



УДК 539.3

© 2010

Е. Э. Засимчук, Р. Г. Гонтарева, А. И. Баскова, Т. В. Турчак,
Л. В. Тарасенко

Влияние диссипативных структур на напряженное состояние деформированного сплава Д16

(Представлено членом-корреспондентом НАН Украины Ю. Н. Ковалем)

Модифікованим методом рентгенівського гармонійного аналізу показано істотне зменшення мікронапруг після різкого стрибка прикладеної напруги під час розтягу сплаву Д16, що відповідає збільшенню пластичності сплаву. В цьому стані в матеріалі виявляються мікросмуги, по яких відбувається пластична течія речовини, що переносить як ціле дисперсні частки фаз, які є в сплаві. Утворення мікросмугової структури під навантаженням супроводжується релаксацією внутрішніх напруг за рахунок самоорганізації дефектів кристала у вигляді каналів з рідиноподібною структурою всередині. Після розвантаження в структурі відбувається фазове перетворення (кристалізація) з утворенням мікро зерен розміром менше 1 мкм. Це приводить до зменшення ОКР, які визначаються рентгенографічно.

В наших предыдущих работах [1–6 и др.] показано, что резкое увеличение напряжения при одноосном растяжении металлических образцов приводит к существенному возрастанию пластичности. Это связано с тем, что пластическая деформация происходит вдали от термодинамического равновесия, когда все зависимости свойств материалов от параметров внешнего поля не линейны. В таких условиях, как следует из теории нелинейной физики [7–9 и др.], при небольших изменениях внешних параметров возможно протекание процессов самоорганизации, приводящих к возникновению новых структурных состояний материала.

Проведенные нами структурные исследования показали, что самоорганизация структуры при резком скачке приложенного напряжения сводится к образованию самоподобных полосовых структур, по которым осуществляется гидродинамическое течение вещества. Следовательно, наблюдавшееся в наших работах [1–6 и др.] увеличение пластичности при резком скачке приложенного напряжения находится в полном соответствии с синергетикой, в то время как классическая механика прогнозирует противоположный эффект.

Следует отметить, что увеличение пластичности в динамических условиях механического нагружения мы фиксировали в сугубо отличающихся по структуре и свойствам металлических сплавах (углеродистые стали разных марок, нержавеющая сталь, многофазные

сплавы алюминия). Во всех изученных нами случаях после резких изменений механического воздействия мы наблюдали самоорганизацию в виде диссипативной полосовой структуры разных масштабных уровней [1]. На ТЭМ-снимках сплава Д16 видно не только наличие микрополос, но и контраст в виде штрихов, ориентированных приблизительно в направлении полос [1]. По-видимому, штрихи представляют собой треки перемещения частиц второй фазы во время пластического течения материала образца. Сложный фазовый состав сплава Д16 подтвержден его непосредственным изучением в нашей работе [10]. Этот факт показывает, что микрополосы являются участками локализации “гидродинамического” пластического течения материала [11].

Учитывая, что любое механическое воздействие может привести к изменению фазового состава сложнолегированного сплава, а влияние фазовых превращений на механические свойства и внутренние напряжения сплава неоднозначно [10], мы провели исследование напряженного состояния сплава до и после резкого изменения режима механического нагружения.

Методика эксперимента. Методика механических испытаний описана в работах [1–6 и др.]. При этих испытаниях процессы деформирования и разрушения пластичных материалов при резких сменах в режиме нагружения исследуются в составе механической системы, которая представляет собой простейшую статически не определимую конструкцию в виде одновременно нагружаемых трех параллельных элементов. Центральный элемент такой конструкции включает захваты со сферическими опорами, тензодинамометр и образец исследуемого материала; два симметричных боковых элемента включают по две одинаковые штанги, одна из которых используется в качестве тензодинамометра, и хрупкие пробы разного минимального диаметра. При нагружении описанной конструкции, при заданной деформации (силе) на основном образце, образцы — спутники из хрупких проб разрушаются, и происходит импульсная подгрузка образца. Свойства нагружающей системы определяют скорость деформации материала при динамическом перераспределении напряжений, вызванных разрушением образцов — спутников. Указанный вид испытаний реализован на базе испытательной гидравлической машины ZD-100Pч, отличительной особенностью которой является массивная подвижная траверса (масса составляет 1350 кг).

