

УДК 621.539.43.001.24

**ПРОБЛЕМЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ
В МЕХАНИКЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ
НА СТАДИИ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН (часть 2)
СТРУКТУРНАЯ И ДЕФОРМАЦИОННАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И РАССРЕДОТОЧЕННОЕ
ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ**

© Александр Никитович Романов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения
им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия

www.imash.ru

***Аннотация** Исследована деформационная и структурная неоднородность поликристаллических материалов (сталей) в различном структурном состоянии при циклическом упругопластическом нагружении. Показана возможность описания деформационной неоднородности через параметры статистического распределения значений микротвердости.*

Введение

При моделировании процессов статического и циклического деформирования поликристаллических конструкционных материалов на основе подходов и методов механики деформируемого твердого тела необходимо учитывать особенности деформационных процессов и их кинетику с ростом числа циклов нагружения. Эти особенности связаны с неоднородностью развития деформаций в локальных зонах материала, обусловленных структурной неоднородностью (рис.1).

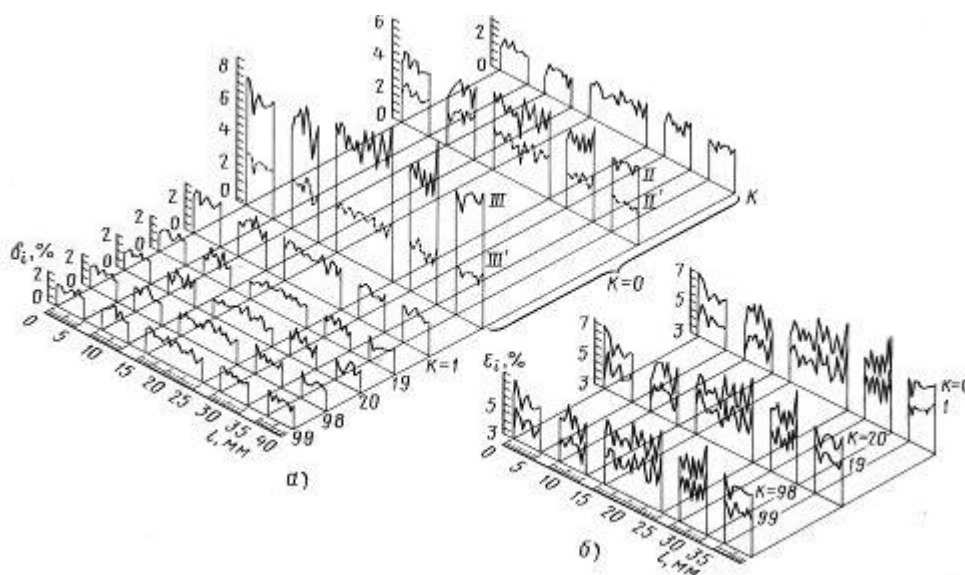


Рис.1. Неоднородность развития циклических (а) и односторонне накопленных (б) пластических деформаций на рабочей базе образца с ростом числа циклов нагружения на локальных участках 0,5 мм и циклах нагружения 1, 10 и 50

(В полуциклах растяжения $K=0, 20$ и 98 и сжатия $K=1, 19$ и 99 .)

В результате окончательному разрушения материала (образованию и развитию магистральной трещины) предшествует рассредоточенное трещинообразование (рис.2).

Задачей исследования является установление возможности оценки деформационной неоднородности конструкционных материалов на основе использования характеристик структурной неоднородности. Структурная неоднородность предопределяет условия накопления повреждений в локальных зонах и возникновение в них предельных состояний - образование микротрещин, развитие которых приводит к образованию магистральной трещины. Характер развития деформаций в локальных участках зависит от структурного состояния материала (однофазный или многофазный) и циклического поведения материала (упрочнение, разупрочнение, стабилизация с ростом числа циклов нагружения) [1,2].

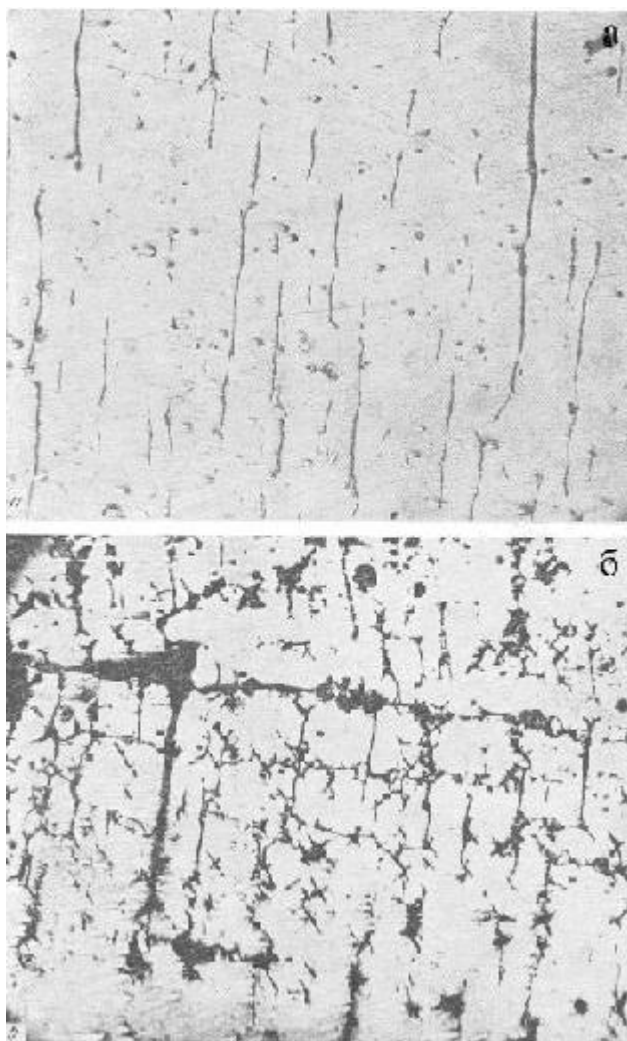


Рис.2. Характер образования микротрещин на поверхности образцов при циклическом растяжении-сжатии (а) и кручении (б).

Задачей исследования является установление возможности оценки деформационной неоднородности конструкционных материалов на основе использования характеристик структурной

Установление закономерностей развития деформаций и накопления повреждений в локальных зонах позволит осуществлять уточненные расчеты долговечности элементов конструкций, назначать обоснованно ресурс изделий и решать вопрос возможности (или невозможности) продления ресурса оборудования, отработавшего назначенный ресурс, а также осуществлять рациональный выбор конструкционного материала при проектировании изделий.

Как известно, стадии образования трещины предшествует стадия рассредоточенного трещинообразования, связанная с неоднородностью развития деформаций в отдельных объемах упругопластически деформируемого металла.

В связи с этим описание предельных состояний в объемах с высокими переменными пластическими деформациями требует проведения исследований по оценке деформационной неоднородности, обусловленной структурной неоднородностью [3-7].

Повышение надежности и безопасности современных машин и оборудования требует разработки уточненных методов расчета прочности и назначения обоснованных запасов прочности на стадии проектирования и методов обоснования возможности продления ресурса оборудования, отработавшего свой ресурс.

Создание таких методов требует проведения экспериментальных исследований при нагружениях в условиях, приближенных к эксплуатационным.

Задачами настоящего исследования является экспериментальное исследование неоднородности развития деформаций в локальных зонах поликристаллических конструкционных материалов при циклическом упругопластическом деформировании с ростом числа циклов нагружения и установление связи деформационной неоднородности со структурной неоднородностью.

