

## ДЕФОРМАЦИОННОЕ УПРОЧНЕНИЕ СТАЛИ 65Г

Г.А. Околович, к.т.н., О.С. Ларещева,  
А.Г. Околович

Деформационное упрочнение пружинных сталей обеспечивает высокий комплекс механических свойств не только после предварительного патентирования, но и после нормализации. Это объясняется тем, что при охлаждении на воздухе проволоки сравнительно небольшого сечения из стали с повышенным содержанием углерода и особенно низко- или среднелегированной образуется структура тонкопластинчатого сорбита, мало отличающегося от получаемого при патентировании.

Применение нормализации вместо патентирования экономически эффективнее. Метод деформационного упрочнения нормализованной стали 65Г, оказался весьма эффективным для изготовления многих ответственных типов пружин.

Деформация нормализованных сталей резко повышает их прочностные свойства – пределы прочности и пропорциональности. При отпуске заметно повышаются основные характеристики пружинных сталей – предел и модуль упругости, пластичность, а также усталостная прочность.

Важно, что пружины из нормализованной стали 65Г после деформации и отпуска имеют существенно большую усталостную прочность, чем после обычной термической обработки.

1. Так, во избежание растрескивания металла при пластической деформации, снижения нагрузки на инструмент (щадящий режим), и практическая целесообразность рекомендует степень обжатия при волочении 40 – 60 % на твердость  $HRC_{\Sigma}$  32 – 40 ед., после которого следует проводить промежуточный рекристаллизационный отжиг.

2. Термофиксация при 550 °С требует натяжения ленты на оправку не только для фиксации проволоки по диаметру, но и для усиления эффекта динамического старения во время отпуска, когда предел текучести ( $\sigma_{0,2}$ ) и предел упругости ( $\sigma_{0,02}$ ) возрастают на 100 – 200 МПа по сравнению с обычным отпуском.

Главным достоинством динамического старения (или отпуска под нагрузкой) является то, что структурное и напряженное состояние оказывается таким, каким оно будет в детали в условиях ее эксплуатации. Это определяет большую стабильность свойств и повышение надежности. Без динамического старения в изделиях под действием нагрузки в условиях эксплуатации будут наблюдаться изменения структурного состояния и свойств, которые заранее очень трудно прогнозировать.

Следует отметить, что термофиксация в кипящем слое повышает эффект динамического старения тонкомерных изделий.

### 3. Термостабилизация (550°С, 1 час).

Во время отпуска при термофиксации и термостабилизации происходит процесс полигонизации – упорядочения дислокационной субструктуры с малоугловыми границами.

Известно, что деформационное упрочнение при волочении объясняется увеличением количества дислокаций от  $10^4$  до  $10^{10-12}$  при степени деформации  $\varepsilon$  40 – 60 % и ростом твердости от  $HRC_{\Sigma}$  10 – 12 до  $HRC_{\Sigma}$  32 – 40.

Упрочнение при пластической деформации является результатом роста плотности дислокаций, генерируемых от межфазных поверхностей феррит–цементит и образующих ячеистую субструктуру феррита, стабилизируемого пластинками цементита. При этом разориентация на границах этих ячеек после больших обжатий достигает 1 – 3°, так что эти границы можно рассматривать как большеугловые, а ячейки – как субзерна. Именно это очень сильное измельчение зерен при высокой плотности дислокаций и является главной причиной упрочнения.

Помимо этих изменений структуры, под действием пластической деформации происходит частичный распад цементита, поскольку энергия связи атомов углерода с дислокациями больше (0,76 – 0,78 эв/ат), чем их связи с атомами железа в решетке цементита (0,40 – 0,42 эв/ат). Этот эффект, по видимому, сказывается на росте упрочнения и в то же время уменьшает пластичность.

ПОЛЗУНОВСКИЙ АЛЬМАНАХ №4 2003

Снижение энергии связи атомов углерода с дислокациями или увеличение энергии связи в решетке карбидов, естественно, улучшает пластичность стали.

Теория дислокаций позволила объяснить механизм полигонизации. Остаточный изгиб профиля связан с избытком краевых дислокаций одного знака. Соответствующие им неполные вертикальные атомные плоскости, выходящие на верхнюю грань кристалла, действуют как клинья, изгибающие кристалл. При нагреве до 0,25 – 0,3 Тпл дислокации одного знака перераспределяются и выстраиваются одна над другой в стенки. При этом под областью разрежения от одной дислокации и поля упругих напряжений в значительной мере взаимно компенсируются. Стенка из дислокаций не имеет дальнего действующего поля напряжений. Следовательно, образование дислокационных стенок – энергетически выгодный процесс, который должен идти самопроизвольно, однако для его развития необходима термическая активация.

Дислокационные стенки в изогнутом кри-

сталле образуются в результате сочетания процессов скольжения и переползания

Стенка из дислокаций одного знака является малоугловой границей, разделяющей соседние субзерна с небольшой разориентировкой решеток.

Нагрев здесь необходим, чтобы активизировать переползание большого числа дислокаций

Таким образом, во время нагрева до 550°С и выдержки развивается процесс полигонизации – упорядочение дислокационной субструктуры, определяющий структурную стабильность и долговечность в эксплуатации. Кроме того, достигается повышение предела текучести, упругости и выносливости, а также пластичности. Упрочнение происходит в результате закрепления подвижных дислокаций атомами примесей в дислокационных стенках, возникающих при полигонизации деформированного металла.

Однако, при увеличении времени или повышении температуры происходит укрупнение субзерен и снижение прочности.