

УДК 681.142:535

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЛОКАЛИЗАЦИИ ДЕФОРМАЦИИ НА КРУПНОМАСШТАБНЫХ УРОВНЯХ В СТАЛИ СО СТРУКТУРОЙ ОТПУЩЕННОГО МАРТЕНСИТА

© Л.А. Теплякова, Э.В. Козлов, Л.Н. Игнатенко, Н.А. Попова, Н.Ф. Касаткина, В.А. Давыдова

*Россия, Томск, Государственный архитектурно-строительный университет*

Teplyakova L.A., Kozlov E.V., Ignatenko L.N., Popova N.A., Kasatkina N.F., Davydova V.A. Regularities of deformation localisation on large-scale levels in tempering martensite steel. Localised deformation diagrams and distributions of local degree of plastic deformation ( $\epsilon_{\lambda}$ ) for 34ХНЗМФА steel are obtained, and so is the dependence between their quantitative characteristics and  $\langle \epsilon \rangle$  of the sample. The similarity of the localisation of deformation laws on the studied large-scale levels is found.

Настоящая работа посвящена изучению закономерностей макролокализации деформации [1, 2] в стали со структурой отпущенного пакетно-пластинчатого мартенсита. Исследование выполнено для интервала масштабов с границами, задаваемыми линейными размерами образца, с одной стороны, и размерами реального зерна, с другой [3, 4]. Исследовалась сталь 34ХНЗМФА в двух состояниях: литом и прокатанном (образцы вырезались параллельно направлению прокатки). Деформирование осуществлялось растяжением на машине Instron со скоростью  $6 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  при комнатной температуре. Диаграммы локализованной деформации получены измерением локальной степени деформации вдоль реперного ряда, нанесенного параллельно оси растяжения образца с шагом 50 мкм.

Начало пластического течения исследованной стали связано с однородным распределением деформации по рабочей части образца. Об этом свидетельствует металлографический анализ поверхности деформированных образцов, характер диаграмм локализованной деформации (рис. 1) и вид распределения локальных степеней деформации (рис. 2). На диаграммах локализованной деформации, в качестве примера приведенных на рис. 1а–в для стали в литом состоянии (в прокатанном см. в [4]), локальные величины степеней деформации  $\epsilon_{\lambda}$  мало отличаются от среднего значения по образцу  $\langle \epsilon \rangle$  до тех пор, пока  $\langle \epsilon \rangle$  остается меньшим, чем 0,1. На гистограммах  $\epsilon_{\lambda}$ , построенных для этого интервала степеней деформации образца, все значения  $\epsilon_{\lambda}$  укладываются в один столбец (рис. 2а). При металлографическом исследовании установлено, что следы деформации равномерно распределены по всей поверхности рабочей части образца.

С развитием деформации в некотором объеме образца начинается ее локализация, выражающаяся для исследованной стали в образовании, как правило, двух шеек: вначале длинной, а затем короткой [4]. Образование первой начинается в объеме, составляющем примерно половину объема рабочей части образца. Перед разрушением в длинной шейке появляется еще одна – короткая шейка. Обе шейки появляются в соответствии с условием Консидера  $\sigma = \theta$ . Имеется однозначная связь между величиной зоны макролокализа-

ции деформации и пластичностью стали, а именно: чем более пластична сталь, тем больший объем образца вовлекается в процесс локализации деформации на макроуровне. Эти два этапа шейкообразования в рамках идеологии масштабно-структурных уровней локализации деформации естественно назвать *первичной* и *вторичной макролокализацией*.

Развитие макролокализации находит отражение на диаграммах локализованной деформации: появляется хорошо выраженный максимум (рис. 1г). Амплитудное значение степени деформации, соответствующей максимуму, растет с деформацией (рис. 1д, е). Эволюционирует также распределение локальной степени деформации. Если при малых степенях деформации образца ( $\epsilon < 0,1$ ) распределение  $\epsilon_{\lambda}$  описывается дельта-функцией, затем с ростом  $\langle \epsilon \rangle$  оно трансформируется к гауссовскому, то при степенях деформации, близких к разрушению, становится логарифмически нормальным (рис. 2б–г).