1. Структурная неоднородность металлических материалов

Практическое использование местных деформаций в расчетах на прочность представляет определенную трудность, поскольку оно связано с большим числом измерений при экспериментальном определении местных деформаций (на малых базах). В связи с этим желательно иметь более простой и доступный метод определения коэффициентов деформационной неоднородности.

Структурная неоднородность материала, обуславливающая деформационную неоднородность, может быть оценена измерением микротвердости материала в исходном состоянии. При этом диагональ отпечатка является своеобразной остаточной деформацией, размер которой для данного материала зависит от величины нагрузки на индентор.

Была исследована неоднородность структуры и локальных деформаций в однофазном (ст. X18H10T) и двухфазных материалах (феррито-перлитной стали 45 и перлитной стали ТС).

На основе данных статистической обработки проведена оценка коэффициентов неоднородности структуры по вероятностным кривым распределения микротвердости. При этом коэффициенты неоднородности структуры по рассеянию значений микротвердости H_{μ} определялись в виде

$$K_{H_{\mu}} = \bar{H}_{\mu} / H_{\mu i}, \quad (1)$$

где $H_{\mu i}$ – минимальное значение микротвердости; \bar{H}_{μ} – среднее значение микротвердости (соответствующее математическому ожиданию H_{μ}).

Проведенная статистическая обработка значений микротвердости, показала, что измеренные значения микротвердости однофазной стали X18H10T подчиняются нормальному закону распределения.

В соответствии с рассеянием значений микротвердости наблюдается и разброс показателей по коэффициентам неоднородности значений микротвердости (рис. 3).

Для двухфазной перлитной стали при малой нагрузке на индентор (85 г) наблюдается наибольший разброс экспериментальных данных. При этом распределение коэффициентов структурной неоднородности подчиняется нормальному закону распределения и степень однородности выше при нагрузке на индентор 200 г вследствие осреднения свойств структуры при больших деформируемых объемах материала, участвующих при вдавливании индентора. Совпадение значений коэффициентов структурной неоднородности при нагрузках на индентор 85 и 200 г происходит при их накопленной вероятности около 50%.

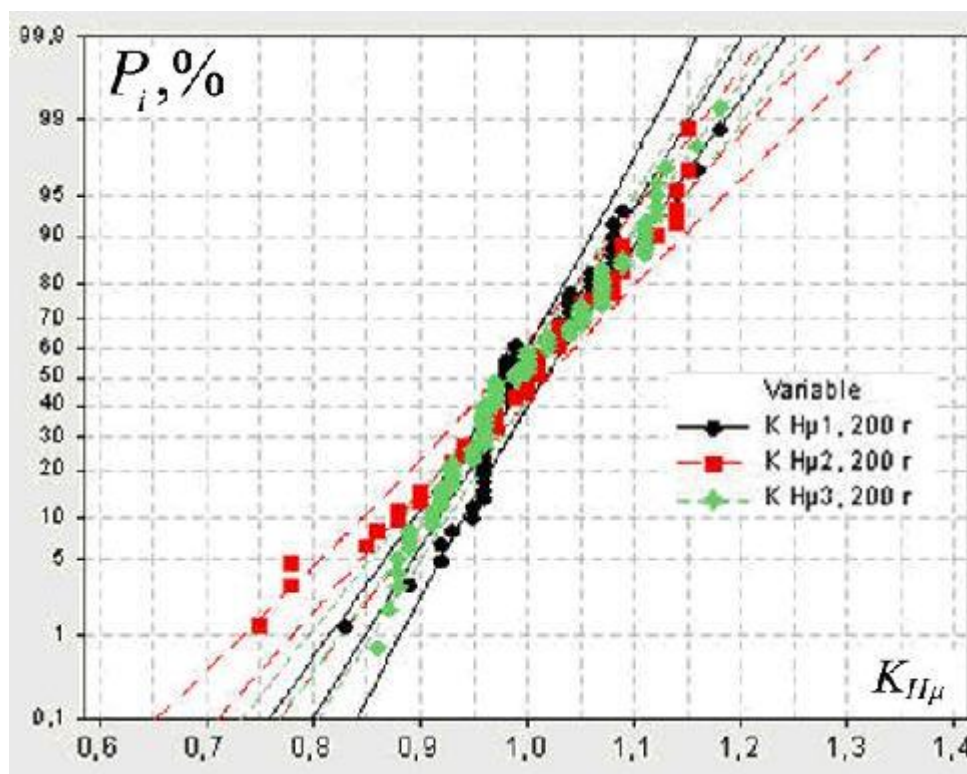


Рис.3. Распределение коэффициентов неоднородности микротвердости сталей ТС (1), стали 45 (2) и X18H10T (3) в исходном состоянии.

В двухфазном материале, когда структурные составляющие имеют сильно различающиеся показатели прочности (твердости), необходимо исследование деформационного поведения каждой из составляющих и, как результат, их совместного взаимодействия.

Рассеяние характеристик микротвердости стали 45 при нагрузке на индентор 85 г наблюдается в широком диапазоне значений. Малые нагрузки лучше фиксируют отдельные составляющие структуры, ферритную и перлитную зоны, а также и непосредственно карбиды. Диапазон изменения микротвердости отдельных структурных составляющих отличается в 1,5 раза.

При увеличении нагрузки на индентор происходит осреднение характеристик микротвердости, поскольку нагрузкой охватываются большие площади, куда попадают участки разных структурных составляющих и рассеяние результатов значительно ниже. При этом можно считать, что распределение характеристик микротвердости подчиняется нормальному закону.

Сопоставление структурной неоднородности рассмотренных сталей показывает, что наибольшая неоднородность имеет место у стали 45, имеющей лишь частично перлитную структуру, «слабым звеном» является ферритная составляющая в виде свободного α -железа.

Для перлитной стали распределения коэффициентов неоднородности в исходном состоянии и после второго цикла нагружения представлена на рис.4.

Однофазная аустенитная сталь X18H10T из исследованных сталей имеет наиболее однородную структуру. Однако при анализе условий накопления повреждений необходимо учитывать структурную неоднородность и этой стали.

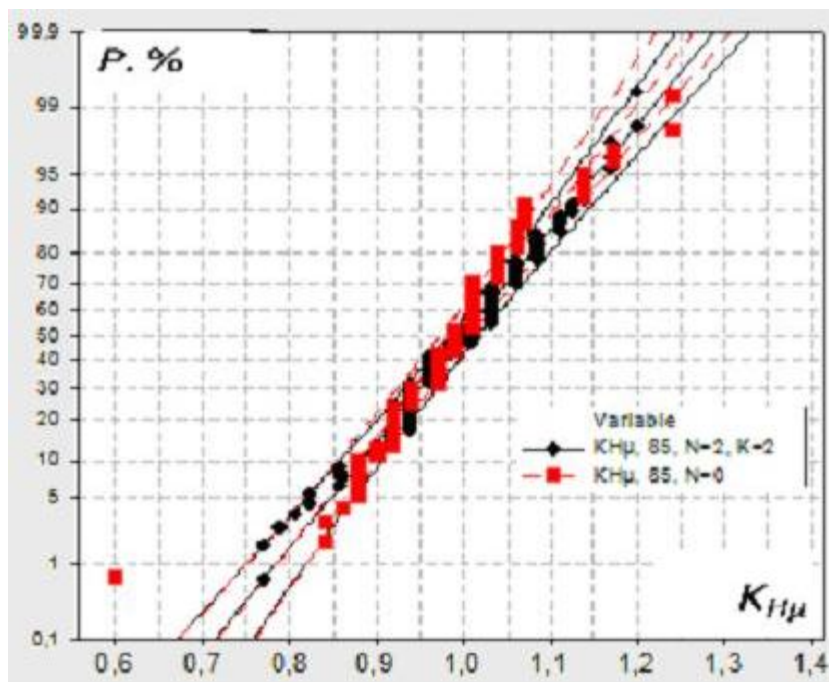


Рис.4. Статистическое распределение коэффициентов неоднородности микротвердости при нагрузке 85 г стали ТС в исходном состоянии и после второго цикла нагружения