Для исследования напряженного состояния сплава Д16 до и после резкого изменения режима нагружения использовали метод рентгеновского гармонического анализа формы интерференционных линий. Мы проводили анализ линий (200) и (400) и линий (111) и (222) в монохроматизированном $Cu - K_{\alpha}$ излучении. Измеряли средние микро- и макронапряжения и размер областей когерентного рассеяния (ОКР). Следует отметить, что методы рентгеноструктурного анализа в настоящее время широко используются исследователями разных стран благодаря их высокой статистичности (см., например, [12]). Однако, если микронапряжения имеют реальный физический смысл [13], то ОКР, размеры которых позволяет определять гармонический анализ, аналогов в структурном многообразии деформированных металлов не имеют. Особенно это следует отнести к объекту нашего исследования, где, как показал эксперимент, после резкого изменения условий нагружения преобладают элементы полосовой структуры разных масштабных уровней, внутри которых вследствие протекания релаксационных процессов после снятия нагрузки обнаруживаются ячейки и микрозерна в широком диапазоне размеров [14].

В нашей работе к стандартному методу гармонического анализа были сделаны следующие дополнения, с учетом которых была составлена компьютерная программа для расчета. Подробно методика расчета и программирования изложена в нашей работе [15].

Результаты и обсуждение. В табл. 1 приведены усредненные значения микронапряжений и ОКР в деформированных образцах сплава Д16 до резкого скачка напряжения (“статика”) и после скачка (“динамика”). Из табл. 1 следует, что микронапряжения после скачка внешней нагрузки существенно ниже, чем после статического растяжения (до скачка). Этот результат находится в соответствии с наблюдавшимся экспериментально повышением пластичности при динамическом нагружении.

Для быстрой оценки напряженного состояния материала часто используется измерение полуширины рентгеновских интерференционных линий. Усредненные значения этого параметра (B , град) для использованных нами рефлексов приведены в табл. 2.

Из табл. 2 следует, что полуширина изученных интерференционных линий после резкого скачка приложенного напряжения (“динамика”) существенно ниже, чем до скачка.

Таким образом, рентгенографическое изучение формы и ширины рентгеновских интерференционных линий показывает уменьшение искажений кристаллической решетки сплава Д16 после резкого скачка приложенного напряжения в процессе растяжения образца (см. рис. 1).

Табл. 1 иллюстрирует уменьшение размеров ОКР при переходе от статики к динамическому нагружению при расчетах по паре линий (111)–(222). К сожалению, нам не удалось получить численные значения размеров ОКР в образцах после статического растяжения при их расчете по паре линий (200)–(400) (программа выдает значение ∞). Возможно, это связано с недостаточно совершенной структурой эталона.

Таким образом, рентгенографическое изучение напряженного состояния кристаллической решетки деформированного сплава Д16 показало уменьшение микронапряжений и одновременно с ним уменьшение размеров ОКР в образцах после резкого скачка приложенного напряжения. Следует учесть, что исследованию подвергались образцы не в процессе нагружения, а после завершения деформации. Очевидно, что после снятия нагрузки в материале могли происходить релаксационные изменения структуры, сопровождающиеся изменением напряженного состояния кристаллической решетки. Полученные нами результаты показывают, что релаксация микронапряжений в большей степени выражена после резкого скачка (в сторону увеличения) приложенного напряжения, чем до скачка. Для понимания этого эффекта следует обратиться к анализу деформационного структурообразования при растяжении образцов сплава Д16.

Таблица 1. Усредненные значения микронапряжений $\sigma \cdot 10^4$ и ОКР (микрон) в деформированных образцах сплава Д16 до резкого скачка напряжения (“статика”) и после скачка (“динамика”)

Скачки напряжения	$\sigma \cdot 10^4$ по (111) и (222)	$\sigma \cdot 10^4$ по (200) и (400)	ОКР по (111) и (222)	ОКР по (200) и (400)
Статика	11,5	8,3	2,55	—
Динамика	5,7	3,8	0,385	—

Таблица 2. Усредненные значения параметра B (в градусах) в деформированных образцах сплава Д16 до резкого скачка напряжения (“статика”) и после скачка (“динамика”)

Индекс линии	(111)	(200)	(222)	(400)
Статика	0,449	0,473	0,992	0,820
Динамика	0,423	0,405	0,857	0,723

