

УДК 620.191.33:620.192.7

## ЗАЛЕЧИВАНИЕ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ МИКРОТРЕЩИН И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СТАЛИ И СПЛАВОВ ТИТАНА

Х.Бобоназаров, А.У.Очилов, С.Н.Каримов, О.В.Амосова\*, В.И.Бетехтин\*,  
А.Г.Кадомцев\*, Д.Е.Юсупов\*.

*Гос. Университет, 735719, Ходжент, Филатова 4, Таджикистан*  
\* *ФТИ им.А.Ф.Иоффе РАН, 194021 С.-Петербург, Политехническая, 26.*  
*[Vladimir.Betekhtin@pop.ioffe.rssi.ru](mailto:Vladimir.Betekhtin@pop.ioffe.rssi.ru)*

Исследовалось влияние промежуточного отжига на залечивание приповерхностных микротрещин, образующихся в процессе циклического нагружения образцов стали и сплавов титана. Установлено, что залечивание ведет к увеличению долговечности. Анализируется природа упрочняющего влияния отжига.

Микроскопические трещины и поры являются типичными дефектами, возникающими в процессе нагружения материалов, при этом их скорость накопления и концентрация в приповерхностных слоях может быть более чем на порядок выше, чем в объеме [1,2]. Кинетика развития микротрещин определяет ресурс долговечности материалов, а периодическое залечивание накапливающихся в процессе деформации микротрещин ведет к повышению этого ресурса [1-5].

Одним из эффективных способов залечивания приповерхностных трещин является отжиг при  $T \leq 0,5T_{пл.}$ ; закономерности этого отжига были изучены для чистых поликристаллических металлов, испытываемых при растяжении в режиме ползучести в области умеренных температур [2]. В данной работе аналогичные исследования были проведены на высокопрочной стали 30ХГСН2А и сплавах титана ОТ-4 и ВТ-22, которые испытывали в условиях циклического нагружения.

Испытания на долговечность проводили при несимметричном цикле  $(0-\sigma_{max})$  с частотой 10 ц/мин в условиях одноосного растяжения. Образцы при определенном приложенном напряжении циклически нагружались и определялось число циклов до разрушения или долговечность  $\tau_1$  (время до разрушения при  $\sigma_{max}$ ). Следующая серия образцов деформировалась до определенной доли выработанной долговечности (обычно 0,3; 0,5; 0,7 от  $\tau_1$ ). После этого образцы разгружали, подвергали залечивающемуся промежуточному отжигу при определенной температуре в течение часа, снова нагружали в том же режиме, что и до отжига, и определяли долговечность  $\tau_2$ . Коэффициент  $\tau_2/\tau_1$  характеризовал, таким образом, степень упрочнения после восстановительной обработки.

Рассмотрим сначала данные, полученные при исследовании образцов стали 30ХГСН2А. Испытывалось две серии образцов: образцы, закаленные в масло и отпущенные при 300°C в течение 3 часов и образцы после отжига при 600 °С в течение часа в форвакууме.

После закалки и низкого отпуска образцы стали имели наибольшую прочность ( $\sigma_{max} = 1600$  МПа) и небольшую пластичность (предел текучести был близок к пределу прочности). Отожженные образцы имели существенно меньшую прочность ( $\sigma_{max} =$

820 МПа), их пластическая деформация была более 10%. На рис.1. (кривые 1-3) показана зависимость коэффициента упрочнения  $\beta$  от температуры промежуточного залечивающего отжига. Видно, что все кривые имеют одинаковую колоколообразную форму. Максимум кривых приходится на температуру промежуточного отжига  $\approx 300^\circ\text{C}$ . Обработка показала, что форма кривых хорошо описывается гауссовой функцией (пунктир).