2. Деформационная неоднородность конструкционных материалов при циклическом упругопластическом деформировании

Была исследована неоднородность деформаций на базах 30 (диагональ отпечатка), 100, 200 и 500 мкм. Неоднородности циклической пластической деформации $K_{\mu\epsilon_p}$ и односторонне накопленной пластической деформации $K_{\mu\epsilon}$, определяемые в виде

$$K_{\mu\epsilon_p} = \epsilon_{pk} / \epsilon_{pm} \quad \text{и} \quad K_{\mu\epsilon} = \epsilon_k / \epsilon_m, \quad (2)$$

где ϵ_k – местная пластическая деформация в цикле; ϵ_{pm} – средняя величина ширины петли гистерезиса в цикле, измеренная на всей рабочей базе; ϵ_k – местная односторонне накопленная деформация в рассматриваемом цикле нагружения; ϵ_m – средняя односторонне накопленная к данному циклу деформация на большой базе измерения.

Неоднородность развития деформаций, как обратимых, так и необратимых (односторонне накапливающихся) зависит от природы материала и от его структурного состояния, определяемого заключительной технологической обработкой.

В многофазных сталях или сплавах неоднородность микродеформаций будет локализоваться в наименее прочной фазе, и накопление повреждений будет происходить преимущественно в этих зонах, и для них должны оцениваться коэффициенты неоднородности деформаций.

2.1. Статистическая оценка деформационной неоднородности конструкционных металлических материалов

Статистическая обработка местных деформаций, локальных значений микротвердости и локальных повреждений проводилась на соответствие нормальному закону распределения. На рис.5 представлено статистическое распределение локальных деформаций в теплоустойчивой стали ТС в полциклах растяжения и сжатия после нагружения в первом и втором циклах.

Как видно из рис.5, при первом (исходном) упругопластическом деформировании в полупериоде растяжения ($K=0$) в отдельных зонах размером 200 мкм при средней деформации на базе в 40 мм наблюдаются деформации в диапазоне от 0 до 5,0%. Повторное нагружение во втором цикле в полупериоде растяжения ($K=2$) с большей деформацией увеличивает разброс экспериментальных данных, и деформации в отдельных участках изменяются от значений, близких к нулю, до значений более 8%. В полупериодах сжатия, как в первом так и во втором цикле, деформация более однородна, хотя имеются отдельные точки с деформациями, значительно отличающиеся от средних значений. В однофазном материале неоднородность локальных деформаций при первом нагружении была менее выраженной и составляла от 1,2 до 3,2%. При последующем нагружении в третьем и четвертом циклах характер неоднородности сохраняется.

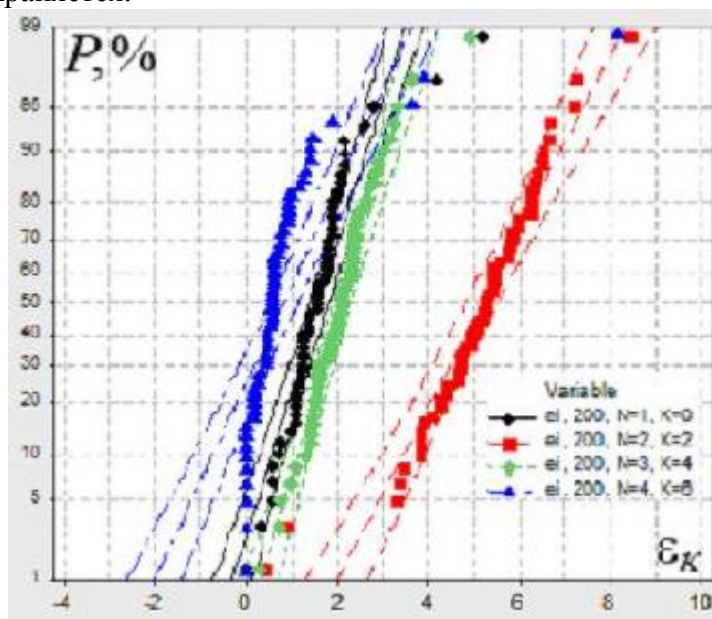


Рис.5. Статистическое распределение локальных деформаций на базе 200 мкм стали ТС после полупериодов растяжения первого (черные точки), второго (красные точки), третьего (зеленые точки) и четвертого (синие точки) циклов.

При уменьшении базы измерения до 100 мкм, как следует из рис. 6, диапазон изменения локальных деформаций увеличивается при повторном нагружении ($K=2$) и составляет от нуля до 12,5%.

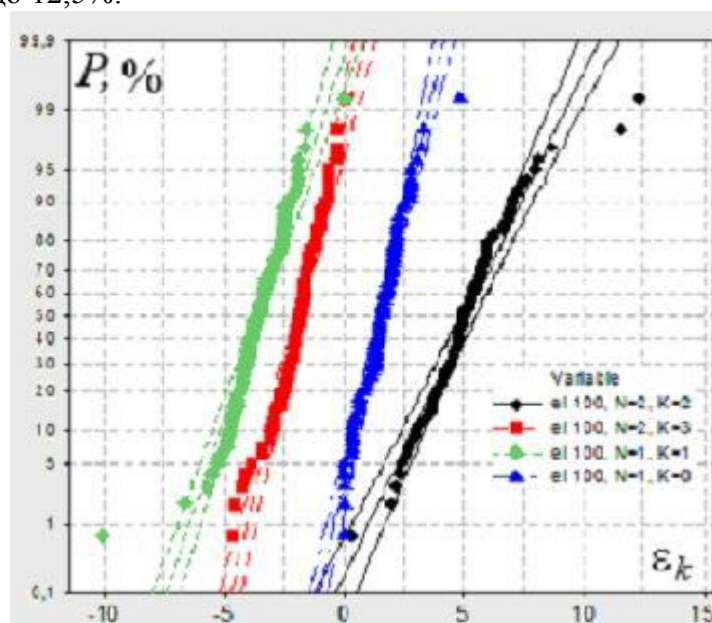


Рис.6. Деформации на базе 100 мкм стали ТС в первом и втором циклах

Дальнейшее уменьшение базы до 30 мкм (рис.7 – 17) существенно изменяет картину неоднородности деформаций. При этом как в полуциклах растяжения, так и в циклах сжатия имеется значительное количество участков, не претерпевших деформации при повторном нагружении.

