

ДОСТИЖЕНИЕ ТЕРМОУСТОЙЧИВОГО УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛОВ Понижением температуры пластического деформирования

Хаймович П. А.

Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт”
Украина, Харьков, pavel.41@bk.ru

Еще несколько десятилетий тому назад в начале обзора почти каждой диссертации, посвященной проблемам прочности и пластичности металлов и сплавов, приводилась «кривая Одингга» (рис. 1) [1], характеризующая зависимость прочности материала от концентрации в нем дефектов. Уже тогда появилось понимание, что определяющим в уровне прочностных характеристик металла является не просто сама по себе высокая плотность дефектов, но протяженность границ раздела, высокая дисперсность мелкокристаллического состояния. Так, в работе, посвященной исследованиям структуры и свойств меди, прокатанной в диапазоне температур 300 – 4,2 К [2], обращено внимание именно на связь механических свойств с уровнем дисперсности получаемой при этом структуры (рис. 2). Было показано, что определяющим для образования очень мелкоячеистой структуры являлось понижение температуры пластической деформации вплоть до 4,2 К. Дальнейшие исследования в этом направлении подтвердили важность фактора понижения температуры для получения максимально возможной фрагментации структуры и, как следствие, получения такого уровня прочностных характеристик металла, которые при деформировании при более высоких температурах недостижимы. Но, помимо больших затруднений, которые обнаруживались при попытках осуществить при низких (криогенных) температурах деформирование низкопластичных металлов, еще один фактор оказался настолько существенным, что эксперименты по низкотемпературному деформированию металлов оказались практически свернуты.

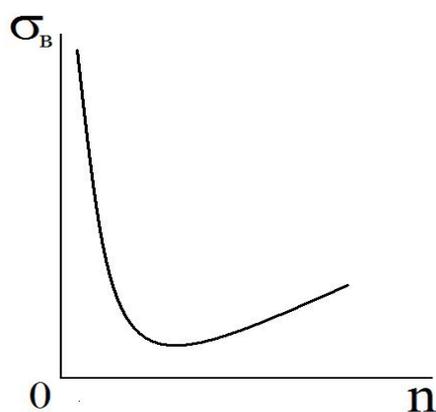


Рис. 1. Зависимость прочности от концентрации дефектов.

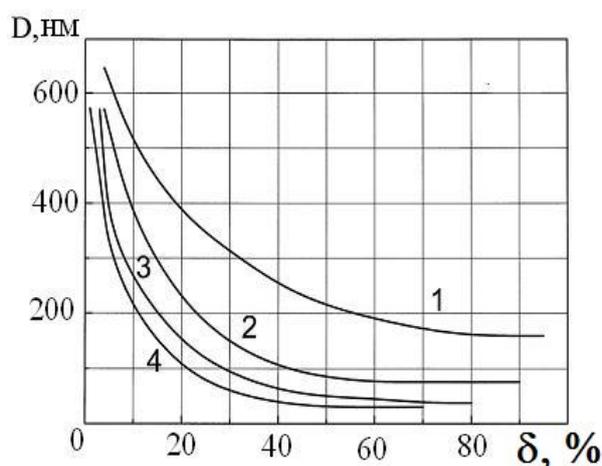


Рис. 2. Зависимость среднего размера ячейки D от степени деформации меди прокаткой при 300(1), 77 (2), 20,4 (3) и 4,2 К (4) [2].

Дело в том, что чем ниже температура деформирования, тем, как правило, имеет место более высокий уровень упрочнения, но, помимо снижения пластичности, иногда до охрупчивания, падает и термоустойчивость упрочненного состояния. Это может найти объяснение из самых общих соображений, так как чем ниже температура деформирования, тем больше энергии затрачивается на осуществление этого деформирования, тем выше уровень внутренних искажений решетки [3,4], то есть тем более неравновесной оказывается формирующаяся при этом структура. А значит, тем меньше тре-

буется энергии на процессы релаксации, возврата, рекристаллизации, тем при более низких температурах они происходят.

Осуществляемое в последнее время барокриодеформирование (БКД) [5], как показано в ряде работ [6-8], способно, сохраняя преимущества осуществления деформирования при криогенных температурах, обеспечивающего повышенные уровни упрочнения, уменьшить проблему охрупчивания. Материал при растяжении деформируется упруго вплоть до начала образования шейки, в области которой и протекает вся пластическая деформация, зачастую весьма значительная (коэффициент сужения достигает 90% и более).

Как оказалось, при БКД для определенных материалов можно получить и высокую термоустойчивость упрочненного состояния, но прежде, чем рассмотреть, как это реализуется, необходимо остановиться на том, что имеется в виду под термином термоустойчивость. С одной стороны, это способность материала, благодаря тем или иным манипуляциям, сохранять определенный уровень свойств при более высокой температуре, чем до этих манипуляций. С другой, возможен вариант, когда, благодаря специальным обработкам, при одной и той же высокой температуре обработанный материал обладает более высокими свойствами, чем необработанный. Наилучшим вариантом, конечно, является тот, когда материала с более высокими за счет обработки свойствами оказывается еще устойчивым при тех температурах, при которых необработанный материал уже разупрочняется.

