

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 (ϵ_{λ}) 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 ϵ_{λ} мало отличаются от среднего значения по образцу $\langle \epsilon \rangle$ до тех пор, пока $\langle \epsilon \rangle$ остается меньшим, чем 0,1. На гистограммах ϵ_{λ} , построенных для этого интервала степеней деформации образца, все значения ϵ_{λ} 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 ϵ_{λ} 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 (ϵ_{\max}) и минимальной (ϵ_{\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 $\langle \epsilon_{\max} -$

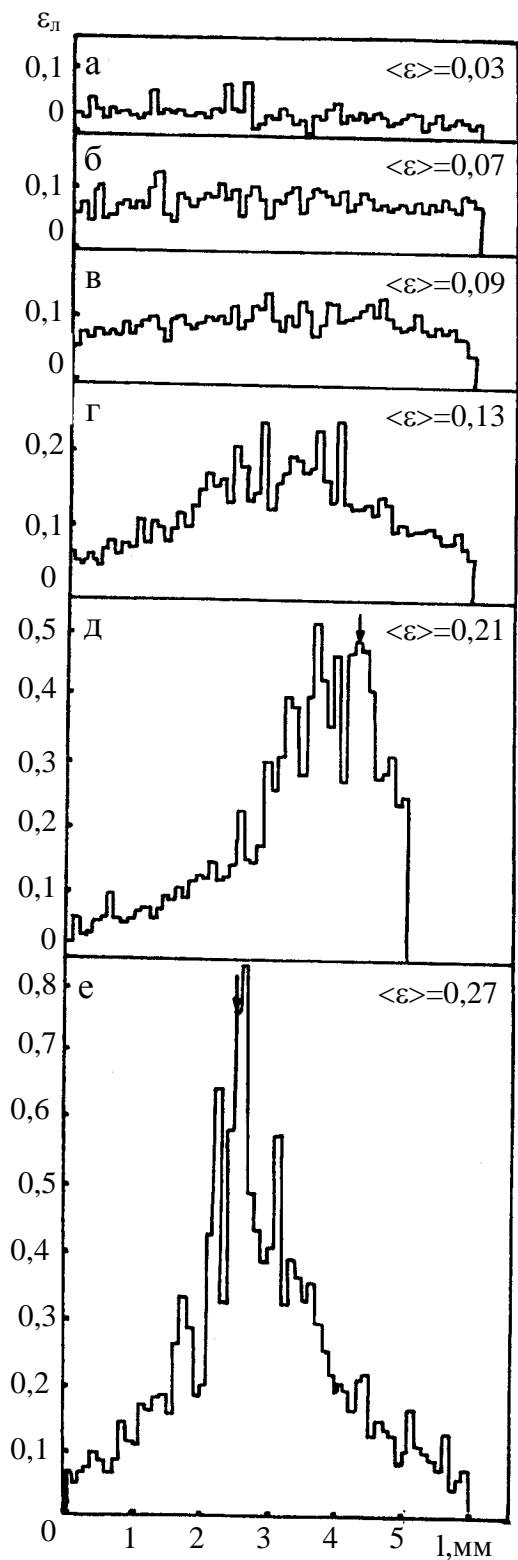


Рис. 1. Эволюция диаграмм локализованной деформации. Сталь в литом состоянии

$\langle \varepsilon \rangle$ » 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

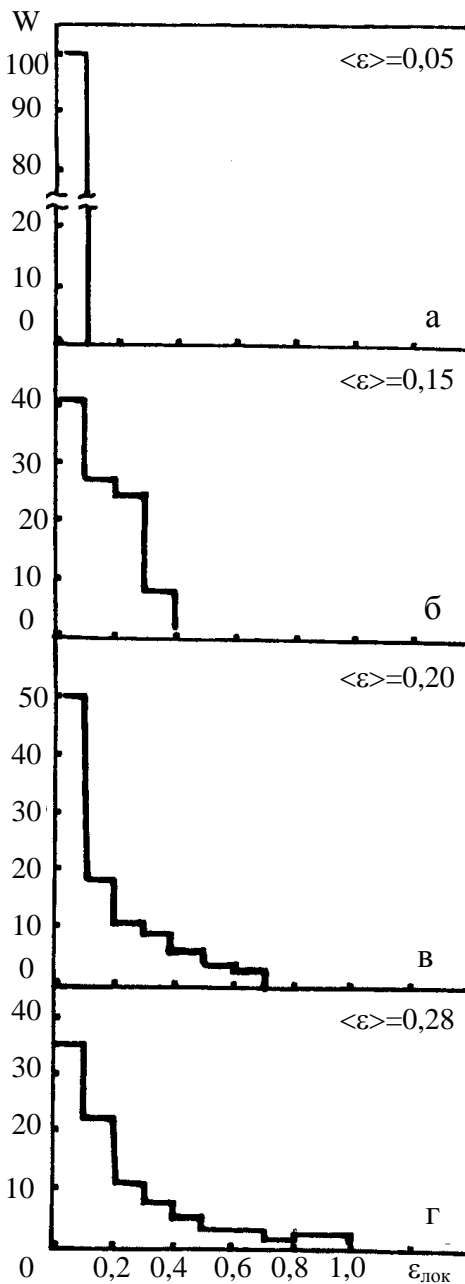


Рис. 2. Распределения локальной степени деформации $\varepsilon_{л}$ при различных значениях $\langle \varepsilon \rangle$ (а, б – неразрушенные, в, г – разрушенные образцы)

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 ~ 150 мкм. В литом состоянии этой стали он равен 300...360 мкм.

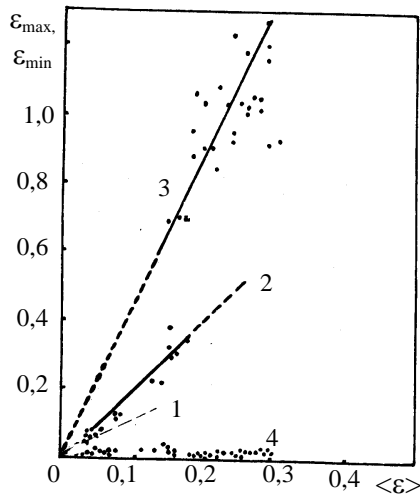


Рис. 3. Зависимость максимальных (кривые 1...3) и минимальных (кривая 4) значений ε_l от $\langle \varepsilon \rangle$ по длине образца для стали в прокатанном состоянии. 1, 2 – для неразрушенных, 3 – разрушенных, 4 – тех и других образцов

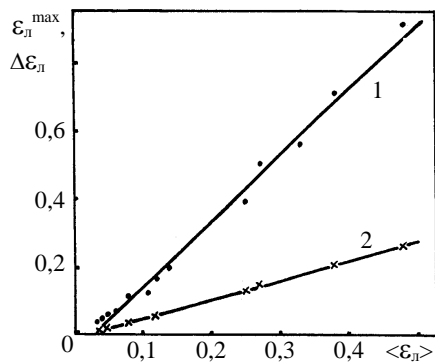


Рис. 4. Величина ε_l^{\max} (кривая 1) и $\Delta\varepsilon_l = \varepsilon_l^{\max} - \varepsilon_l^{\min}$ (кривая 2) в зависимости от среднего значения $\langle \varepsilon_l \rangle$

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.