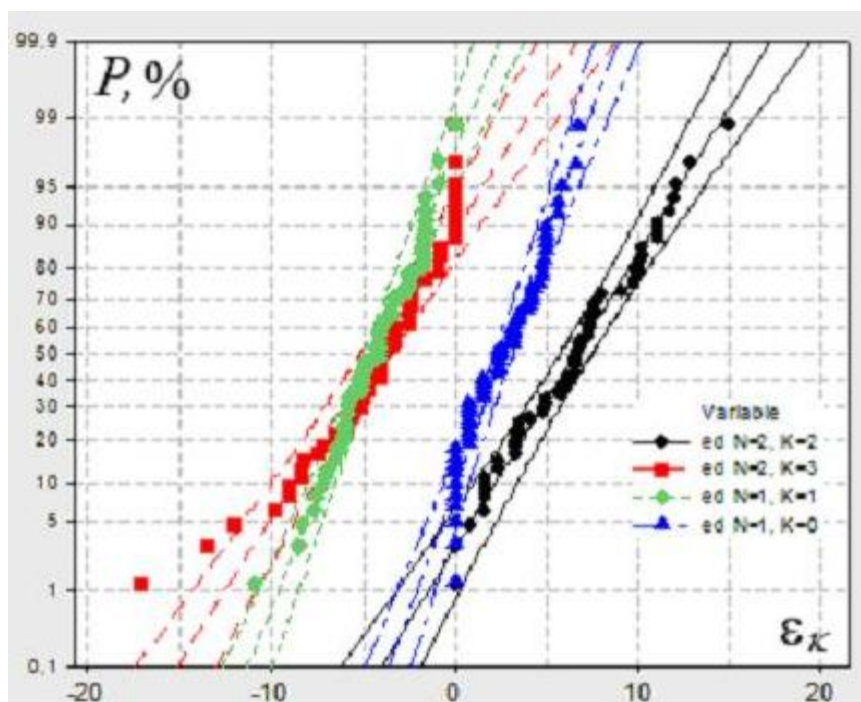


Рис.7. Деформация диагонали отпечатка индентора стали ТС в первом и втором циклах.

Так в полуциклах растяжения (рис.8-10) и сжатия (рис.11 - 13) разброс экспериментальных данных на базе 30 мкм существенно превышает рассеяние деформаций на базах 100 и 200 мкм.

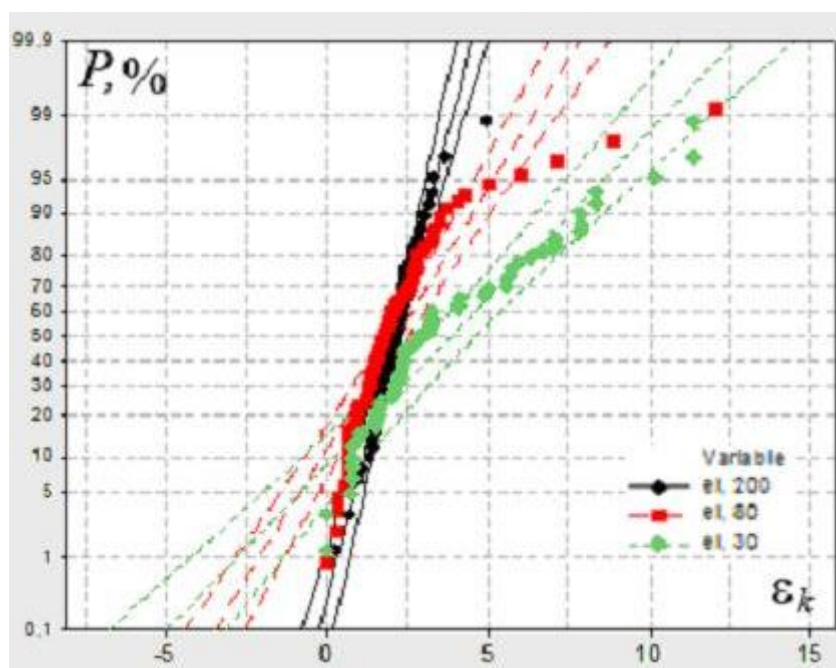


Рис.8. Статистическое распределение деформаций на базах 30 мкм, 100 мкм и 200 мкм стали ТС в полуцикле растяжения третьего цикла.

И если на базах в 100 и 200 мкм диапазон изменения локальных деформаций находится в пределах от 0 до 5 %, то на базах 30 мкм для случая растяжения в первом цикле он составляет от до 6,5%, а во втором от 0 до 15 %. В полуциклах сжатия ($K = 1$ и $K = 3$) диапазоны изменения составляют от 0 до 12% и от 0 до 17% соответственно (рис.11 – 14).

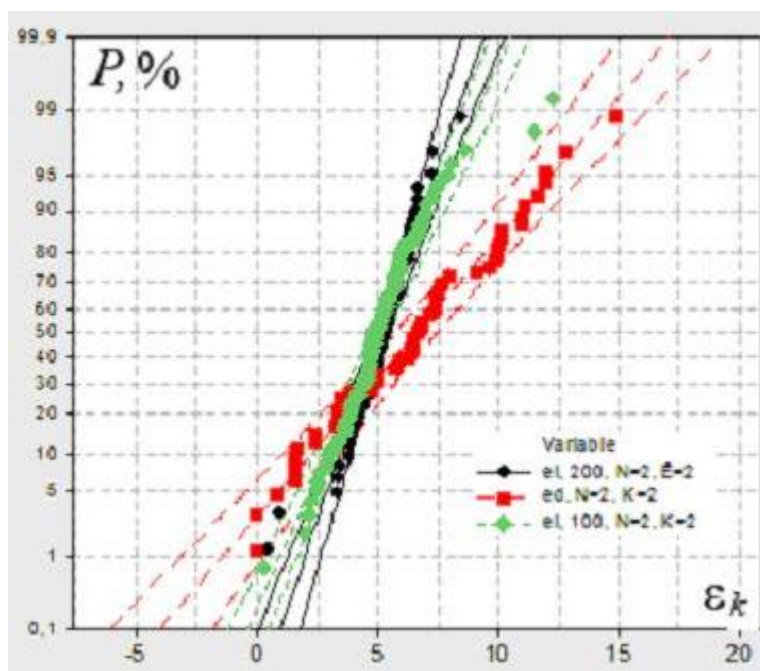


Рис.9. Статистическое распределение деформаций на базах 30, 100 и 200 мкм стали ТС в полуцикле растяжения второго цикла.

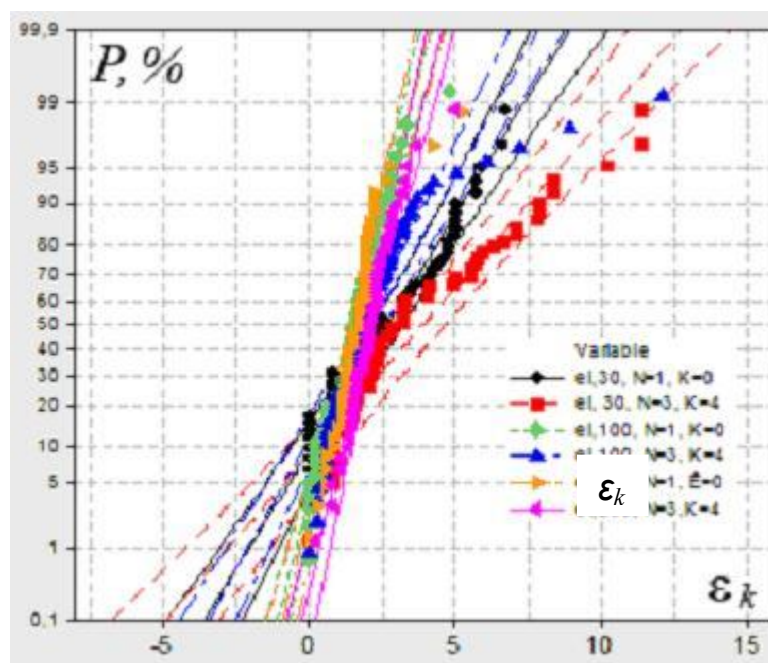


Рис.10. Статистическое распределение деформаций на базах 30 мкм, 100 мкм и 200 мкм стали ТС в полуциклах растяжения первого и третьего циклов.