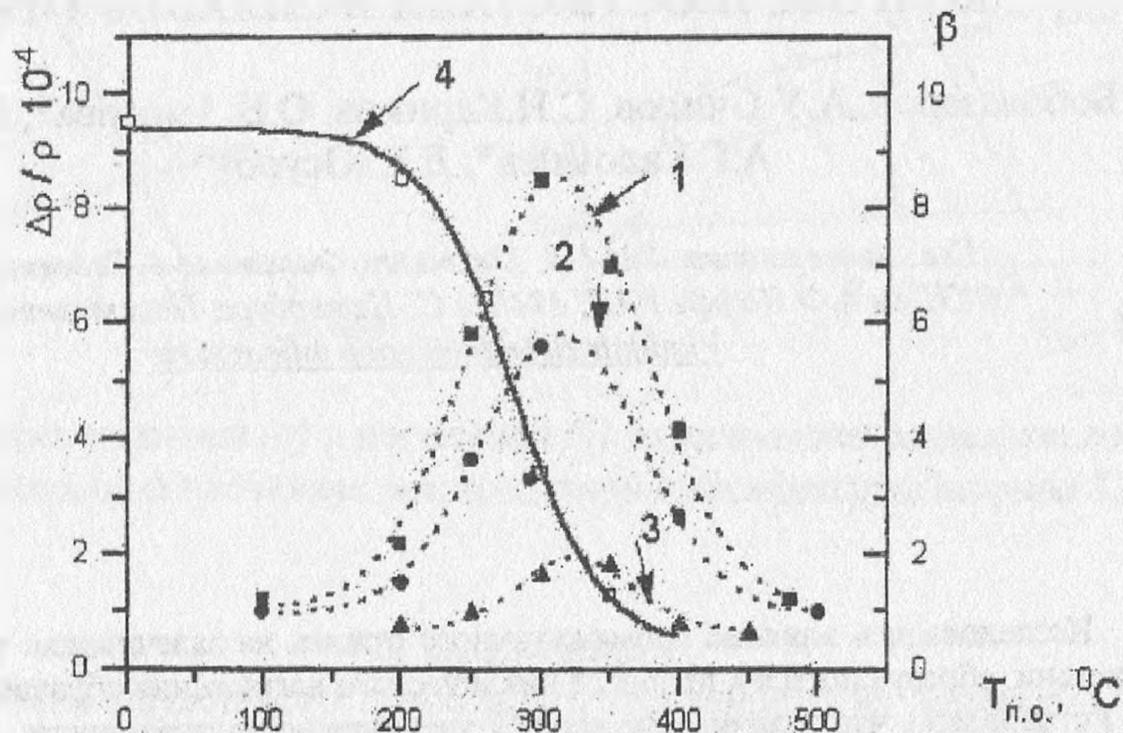


Рис.1. Зависимость коэффициента упрочнения (1-3) и разуплотнения (4) для образцов отожженной (1,2) и закаленной (3) стали, выработавших 30 (1,3) и 70 % (2) своего ресурса долговечности, от температуры залечивающего отжига.

Из полученных данных видно, что, во-первых, коэффициент упрочнения образцов отожженной стали существенно больше, чем отпущенной. Во-вторых, коэффициент упрочнения зависит от доли ресурса долговечности, который выработали образцы до залечивающего промежуточного отжига: по мере увеличения доли выработанного ресурса (в данном случае с 30 до 70%), эффективность восстановительного отжига уменьшается.

Аналогичные исследования были проведены для сплавов титана ОТ-4 и ВТ-22, предварительно отожженных при  $550^\circ\text{C}$ . Промежуточная залечивающая термообработка проводилась в течение часа после выработки 0,5 от  $\tau_1$ . Значения  $\sigma_{\text{max}}$  для сплавов ОТ-4 и ВТ-22 составляли соответственно 760 и 950 МПа, при этом пластичность сплава ОТ-4 была заметно больше, чем ВТ-22. На рис.2 показаны зависимости коэффициента  $\beta$  от температуры восстановительного отжига. Видно, что, как и для стали, эти зависимости имеют колоколообразную форму, которая хорошо аппроксимируется гауссовым распределением, при этом коэффициент упрочнения для сплава ОТ-4 примерно в два раза выше, чем для сплава ВТ-22.

