


Рис. 3. Периодичность изменения физического уширения интерференционной линии (420) сплава Al–3,8%Cu после закалки и термоциклической обработки в интервале 300–20 °C [15]

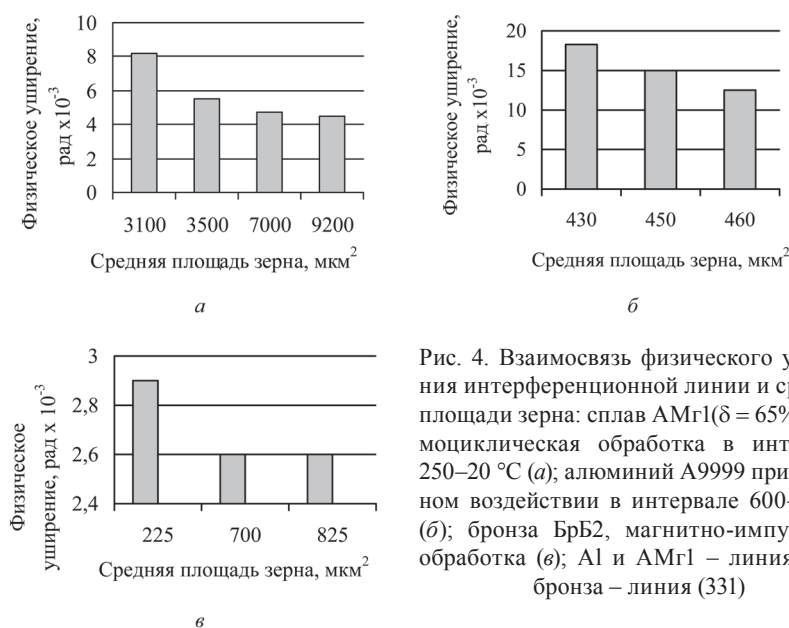


Рис. 4. Взаимосвязь физического уширения интерференционной линии и средней площади зерна: сплав АМг1 ( $\delta = 65\%$ ), термоциклическая обработка в интервале 250–20 °С (а); алюминий А9999 при лазерном воздействии в интервале 600–20 °С (б); бронза БрБ2, магнитно-импульсная обработка (в); А1 и АМг1 – линия (420), бронза – линия (331)

Изменение физического уширения может характеризовать изменение внутренней энергии металла при деформации, а также при других процессах, вызывающих микропластическую деформацию.

Специфика формирования структуры при импульсных воздействиях и наблюдаемые при этом эффекты изменения физических свойств дают основание считать физическое уширение интерференционных линий характеристикой энергетического состояния структуры. Фрагментация (диспергирование микроструктуры) вызывает повышение физического уширения интерференционной линии рентгенограммы. Наиболее характерные примеры представлены на рис. 4. Зависимости кривых изменения физического уширения и размера зерна аналогичны для импульсных воздействий различной природы [15]. Новые фрагменты имеют низкую плотность дислокаций; высокоориентированные границы являются основным дефектом структуры. Вместе с тем граница может быть представлена как локальное скопление дислокаций высокой плотности, тогда можно считать физическое уширение пропорциональным плотности дислокаций, упорядоченных определенным образом.

Границы фрагментов являются высокоэнергетическими благодаря разориентировке, а также иной внутренней структуре самой границы (что обуславливает их высокую термическую стабильность и более высокий уровень физико-механических свойств [15]). Равноосная форма фрагментов обеспечивает, несмотря на высокий уровень напряжений, скомпенсированную схему напряженного состояния.

Таким образом, в отличие от пластической деформации, когда металл в процессе действия внешней деформирующей нагрузки проходит ряд релаксационных процессов, оканчивающихся разрушением, релаксация металла при внешнем импульсном нагружении представляет собой переход в некоторое новое состояние, позволяющее повторение (или продолжение) нагружения. В этом смысле формирование фрагментированной структуры при импульсных воздействиях является релаксационным явлением, альтернативным разрушению [19].

## Литература

1. Берштейн М. Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов. М., 1968.
2. Тофпенец Р. Л. Разупрочняющие процессы в стареющих сплавах. Мн., 1979.
3. Губкин С. И. Пластическая деформация металлов. М., 1961.
4. Горелик С. С. Рекристаллизация металлов и сплавов. М., 1967.
5. Новиков И. И. Теория термической обработки. М., 1986.
6. Панин В. Е. и др. Структурные уровни пластической деформации и разрушения. Новосибирск, 1990.

7. *Иванова В. С.* Синергетика, прочность и разрушение металлических материалов. М., 1992.
8. *Лихачев В. А.* и др. Кооперативные деформационные процессы и локализация деформации. Киев, 1989.
9. *Иванова В. С.* и др. Синергетика и фракталы в материаловедении. М., 1994.
10. *Рыбин В. В.* Большие пластические деформации и разрушение металлов. М., 1986.
11. *Конева Н. А.* и др. В кн.: Физические аспекты прогнозирования разрушения и формирования гетерогенных материалов. Л., 1987.
12. *Константинова Т. Е., Примислер В. Б., Добриков А. А.* // Металлофизика и новейшие технологии. 1996. Т. 10. С. 70–77.
13. *Панин В. Е.* и др. Структурные уровни деформации твердых тел. Новосибирск, 1985.
14. *Фарбер В. М.* и др. // Металлы. 2001. № 1. С. 110–115.
15. *Анисович А. Г.* Закономерности процессов структурообразования и термодинамический аспект организации структуры металлов при нестационарных энергетических воздействиях: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Мн., 2005.
16. *Оситов К. А.* Некоторые активируемые процессы в твердых металлах и сплавах. М., 1962.
17. Успехи физики металлов: Сб. статей. М., 1961.
18. *Уманский Я. С.* и др. Физические основы металловедения. М., 1935.
19. *Анисович А. Г.* и др. // Инженерно-физический журн. 2002. № 1. С. 15–20.

*A. G. ANISOVICH*

## **PARTICULARITIES OF RELAXATION PROCESS IN METALS SUBJECTED TO PULSES**

### **Summary**

The paper is concerned with relaxation processes occurring in deformed metals under their heating, presents the classification scheme of the processes based on considering the types of defects participating in relaxation and describes elementary mechanisms of their propagation. The analysis is given of the stress relaxation processes observed during plastic deformation. The process of structure formation that occurs during pulse treatment (including heat, laser and magnetic modes) is considered from the viewpoint of realized relaxation processes. Under external pulse loading the process of metal relaxation is shown to be a transition into a new state that allows repetition (or continuation) of loading. In this respect the formation of a fragmented structure under exposure to pulses is a relaxation phenomenon alternative to failure.