Как следует из рис.5 – 17, неоднородность деформаций основного объема (до 80% накопленной вероятности) двухфазной стали с достаточной для практики точностью, можно считать подчиняется нормальному закону распределения. Однако, в отличие от однофазного материала, сталь с содержанием перлитной составляющей деформируется более

неоднородно, в особенности двухфазная сталь, имеющая как перлитную, так и ферритную структуру (сталь 45) [3-7]. И эта неоднородность обусловлена наличием не связанного (свободного) железа (феррита), который располагается между зернами перлита в виде прослоек. Железо, связанное с графитом (цементитом) и образующее с ним перлит, имеет меньше возможностей к свободной деформации и наблюдаются участки, которые пластически не деформируются. И в полуцикле растяжения, и в полуцикле сжатия неоднородность деформаций ферритной составляющей является высокой в отличие от перлитной составляющей. В полуциклах сжатия ферритная составляющая также проявляет большую деформацию, чем перлитная.

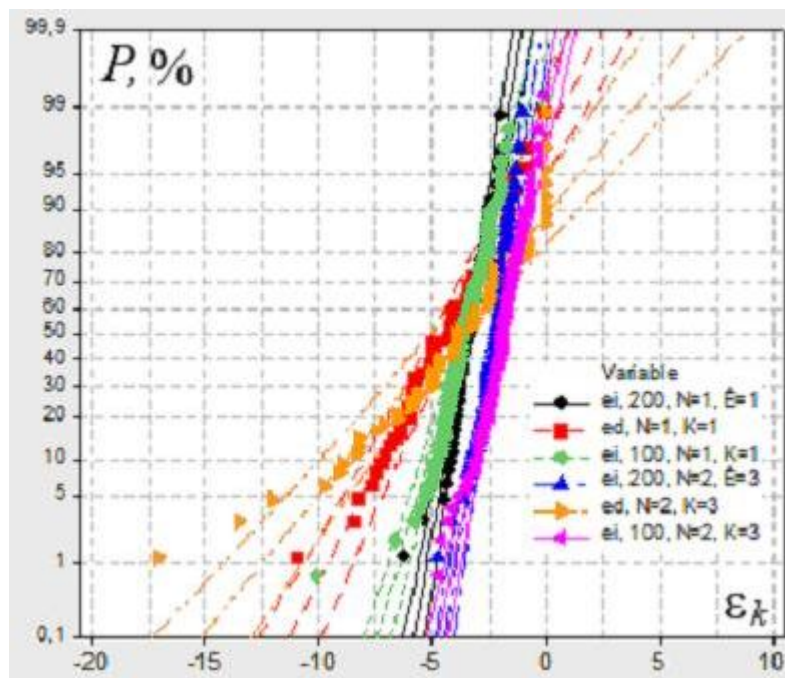


Рис.11. Статистическое распределение деформаций на базах 30 мкм, 100 мкм и 200 мкм стали ТС в полуциклах сжатия первого и второго циклов.

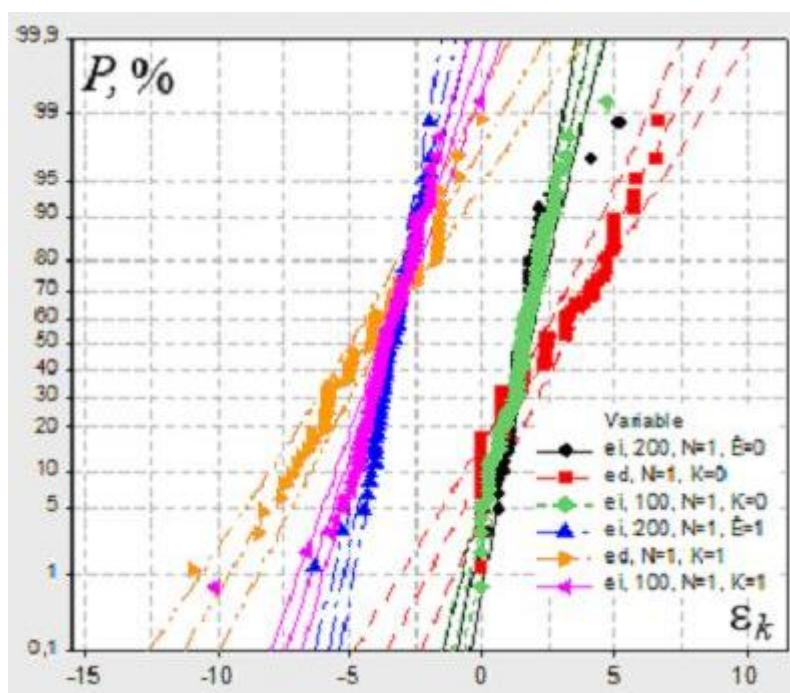


Рис.12. Статистическое распределение деформаций на базах 30 мкм, 100 мкм и 200 мкм стали ТС в полуциклах растяжения и сжатия первого цикла.

Как было показано [3-7], при последующем циклическом упругопластическом деформировании в полуциклах растяжения и сжатия сохраняется высокая неоднородность железа. Это свидетельствует о том, что очаги с максимальными деформациями и в структурно неоднородной (двухфазной со свободным α -железом) закрепляются и при последующем деформировании). Примечательно, что до 10% диагоналей оказываются в сжатом состоянии и претерпевают пластические деформации до -17% . По-видимому, при взаимодействии прочной (перлитной) и пластичной (ферритной) составляющих при больших пластических деформациях вследствие опережающего перемещения объемов феррита возникают условия, когда отдельные объемы оказываются «зажатыми».

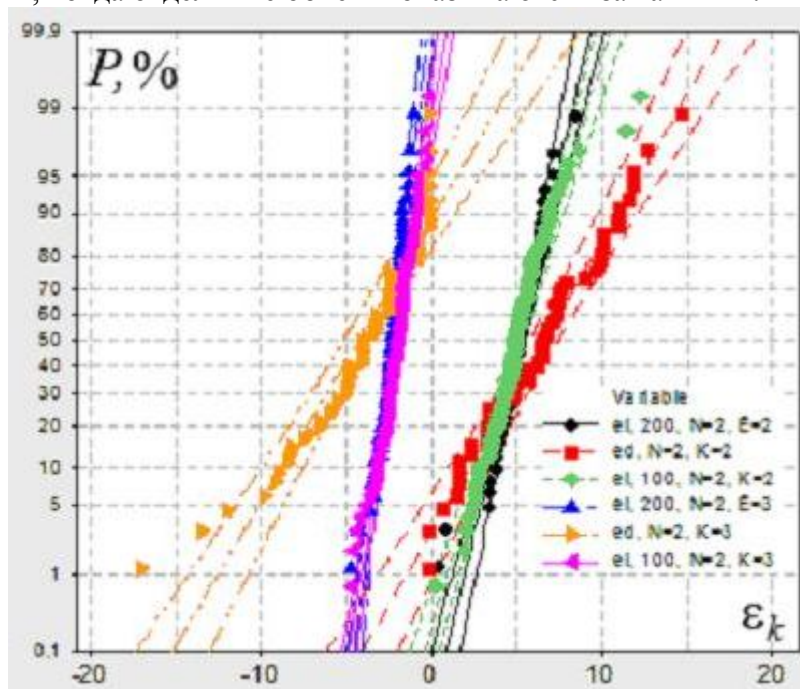


Рис.13. Статистическое распределение деформаций на базах 30, 100 и 200 мкм стали ТС в полуциклах растяжения и сжатия второго цикла.