Влияние залечивающих отжигов на накапливающуюся в процессе циклических испытаний повреждаемость изучали с помощью прецизионного измерения плотности методом гидростатического взвешивания и контролировали с помощью оптической и сканирующей микроскопии. Результаты этих исследований показали, что при циклическом нагружении образующиеся микротрещины и обусловленное ими разуплотнение локализуются в тонких приповерхностных слоях образцов. При этом по мере деформации толщина поврежденного слоя увеличивается. К примеру, при выработке  $\approx 30\%$  ресурса она составляет около 10 мкм, а после разрыва доходит до 30 мкм. Помимо этого, в процессе деформации растет число трещин, выходящих на поверхность образца. Микро-

скопические исследования показали, что возникающее в процессе испытания разуплотнение, которое в приповерхностных слоях разорванных образцов достигает  $\approx 10^{-3}$ , связано, в основном, с образованием микротрещин. Размеры этих микротрещин от  $\approx 0,2$  до десятка микрон, соотношение их длины и ширины  $\approx 7:1$ .

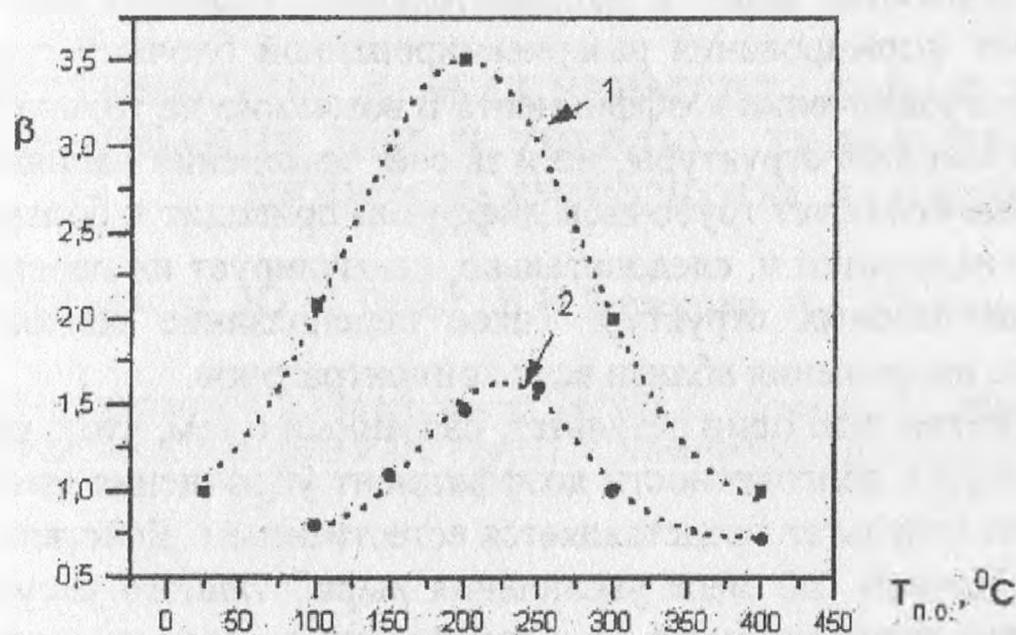


Рис.2. Зависимость коэффициента упрочнения образцов сплава OT-4 (1) и VT-22 (2), выработавших 50 % своего ресурса долговечности от температуры залечивающего отжига.

Закономерности залечивания разуплотнения при промежуточном отжиге были изучены на образцах стали. Видно (рис.1, кривая 4), что восстановление плотности начинается при температуре  $\approx 200^\circ\text{C}$  и интенсивно продолжается до  $350^\circ\text{C}$ .

Проанализируем полученные данные. Прежде всего отметим, что коэффициент упрочнения  $\beta$  становится больше единицы при той температуре отжига, при которой начинается уменьшение разуплотнения. Это позволяет связать наблюдаемое упрочнение с залечиванием приповерхностных микротрещин. Действительно, при температурах отжига до  $\approx 300^\circ\text{C}$  степень упрочнения  $\beta$  в первом приближении пропорциональна степени залечивания (уменьшения  $\Delta\rho/\rho$ ). Характерно, что это залечивание, согласно теоретическим оценкам и полученным для чистых металлов экспериментальным данным, начинается при  $T \approx 0,4T_{\text{пл}}$ ; отжиг приповерхностных микронесплошностей происходит путем испускания вакансий и их последующей миграции на поверхность по ядрам дислокаций (трубочной диффузии) с энергией активации, существенно меньшей энергии самодиффузии [2].

