

## **К ПРОБЛЕМЕ РАСТВОРЕНИЯ ФАЗ В МЕТАЛЛАХ ПРИ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ**

*Ломаев И.Л., Васильев Л.С.*

Физико-технический институт УрО РАН

426000 Ижевск, ул. Кирова, 132

e-mail: LomayevIL@yandex.ru

**Введение.** Наноструктурные материалы (НМ) привлекают большое внимание исследователей в связи с тем, что их физико-химические свойства существенно отличаются от свойств крупнозернистых объемных материалов. Это находит широкое практическое применение и стимулирует развитие фундаментальных научных направлений современной физики.

Наиболее перспективными для получения нанокристаллического состояния в металлах являются методы, использующие различные варианты интенсивной пластической деформации (ИПД). Однако помимо уменьшения размера зерна ИПД может приводить к ряду структурно-фазовых превращений, нехарактерных для крупнозернистых материалов. Так, при различных вариантах ИПД наблюдалось растворение фаз, стабильных в обычных условиях (карбидов, оксидов, боридов и др.). Несмотря на то, что это явление известно сравнительно давно, дискуссия о механизмах и причинах деформационно-индуцированного растворения дисперсных фаз продолжается до сих пор.

Интерес к изучению подобных явлений обусловлен, в первую очередь, широким промышленным применением легированных сталей для изготовления таких тяжело нагруженных элементов конструкций как армирующие корды, пружины, стальные тросы, канаты подвесных мостов, железнодорожные рельсы и колеса и т.п. Растворение фаз при деформации может приводить к разупрочнению и значительной деградации физических свойств. Вместе с тем, существуют и многочисленные примеры, когда деформационное растворение фаз значительно улучшает многие физико-химические свойства сталей и сплавов.

Целью данной работы является исследование условий равновесия и процессов растворения фазы химических соединений в нанокристаллических металлах при интенсивной пластической деформации.

**Расширенная диаграмма метастабильных и равновесных фазовых состояний для сильнодеформированных и/или наноструктурированных металлов.** Наноструктурированные материалы представляют собой сложную термодинамическую систему, состоящую из тесно взаимодействующих подсистем объемных фаз, линейных, планарных и точечных дефектов, имеющих сравнимые объемные доли. Указанные подсистемы взаимодействуют друг с другом, поэтому любое нарушение условий равновесия (метастабильного равновесия) в какой-либо одной подсистеме может вывести из равновесного состояния все остальные подсистемы. Такая система должна иметь более сложную диаграмму равновесных и метастабильных фазовых состояний, чем у объемных материалов. На рис. 1 представлены фрагменты

(плоские сечения) такой диаграммы для наноструктурированных деформированных материалов [1]. Важным обстоятельством является то, что положение линий фазовых равновесий на фрагменте рис. 1а существенно зависит от взаимодействия фаз с подсистемами дефектов.

Предложенная многомерная диаграмма дает удобный метод исследования деформационных механизмов растворения фаз.

Рис.1. Фрагменты (плоские сечения) условной многомерной диаграммы полного термодинамического равновесия деформированного наноструктурированного двойного сплава: а) диаграмма равновесных фазовых состояний подсистемы объемных фаз с  $\alpha$ - $\gamma$ -превращением и химическим соединением F; б) температурные зависимости средних равновесных концентраций примеси в сегрегациях на дислокациях (кривые  $T_2-5$  и  $T_2-1$ ) в  $\alpha$  и  $\gamma$  фазах соответственно, на межкристаллитных и межфазных границах (кривые  $T_2-2$ , 3-6 и  $T_F-4$ ); в) деформационные зависимости полного относительного числа атомов примеси, сегрегированной на планарных (кривая 1) и линейных (кривая 2) дефектах,  $\epsilon$  — степень деформации наноструктуры. г) кривые температурных зависимостей суммарной равновесной концентрации вакансий для различных степеней деформации сплава ( $\epsilon_1 > \epsilon_2$ ), включая объемные и поверхностные составляющие полного числа вакансий в наноструктуре.

### **В настоящей работе показано:**

1. Дислокационные механизмы растворения фаз в условиях холодной интенсивной пластической деформации (ИПД) наноструктурных сплавов малоэффективны. Для их реализации необходимы хорошо развитые процессы объемной диффузии и наличие достаточно больших дислокационных скоплений в объеме нанозерна. Дислокации не могут обеспечить растворение химических соединений больше того, чем это соответствует способности их атмосфер Коттрелла к поглощению примеси, освобождаемой при растворении. При растворении цементита в углеродистых сталях они поглощают не более 0.5% (ат.) атомов углерода. В условиях холодной ИПД достаточно вероятно также возможность отрыва дислокаций от своих примесных атмосфер и выключение дислокаций из процесса пластического деформирования из-за процессов деформационного двойникования.

2. В сплавах внедрения возможно растворение фаз, обусловленное значительными вакансионными пересыщениями деформационного происхождения. Растворение становится возможным, когда энергия связи атомов примеси, освобождающейся при растворении, больше энергии связи этих атомов в фазе. Оно должно сопровождаться зарождением новых равновесных дефектов, состоящих из связанных комплексов типа «вакансия-атом примеси». Этот механизм малоэффективен, поскольку вакансии не могут связать более 0.1% (ат.) примеси.

3. К наиболее эффективным механизмам деформационного растворения фаз в сплавах внедрения следует отнести механизм поглощения примеси, образующимися в условиях ИПД, новыми межфазными и

межкристаллическими границами и механизм поглощения примеси высокотемпературной фазой при ее деформационном зарождении.

4. Для каждой наноструктуры металла существует предельное минимальное значение нанокристаллита, которое можно получить методами ИПД. Существование предела измельчения наноструктуры ограничивает возможности протекания процессов деформационного растворения фаз. В углеродистых сталях деформационное растворение цементита протекает до тех пор, пока предельная наноструктура не поглотит из объема смеси около  $(10\div 12)\%$  (ат.) углерода. Дальнейшее растворение цементита прекращается.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ-Урал 07-03-96011 и Проекта Президиума УрО РАН для молодых ученых.*