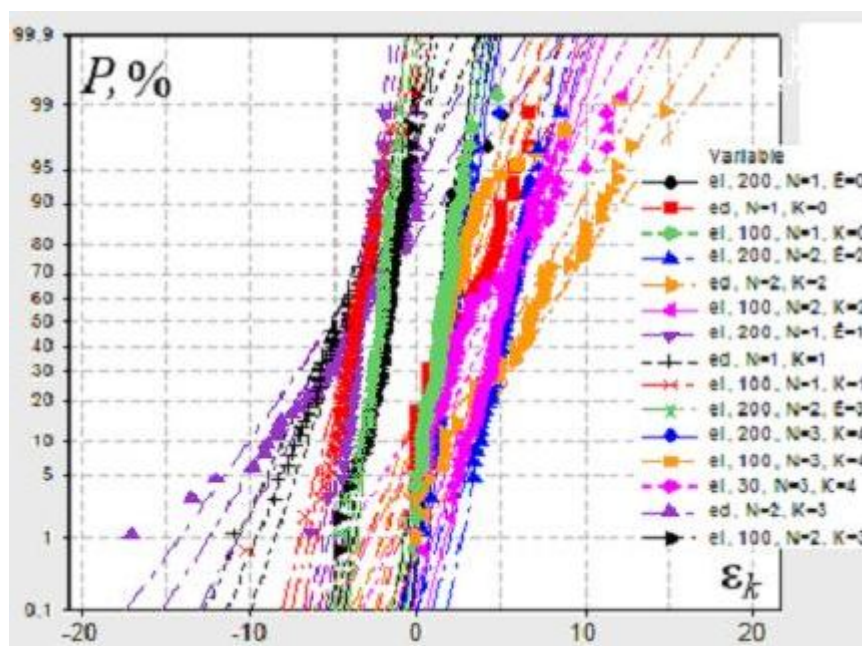


Рис.14. Статистическое распределение деформаций на базах 30 мкм, 100 мкм и 200 мкм стали ТС в полуциклах растяжения и сжатия первого и второго циклов и полуцикле растяжения третьего цикла

Как в первом, так и во втором цикле в полуцикле растяжения неоднородность деформаций диагоналей отпечатков возрастает, но при этом рассеяние деформаций перлита подчиняется нормальному закону распределения. Причем диагонали, получившие сжимающую деформацию в первом цикле, сохраняются и во втором.

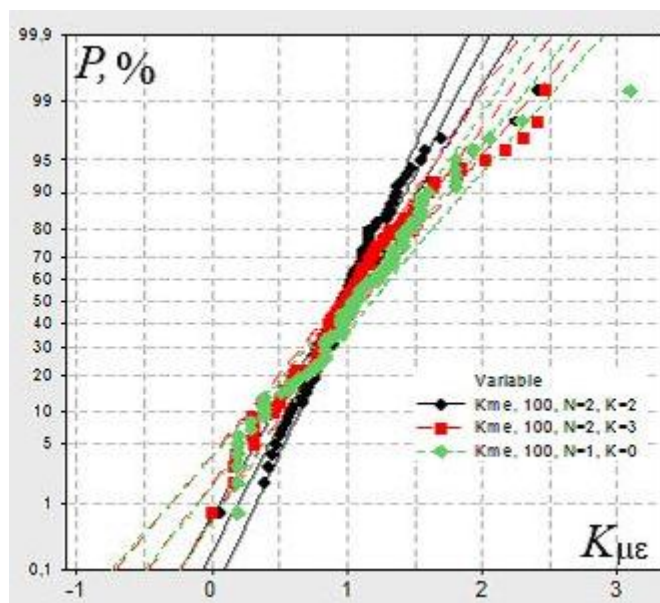


Рис.15. Статистическое распределение коэффициентов неоднородности деформаций на базе 100 мкм стали ТС в первом и втором циклах

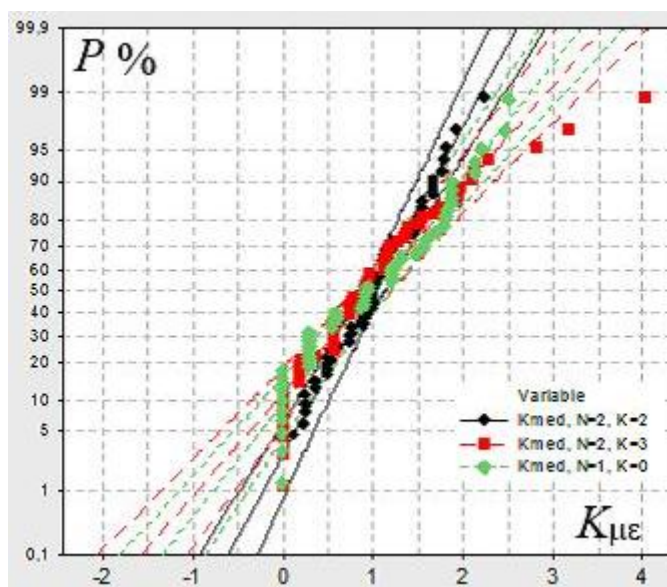


Рис.16. Статистическое распределение коэффициентов неоднородности деформаций на базе 30 мкм стали ТС в первом и втором циклах

С увеличением общей деформации в ферритно-перлитной стали местные деформации продолжают расти, и при средней деформации 10% достигают величины в отдельных зонах до 30%. Причем увеличение средней деформации сопровождается ростом местной, как правило, в одних и тех же участках. После снятия нагрузки на отдельных участках исходного деформирования последующее нагружение в ту же сторону (растяжение) сопровождается преимущественным деформированием тех же зон. Однако интенсивность развития

деформаций в этих зонах неодинакова, и происходит при этом некоторое выравнивание общих деформаций по всей базе. После разгрузок в процессе дальнейшего нагружения, в том числе и при смене знака нагрузки, средняя деформация по базе поддерживается сравнительно равномерной.

При смене знака нагрузки максимальные местные циклические деформации сжатия наблюдаются в тех же участках, где они были наибольшими при растяжении. С увеличением количества циклов нагружения происходит некоторое перераспределение деформаций в отдельных участках базы образца. Однако зоны с повышенным и пониженным уровнем деформации, определяемые на базах 30, 100 и 200 мкм, сохраняются. Для перлитной стали ТС (100% перлита) деформация в локальных участках более однородна, чем сталь с частичной долей перлита (сталь 45).

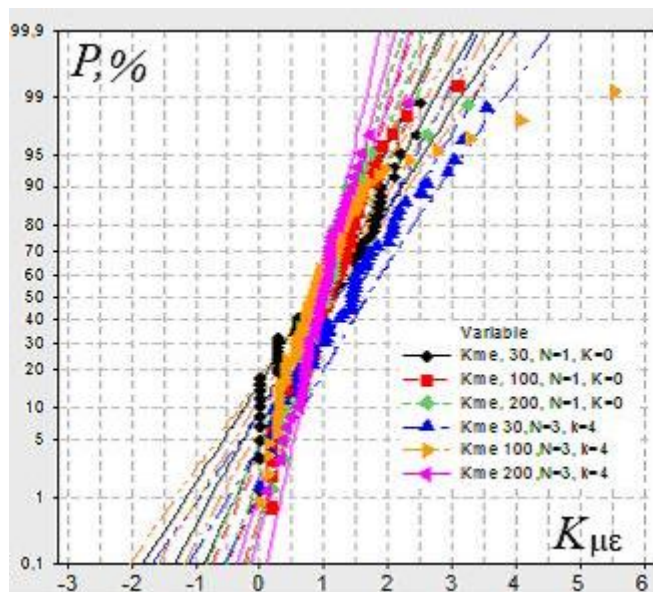


Рис.17. Статистическое распределение коэффициентов неоднородности деформаций на базах 30, 100 и 200 мкм стали ТС в полуцикле растяжения первого и третьего циклов.