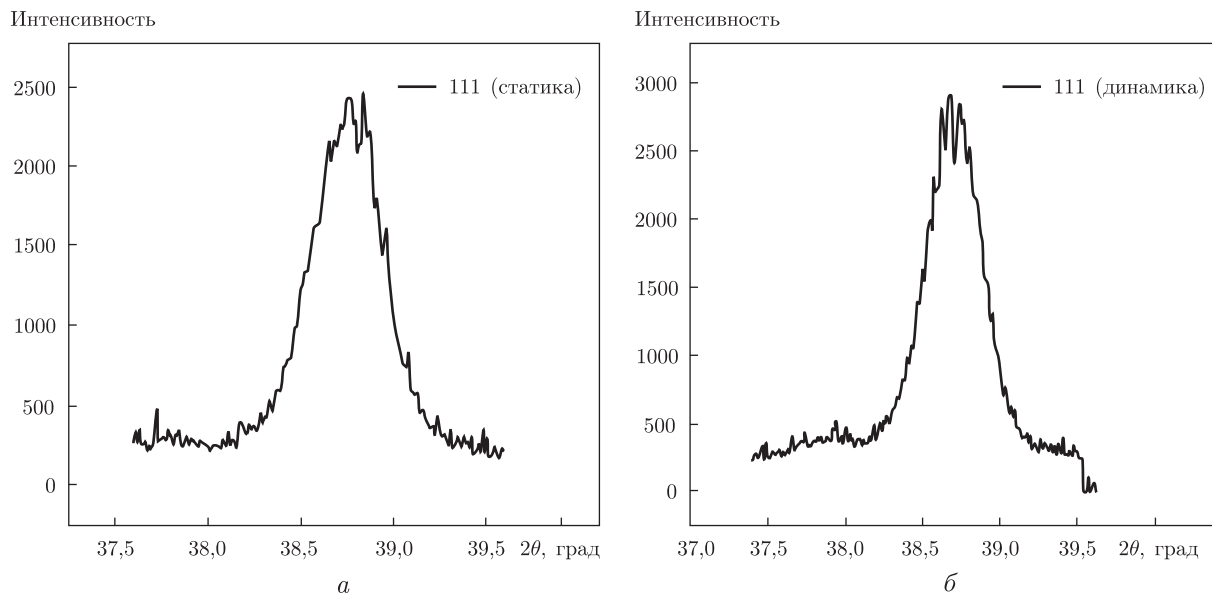


Рис. 1. Характер линий (111) деформированных образцов сплава Д16 после статического растяжения (“статика”) (а) и после резкого скачка приложенного напряжения (“динамика”) (б)

Как было показано в нашей работе [10], механическое нагружение образцов сплава Д16 вызывает не только обычное деформационное упрочнение, но также упрочнение за счет частичного перехода в твердый раствор дисперсных фаз CuAl_2Mg и CuAl_2 . Возможно, после снятия нагрузки релаксация внутренних напряжений осуществляется, в основном, за счет естественного старения сплава.

Как уже указывалось выше (см. рис. 1), после скачка напряжения в деформированных образцах сплава Д16 обнаруживаются микрополосы, по которым осуществляется локализованное пластическое течение вещества, переносящее как целое дисперсные частицы фаз, содержащихся в сплаве. По-видимому, образование микрополосовой структуры под нагрузкой сопровождается релаксацией внутренних напряжений за счет самоорганизации дефектов кристалла, накопленных в процессе предшествующего статического растяжения, в отдельных микрообъемах с последующим преобразованием этих микрообъемов в зародыши каналов гидродинамического пластического течения вещества. После снятия нагрузки жидкоподобная структура каналов претерпевает фазовое превращение (кристаллизацию) с образованием микрочерен, размеры которых могут быть значительно меньше 1 мкм [14]. Возможно, это и приводит к уменьшению ОКР, определяемых рентгенографически (см. табл. 1).

Таким образом, в работе приведены результаты изучения напряженного состояния деформированного в разных условиях сплава Д16, при этом использован модифицированный авторами метод рентгеновского гармонического анализа. Показано существенное уменьшение микронапряжений и измельчение областей когерентного рассеяния после резкого скачка напряжения при статическом растяжении материала. Обнаруженный эффект коррелирует с наблюдаемым экспериментально увеличением пластичности сплава после скачка напряжения.

По мнению авторов, увеличение пластичности и уменьшение микронапряжений в динамических условиях механического нагружения связано с тем, что после скачка напря-

жения в деформированных образцах сплава Д16 обнаруживаются микрополосы, по которым осуществляется локализованное пластическое течение вещества, переносящее как целое дисперсные частицы фаз, содержащихся в сплаве. По-видимому, образование микрополосовой структуры под нагрузкой сопровождается релаксацией внутренних напряжений за счет самоорганизации дефектов кристалла, накопленных в процессе предшествующего статического растяжения, в отдельных микрообъемах с последующим преобразованием этих микрообъемов в зародыши каналов гидродинамического пластического течения вещества. После снятия нагрузки жидкоподобная структура каналов претерпевает фазовое превращение (кристаллизацию) с образованием микрозерен, размеры которых могут быть значительно меньше 1 мкм. Это приводит к уменьшению ОКР, определяемых рентгенографически.