Уменьшение коэффициента  $\beta$  начинается при температуре отжига, при которой процесс залечивания интенсивно продолжается (рис.1). Это позволяет полагать, что уменьшение  $\beta$  связано с определенными разупрочняющими структурными изменениями, которые, в конечном итоге, полностью нивелируют эффект упрочнения за счет залечивания микротрещин. Согласно [2], разупрочняющие изменения обусловлены отжигом разориентированной дислокационной блочной структуры, сформировавшейся в процессе испытания на долговечность. Отжиг такой структуры идет с энергией активации, близкой к энергии самодиффузии, т.е. заметно большей, чем энергия активации залечивания микротрещин.

Эволюция при отжиге дислокационной структуры играет, очевидно, существенную роль не только в уменьшении, но и в увеличении коэффициента  $\beta$ . Действительно, из рис.1,2 видно, что в закаленной стали и в сплаве VT-22, для которых пластичность в

процессе циклического нагружения  $\leq 1\%$ , залечивающий отжиг привел только к восстановлению долговечности ( $\beta \approx 2$ ). Однако для отожженной стали и сплава ОТ-4, у которых пластическая деформация почти на порядок выше, отжиг не только восстанавливает, но и значительно увеличивает долговечность ( $\beta \approx 4-8$ ). Полученные данные хорошо согласуются с результатами работы [6], в которой было показано, что промежуточная термомеханическая обработка ведет к дополнительному (помимо залечивания) росту долговечности за счет формирования разориентированной блочной структуры. Отметим, что существенное увеличение коэффициента  $\beta$  возможно не только за счет изменения дислокационной блочной структуры, но и за счет изменения напряженного состояния. Отжиг микротрещин за счет трубчатой диффузии приводит к большим вакансионным потокам вдоль дислокаций и, следовательно, стимулирует их переползание и формирование более равновесных структур. Такое переползание должно существенно уменьшать локальные напряжения вблизи всех концентраторов.

В заключение отметим еще один результат, связанный с тем, что с увеличением доли выработанного ресурса долговечности коэффициент упрочнения уменьшается (кривые 1 и 2, рис.1). Этот результат представляется естественным. Действительно, как следует из полученных данных, по мере увеличения выработанного ресурса, во-первых, увеличивается толщина поврежденного приповерхностного слоя и, следовательно, увеличивается время залечивания. Во-вторых, повышается концентрация вышедших на поверхность микротрещин, которые залечиваются при  $T \approx 0,9T_{пл}$ .

### Список литературы

1. Черемской П.Г., Слезов В.В., Бетехтин В.И. Поры в твердом теле. М.: Энергоатомиздат, 1990. 373с.
2. Бетехтин В.И., Владимиров В.И., Петров А.И., Кадомцев А.Г. Микротрещины в приповерхностных слоях деформированных кристаллов // Поверхность. Физика, химия, механика. 1984. №7. С.144-151.
3. Davies P.W., Dennison J.P., Evans H.E. The kinetics of the recovery of creep properties during annealing of Nimonic 80 after creep at 750°C // J.Inst. Metals. 1967. №8. P.231-234.
4. Ашихмина Л.А., Березина Т.Г., Трусов Л.П., Штейнберг М.М. Оптимизация режимов восстановительной термообработки паропроводов из перлитных сталей // Теплоэнергетика. 1978. №10. С.21-25.
5. Burt H., Dennison J.P., Elliot J.G., Wilshire B. The effect of hot isostatic pressing on the creep and fracture behaviour of the cast superalloy Mar Moor // Mater. Sci. a. Eng. 1982. V. 53. P.245-250.
6. Юсупов Д.Е. Влияние промежуточных обработок на долговечность при высокотемпературной ползучести металлов. Автореф. канд. диссертации, С.-Петербург, СПГТУ, 1996, 16с.