Вместе с тем, по-видимому, имеются участки, обедненные углеродом, со свободным α -железом, которые деформируются активнее, чем основная масса металла. Как видно из рис.15, описанные выше особенности развития локальных деформаций определяют и соответствующее рассеяние коэффициентов неоднородности деформаций, значения коэффициентов которой могут достигать 3.

Последующее нагружение (третий цикл) приводит к тому, что идет дальнейшее некоторое перераспределение деформаций на малых базах). При этом неоднородность локальных деформаций возрастает, и зоны с высокой неоднородностью сохраняются на всех базах измерения как во втором, так и в третьем циклах (рис. 18).

Соответствующим образом и формируются коэффициенты неоднородности для исследуемых локальных участков. В полуциклах сжатия наблюдается более высокая однородность (рис.19) по сравнению с полуциклами растяжения.

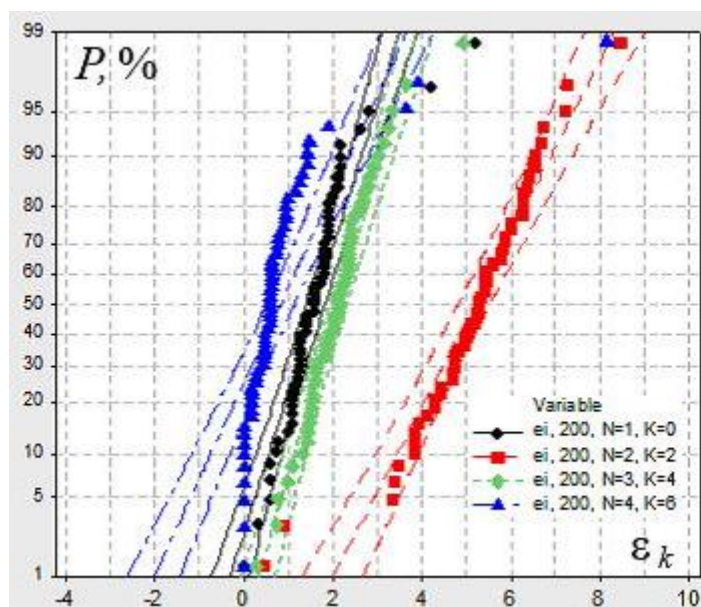


Рис.18. Статистическое распределение локальных деформаций стали ТС на базе 200 мкм при нагружении в четырех циклах (полуцикл растяжения).

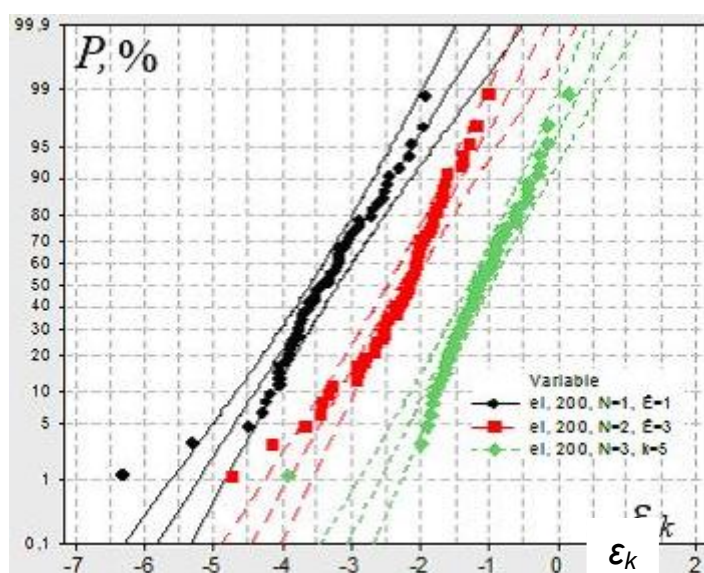


Рис.19. Статистическое распределение деформаций в полуцикле сжатия трех циклов стали ТС на базе 200 мкм.

2.2. Связь структурной и деформационной неоднородности конструкционных материалов

Статистическая обработка показала, что неравномерность пластической деформации на рабочей базе образца может быть оценена через параметры вероятностных кривых нормального распределения, определяемых уравнением вида

$$x = U_p \sigma + a, \tag{3}$$

где x – либо местная циклическая деформация ϵ_{pk} , либо местная односторонне накопленная деформация ϵ_k , соответствующая заданному квантилю нормального распределения U_p ; σ и a – соответственно стандартное отклонение и математическое ожидание.

Коэффициенты неоднородности $K_{\mu\epsilon}$ и $K_{\mu\epsilon_p}$ по вероятностной кривой для заданного квантиля нормального распределения U_p могут быть определены как

$$K_{\mu} = (U_p \sigma + a) / a.$$

Используя параметры $a = \varepsilon_{pk}$ (или ε_k) кривых распределения для ε_{pk} и ε_k и принимая $\sigma = S$, получаем

$$K_{\mu\varepsilon} = (U_p S + \varepsilon_{pk}) / \varepsilon_{pk}, \quad (4)$$

$$K_{\mu\varepsilon_p} = (U_p S + \varepsilon_k) / \varepsilon_k, \quad (5)$$

где S – среднее квадратичное отклонение соответственно для ε_{pk} или ε_k .

Для однородного материала оказалось $U_p = 2,79$, и тогда через параметры распределения местных деформаций могут быть получены коэффициенты их неоднородности в виде

$$K_{\mu\varepsilon} = (2,79S + \varepsilon_{pk}) / \varepsilon_{pk}, \quad (6)$$

$$K_{\mu\varepsilon_p} = (2,79S + \varepsilon_k) / \varepsilon_k, \quad (7)$$

где ε_{pk} и ε_k – средние деформации, измеренные на большой базе (в нашем случае она составляла 40 мм).

Было показано также [3], что, используя параметры нормального закона распределения микротвердости исходного материала, измеренной с нагрузкой на индентор 100 г, с учетом доверительного интервала, соответствующего $U_p = -2,79$ (вероятность 99,73%), можно определить коэффициенты микронеоднородности развития циклических $K_{\mu\varepsilon}$ и односторонне накопленных деформаций $K_{\mu\varepsilon_p}$:

$$K_{\mu\varepsilon} = K_{\mu\varepsilon_p} = K_{H_{\mu}} = \bar{H}_{\mu} / (H_{\mu} - U_p S), \quad (8)$$

где S – среднеквадратичное отклонение значений микротвердости; \bar{H}_{μ} – среднее значение микротвердости, соответствующее квантилю $U_p = 0$, H_{μ} – текущее значение микротвердости.

При этом для характеристик статистического распределения микротвердости $U_p = 2,79$, как и для случая распределения локальных деформаций.

3. Исследование неоднородности накопления повреждений в поликристаллических материалах при циклическом нагружении

Такого рода структурная неоднородность предопределяет условия накопления повреждений в локальных зонах и возникновение в них предельных состояний (образование микротрещин).

Отмеченная структурная неоднородность исследованных сталей предопределяет условия развития деформационной неоднородности и накопления повреждений в локальных зонах и возникновение в них предельных состояний (образование микротрещин).

3.1. Критерии оценки уровней накопленных повреждений в локальных зонах циклически деформированного материала

Для описания уровня накопленных повреждений η при циклическом упругопластическом деформировании использовался единый деформационно-кинетический критерий в виде [7]:

$$\eta = \int_0^N \frac{\varepsilon_p \varepsilon_{ep}}{\varepsilon^2} dN + \int_0^N \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} dN, \quad (9)$$

где ε_p – ширина петли гистерезиса, ε_{ep} – упругопластическая деформация в цикле, $\Delta\varepsilon$ – односторонне накопленная пластическая деформация, ε – предельная деформация при однократном статическом разрушении образца, N – текущее число циклов нагружения.