1. Засимчук Е., Маркашова Л., Турчак Т. и др. Особенности трансформации структуры пластичных материалов в процессе резких смен в режиме нагружения // Физ. мезомеханика. – 2009. – 12, № 2. – С. 77–83.
2. Чаусов Н. Г., Пилипенко А. П., Параца В. М. Эффекты проявления кратковременного упрочнения пластичных материалов в процессе резких изменений в режиме нагружения: Материалы 46 конф. “Актуальные проблемы прочности”. – Витебск, 2007. – С. 207–212.
3. Чаусов Н. Г., Засимчук Е. Э., Маркашова Л. И. и др. Особенности деформирования пластичных материалов при динамических неравновесных процессах // Техн. диагностика и неразрушающий контроль. – 2008. – № 4. – С. 54–62.
4. Chausov M. G., Pylypenko A. P. Laws of Deformation Processes and Fracture of Plastic Steel from the Point of View of Dynamic Overloading // *Mechanika*. – 2005. – № 4 (54). – P. 24–29.
5. Чаусов Н. Г., Войтюк Д. Г., Пилипенко А. П., Кузьменко А. М. Установка для испытания материалов с построением полных диаграмм деформирования // Пробл. прочности. – 2004. – № 5. – С. 117–123.
6. Чаусов М. Г., Пилипенко А. П. Спосіб оцінки впливу динамічних перевантажень на питому роботу руйнування пластичного матеріалу. Пат. 81037 А G01№ 3/08 Україна. – Опубл. 11.06.2007. – Бюл. № 8.
7. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных процессах. – Москва: Мир, 1979. – 512 с.
8. Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. – Москва: Мир, 1973. – 280 с.
9. Хакен Г. Синергетика. – Москва: Мир. 1980. – 406 с.
10. Засимчук О. Е., Мазанко В. Ф., Гондарева Р. Г., Тарасенко Л. В. Вплив імпульсної деформації на перерозподіл компонентів і механічні властивості на поверхні і в об’ємі зварних швів пластин алюмінієвого сплаву 2024Т3–51 // Пробл. прочности. – 2007. – № 4. – С. 128–136.
11. Засимчук Е. Э., Гордиенко Ю. Г., Засимчук В. И. К вопросу о возможности пластического формоизменения кристалла путем гидродинамического течения по каналам с жидкоподобной структурой // *Металлофизика. Новейшие технологии*. – 2002. – 24, № 9. – С. 1161–1176.
12. Lucs I., Lamparter P. et al. An evolution of methods of diffraction – line broadening analysis applied to ball-milled molybdenum // *J. Appl. Cryst.* – 2004. – No 37. – P. 300–311.
13. Иверонова В. И., Ревкевич Г. П. Теория рассеяния рентгеновских лучей. – Москва: Изд-во Моск. гос. ун-та, 1972. – 288 с.
14. Zasimchuk E., Gordienko Yu., Markashova L., Turchak T. Relaxation structure formation in deformation of nickel // *J. Mater. Eng. and Performance*. – 2009. – 18, is. 7. – P. 947–951.
15. Засимчук Е. Э., Засимчук В. И., Гондарева Р. Г. и др. Гармонический анализ субструктурных параметров деформированных металлов // Доп. НАН України. – 2007. – № 10. – С. 91–95.

*Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова
НАН Украины, Киев*

Поступило в редакцию 07.06.2010

E. E. Zasimchuk, R. G. Gontareva, A. I. Bascova, T. V. Turchak,
L. V. Tarasenko

Influence of dissipative structures on a strained state of deformed D16 alloy

A severe decrease of microstresses after the drastic change of an applied stress during the elongation of alloy D16 is revealed by a modified line profile analysis method. It corresponds to an increase of the alloy plasticity. The microbands are revealed in the material in this state. The plastic flow of matter is carried out in these microbands. The microbands' structure formation is accompanied by the relaxation of internal stresses due to the self-organization of crystal defects in the form of liquid-like channels. The channels' structure suffers the phase transformation (crystallization) with formation of micrograins less than 1 micron in size after the unloading. This leads to a decrease of dimensions of regions of coherent scattering which are determined by the X-ray method.