Учитывая, что снижение термоустойчивости после упрочняющих обработок при криогенных температурах рассматривается в настоящее время как само собой разумеющееся, необходимо уточнить и то, какие факторы могут помешать такому снижению. Фактор наличия сил всестороннего сжатия при пластической деформации, снижающий либо устраняющий возможность зарождения микротрещин [9], является фундаментальным для барокриодеформирования, играет свою роль для всех рассматриваемых объектов, так что останавливаться на нем не будем. А вот материалы, меняющие в процессе БКД свой фазовый состав, представляют интерес. Характерный пример – аустенитная в исходном состоянии сталь, претерпевающая в процессе деформирования мартенситное превращение. Такое превращение имеет место и в случае деформирования при комнатной температуре, и в случае прокатки, волочения при криогенных температурах, однако с разной степенью полноты, и лишь низкотемпературное деформирование в условиях всестороннего сжатия (БКД) способно не только обеспечить практически полный γ - α переход, но и создать столь высокодисперсную однородную структуру мартенсита, получение которой в других условиях нереализуемо [10]. Эта, фактически монофазная, структура и оказалась термически более устойчива, чем менее однородная как в фазовом состоянии, так и в размерах структурных фрагментов сталь, прошедшая иные обработки.

Описанная выше, полученная методами БКД, высокодисперсная монофазная мартенситная структура обусловила возможность формирования в этой стали также монофазной, но аустенитной структуры при необычно высокой дисперсности [11]. А в результате сталь в аустенитном состоянии приобрела очень высокие характеристики как при комнатной (предел текучести выше 1000 МПа), так и при высоких температурах.

В приведенных примерах повышенную термоустойчивость структуры можно объяснить высокой однородностью ультрамелкодисперсной структуры, имеющей высокую протяженность границ, что прямо связано с особенностями пластического деформирования в условиях всестороннего сжатия при криогенных температурах. Но препятствием для разупрочнения при нагреве, разрушения обусловленных низкотемпературным деформированием границ могут служить и особенности упрочняемого материала в его исходном, до проведения БКД, состоянии. Примером может служить сплав РЕ-16 (Нимоник), предназначенный для изделий, работающих при высоких (до 750°C) температурах. Особенностью его структуры является наличие большого количества

равномерно распределенных включений твердой фазы, представляющих собой близкие к сферическим образования размерами порядка 10 нм, причем в среднем расстояния между ними составляют 10–20 нм [12]. БКД позволило значительно повысить прочностные характеристики, особенно предел текучести, этого сплава, измеренные при комнатной температуре, а особенности структуры этого сплава, о которых выше шла речь, позволили сохранить более чем полутора кратный рост предела текучести в области предельных температур эксплуатации этого сплава.

Кроме описанных выше, имеют место случаи, когда определяющим в повышении термоустойчивости свойств оказываются не особенности структуры металла, то ли присущие ему изначально (как в примере со сплавом РЕ-16), то ли приобретенные при БКД, а индивидуальные черты метода деформирования, присущие только БКД. При 77 К были подвергнуты БКД заготовки крупнозернистого никеля с «бамбуковой» структурой, где все сечение прутковой заготовки занимает, как правило, одно зерно. Прошедший матрицу экструдат представлял собой заключенный в индиевую оболочку объект, где каждый из кристаллитов-зерен был в той или иной мере развернут относительно первоначальной оси. При деформации относительно мелкозернистого металла зерна его разворачиваются в текстурном направлении, испытывая противодействие со стороны окружающих его кристаллитов этого же материала. В описываемом же случае, зерно, будучи единственным в сечении заготовки, получило возможность развернуться в выгодном направлении, не испытывая значительного внешнего сопротивления, находясь в рубашке из индия, который начинает течь при очень низких напряжениях. То есть схема реализации БКД позволила кристаллиту в мягкой индиевой оболочке разворачиваться в выгодном направлении без значительных локальных деформаций, приводящих к неравномерной повышенной плотности дефектов. В результате упрочненное состояние металла оказалось устойчивым при нагреве почти до 500°C.

Приведенные выше примеры позволяют сделать вывод, что понижение температуры упрочняющего деформирования совсем не обязательно влечет за собой снижение термоустойчивости упрочненного состояния. Более того, оказывается возможным превысить уровень термоустойчивости, обеспечиваемый другими методами. Но важным условием для достижения успеха является проведение низкотемпературного деформирования в условиях всестороннего сжатия.

1. Одинг И.А. О роли дислокаций в процессе ползучести. – Изв. АН СССР. ОТН, 1948, № 12, с. 1795–1802.
2. Гиндин И.А., Лазарева М.Б., Лебедев В.П., Стародубов Я.Д., Мацевитый В.М., Хоткевич В.И. // Физика металлов и металловедение, 1967. –Т.24, вып. 2. –С. 347-353.
3. Горелик С.С. Рекристаллизация металлов и сплавов, М., «Металлургия», 1967.
4. Гиндин И.А., Козинец В.В., Стародубов Я.Д., Хоткевич В.И. ФММ, 1967, **24**, 149.
5. П.А.Хаймович. На пути к барокриодеформированию. В кн. Перспективные материалы, т.3, ТГУ, МИСиС, 2009, с. 363-406.
6. И.А.Гиндин, Я.Д.Стародубов, М.П.Старолат, П.А.Хаймович. ФММ, т.48, №5, 1979, с.1004-1009.
7. П.А.Хаймович. Известия ВУЗов, 2007, №11, с.13-16.
8. А.В.Мац, П.А.Хаймович. ФТВД, 2009, т.19, №1, с.69-77.
9. Мартынов Е.Д., Береснев Б.И., Булычев Д.К., Родионов К.П., Рябинин Ю.Н. Влияние высокого давления на пластичность и разрушение металлов.- в кн.: Механизм пластической деформации металлов. К.: Наукова думка, 1965, –С. 4-28.
10. В.В.Брык, И.М.Неклюдов, В.И.Соколенко, Я.Д.Стародубов, П.А.Хаймович. Металлофизика и новейшие технологии. 2005, Т.27, №4, с. 551-562.
11. П.А.Хаймович. Патент Украины, №79726, 2007.
12. Ксенофонтов В.А., Саданов Е.В., Михайловский И.М., Великодная О.А. Вопросы атомной науки и техники. 2006. №4. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (89), с.35-37.