Анализ диаграмм локализованной деформации, проведенный для 50 образцов стали в прокатанном состоянии, позволил выявить зависимость величины максимальной ( $\epsilon_{\max}$ ) и минимальной ( $\epsilon_{\min}$ ) локальной степени деформации от  $\langle \epsilon \rangle$ . Полученные результаты представлены на рис. 3. Каждая точка на этом рисунке соответствует одному образцу. Часть образцов были доведены до разрушения и диаграммы локализованной деформации построены для конечных состояний. Как видно из этого рисунка, во всем интервале значений  $\langle \epsilon \rangle$  существует связь:

$$\epsilon_{\max} = k_i \langle \epsilon \rangle,$$

где  $k_i$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от интервала значений  $\langle \epsilon \rangle$ . В начале пластической деформации ( $0 < \epsilon < 0,05$ )  $\epsilon_{\max} \approx \langle \epsilon \rangle$  и коэффициент  $k_1$  близок к 1. В этом интервале деформаций, как уже отмечалось выше, деформация однородна. В интервале значений  $\langle \epsilon \rangle$ : 0,05...0,15, когда происходит первичная макролокализация деформации,  $k_2 \approx 2$ . Наконец, в интервале значений  $\langle \epsilon \rangle$ : 0,15...0,30 величина  $k_3 = 7$  и происходит вторичная макролокализация деформации в образце. Переход от первого участка кривой  $\langle \epsilon_{\max} -$

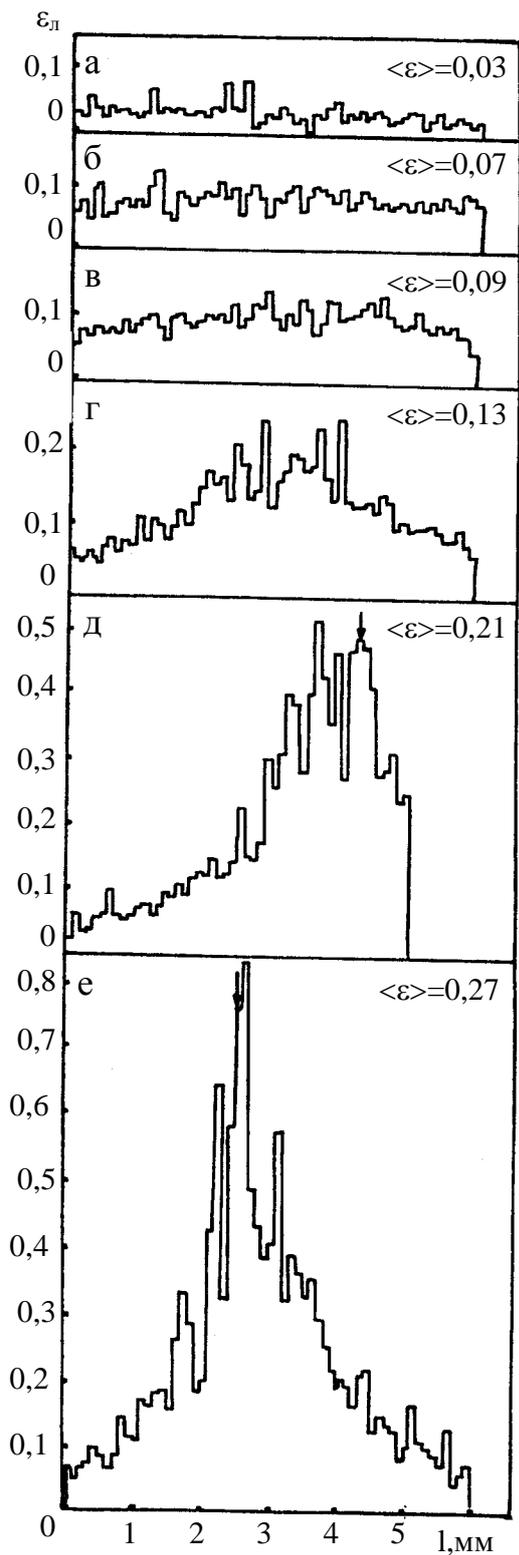


Рис. 1. Эволюция диаграмм локализованной деформации. Сталь в литом состоянии

$\langle \varepsilon \rangle$  ко второму (кривая 2) весьма плавный, в то время как переход от второго участка к третьему (кривая 3) происходит скачком при  $\langle \varepsilon \rangle = 0,15$ . Таким образом, параметр  $k$  является одним из параметров макролокализации деформации для рассматриваемой стали. Если

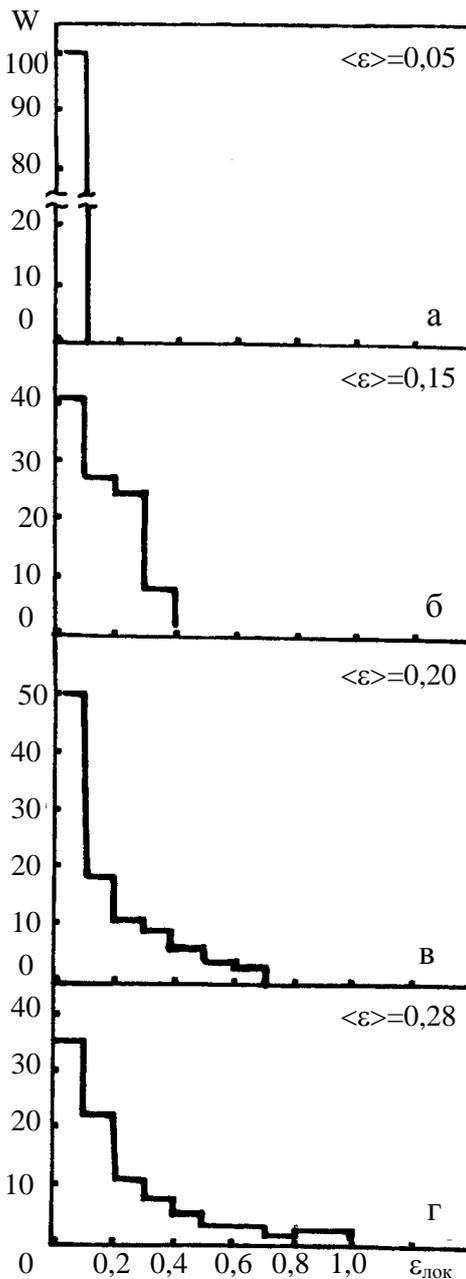


Рис. 2. Распределения локальной степени деформации  $\varepsilon_л$  при различных значениях  $\langle \varepsilon \rangle$  (а, б – неразрушенные, в, г – разрушенные образцы)

описать переходы на кривой « $\varepsilon_{\max} - \langle \varepsilon \rangle$ » в терминах термодинамики фазовых переходов, то первый из них можно отнести к кинетическим фазовым переходам второго рода; переход от кривой 2 к 3 – к переходам первого рода.

Детальный анализ диаграмм локализованной деформации свидетельствует о неоднородности пластической деформации на масштабном уровне *десятки мкм*. На диаграммах (рис. 1) легко выделяются регулярно расположенные участки с периодически меняющейся величиной локальной деформации. В прокатанном состоянии стали средний размер этих участков  $\langle \lambda \rangle$ , измеренный в направлении оси растяжения, составляет  $\sim 150$  мкм. В литом состоянии этой стали он равен 300...360 мкм.

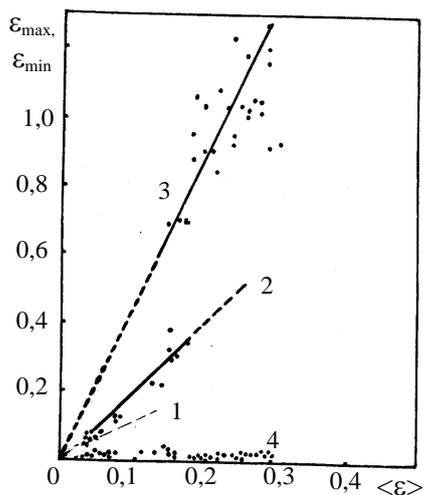


Рис. 3. Зависимость максимальных (кривые 1...3) и минимальных (кривая 4) значений  $\varepsilon_l$  от  $\langle \varepsilon \rangle$  по длине образца для стали в прокатанном состоянии. 1, 2 – для неразрушенных, 3 – разрушенных, 4 – тех и других образцов

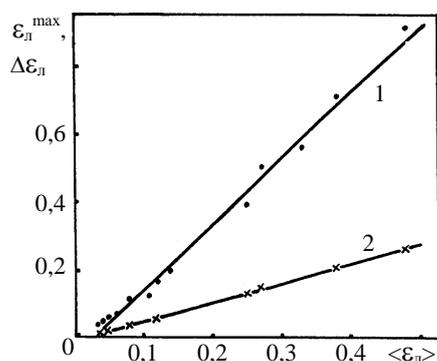


Рис. 4. Величина  $\varepsilon_l^{\max}$  (кривая 1) и  $\Delta\varepsilon_l = \varepsilon_l^{\max} - \varepsilon_l^{\min}$  (кривая 2) в зависимости от среднего значения  $\langle \varepsilon_l \rangle$

С деформацией средний размер этих участков остается постоянным. Сопоставление величины  $\langle \lambda \rangle$  со средним размером наследованного зерна позволяет сделать предположение о том, что группы реальных (полученных после второй закалки) зерен деформируются согласованно, то есть «помнят» свое происхождение от одного материнского зерна. В работе были измерены амплитудные и средние значения локальной степени деформации в участках неоднородной деформации (периоде диаграммы [2]). Полученные результаты представлены на рис. 4. Сравним кривые 1 на рис. 1 и 4. Кривая 1 на рис. 1 относится к образцу в целом, а на рис. 4 – к части его, соизмеримой по своим линейным размерам с группой реальных зерен мартенсита (или с размером наследованного зерна). В некотором отношении они подобны. Обе отражают связь между максимально достигаемыми и средними значениями степени деформации, но на разных масштабных уровнях. При этом для деформированных, но не доведенных до разрушения образцов, совпадают величины углов наклона обсуждаемых кривых ( $k_2 = \text{tg} \alpha \approx 2$ ). Отсюда следует, что деформация групп реальных зерен в отпущенном мартенсите происходит по тому же закону, что и в образце в целом, а именно: в каждой группе зерен мартенсита (или наследованном от аустенита зерне) имеется область с максимальной локальной степенью деформации. Расстояние между максимумами также оказывается соизмеримым с размером наследованного зерна.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пресняков А.А. Локализация пластической деформации. М.: Машиностроение, 1983. 56 с.
2. Пашков П.О., Братухина В.А. О перераспределении пластической деформации в поликристаллических металлах // ФММ. 1958. Т. 6. № 7. С. 128-134.
3. Панин В.Е., Гриняев Ю.В. и др. Структурные уровни деформации твердых тел // Изв. вузов. Физика. 1982. № 6. С. 5-24.
4. Козлов Э.В., Попова Н.А. и др. Стадии пластической деформации, эволюция субструктуры и картина скольжения в сплавах с дисперсным упрочнением // Изв. вузов. Физика. 1991. № 3. С. 112-128.