В предельном случае (образование трещины) зависимость (9) записывается в виде:

$$\int_0^{N_p} \frac{\varepsilon_p \varepsilon_{ep}}{\varepsilon^2} dN + \int_0^{N_p} \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} dN = 1, \quad (10)$$

где N_p – число циклов до разрушения (образования трещины).

Первый член в зависимостях (9) и (10) определяет усталостное повреждение, второй – квазистатическое.

Наличие деформационной неоднородности при малоцикловом нагружении приводит к неравномерному накоплению повреждений в отдельных участках рабочей базы образца. В результате в местах максимальных деформаций наблюдается более раннее возникновение предельных состояний с образованием микротрещин.

С учетом неоднородности пластической деформации в циклах нагружения в соответствии с зависимостью (9) условие разрушения (появление микротрещин в локальных участках при $N_p < 10^5$ циклов), когда повреждение от упругой деформации невелико, может быть записано следующим образом:

$$\int_0^{N_p} \frac{(K_{\mu\epsilon_p} \epsilon_{pk})^2}{\epsilon^2} dN + \int_0^{N_p} \frac{K_{\mu\epsilon_p} \epsilon_k}{\epsilon} dN = 1, \quad (11)$$

где $K_{\mu\epsilon}$ и $K_{\mu\epsilon_p}$ - коэффициенты неоднородности циклической и односторонне накопленной деформаций.

При $N_p > 10^5$ циклов предельно накопленное повреждение в локальных участках рабочей поверхности образца в соответствии с зависимостью (10) может быть описано в виде:

$$\int_0^{N_p} \frac{(K_{\mu\epsilon} \epsilon_{pk})^2}{\epsilon^2} dN + \int_0^{N_p} \frac{K_{\mu\epsilon_p} \Delta\epsilon}{\epsilon} dN + \int_0^{N_p} \frac{K_{\mu\epsilon} e_e K_{\mu\epsilon} \epsilon_{pk}}{\epsilon^2} dN = 1, \quad (12)$$

где $K_{\mu\epsilon}$ - максимальный коэффициент микронеподнородности упругой деформации; e_e - средняя упругая деформация на рабочей базе образца, определяемая как σ_a / E .

Как показывают наблюдения, при малоцикловом нагружении даже в жестком режиме (с постоянным размахом упругопластической деформации) предельное накопление повреждений к моменту образования микротрещин может происходить как за счет усталостного, так и квазистатического повреждений. Относительные доли того и другого определяются свойствами материала и условиями нагружения в отдельных микрообластях, определяющими степень жесткости нагружения (мягкое, жесткое), и в различных участках микротрещины могут быть результатом либо усталостного повреждения, определяемого как ($N_p < 10^3$)

$$\int_0^{N_p} \frac{(K_{\mu\epsilon} \epsilon_{pk})^2}{\epsilon^2} dN \approx 1 \quad (13)$$

или ($N_p > 10^3$)

$$\int_0^{N_p} \frac{(K_{\mu\epsilon} \epsilon_{pk})^2}{\epsilon^2} dN + \int_0^{N_p} \frac{K_{\mu\epsilon} e_e K_{\mu\epsilon} \epsilon_{pk}}{\epsilon^2} dN \approx 1, \quad (14)$$

либо квазистатического, при котором

$$\int_0^{N_p} \frac{K_{\mu\epsilon_p} \epsilon_k}{\epsilon} dN \approx 1, \quad (15)$$

т.е. максимальная накопленная деформация в микроучастке достигает величины, равной предельной деформации при статическом разрыве.

Смешанный тип разрушения определится предельной суммой как усталостного, так и квазистатического повреждений, получаемой в соответствии с зависимостью (11).

3.2. Исследование неоднородности накопления повреждений в локальных зонах при упругопластическом циклическом деформировании сталей

Неоднородность накопления повреждений в стали ТС, подобно неоднородности деформаций, представлена в виде коэффициентов неоднородности. Показано, что если на базе размером 200 мкм более осредненность повреждений по длине базы характеризуется незначительным рассеянием характеристик, для базы вдвое меньшей наблюдаются

отдельные участки, повреждение которых составляет более 35%. При этом неоднородность повреждения баз отличаются большей неоднородностью, чем на базе в 200 мкм. Уменьшение базы до 30 мкм выявляет значительный разброс данных большого числа микроучастков. Отдельные из них получают повреждения только в представленном цикле более 45%. Это означает, что при циклическом упругопластическом деформировании при средней деформации, измеряемой деформометром на базе 40 мкм и составляющей около 6%, уже через несколько циклов нагружения достигаются предельные состояния с нарушением когерентной связи с образованием субмикротрещин размером, соизмеримым с размером базы.

Для двухфазного поликристаллического материала (сталь 45) преимущественное накопление повреждений происходит в ферритной фазе, как наиболее пластичной и наименее прочной (рис.3.2). Указанные зоны характеризуются наибольшей деформационной и структурной неоднородностью. В материале с полностью перлитной структурой (сталь ТС) повреждение накапливается в соответствии с неоднородностью свойств отдельных зон (рис.14).

Как и видно из рис.20, подобно распределению локальных деформаций (рис.14), в начале нагружения (первый полуцикл) остаются для стали ТС неповрежденными отдельные зоны, и вместе с тем имеются зоны с высокой деформацией. Характер распределения повреждений во втором цикле сохраняется и в третьем цикле на всех измеряемых базах (рис. 20-21).

Структурно однородная однофазная сталь X18H10T и в первом полуцикле нагружения (растяжение) по локальным повреждениям при статистической обработке проявляла хорошее соответствие нормальному закону распределения [1-2].

Таким образом, проведенные исследования показали, что характер развития деформационных процессов и в соответствии с ними и характер накопления повреждений определяется структурным состоянием деформируемого материала и его фазовым составом.

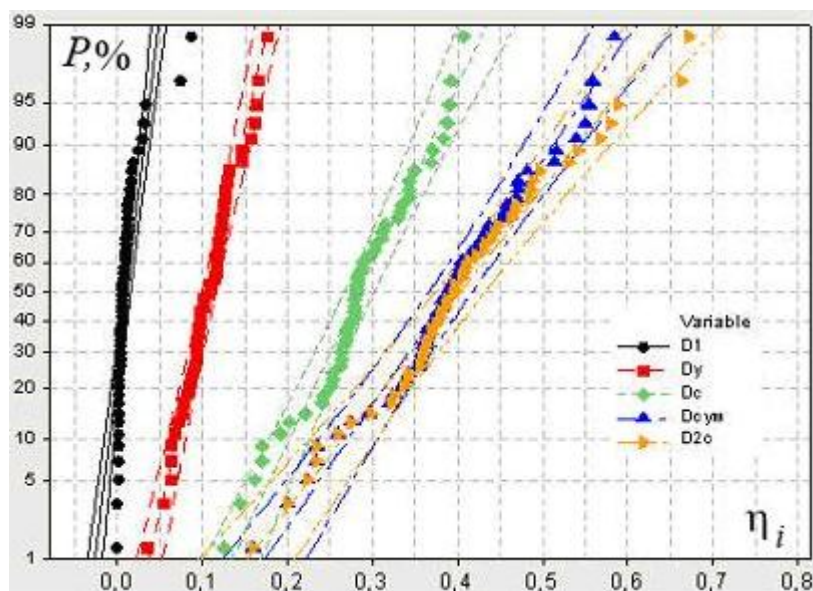


Рис.20. Статистическое распределение повреждений в локальных зонах в стали 45 в первом цикле, усталостного повреждения, статического, суммарного во втором цикле и суммарного повреждения в двух циклах

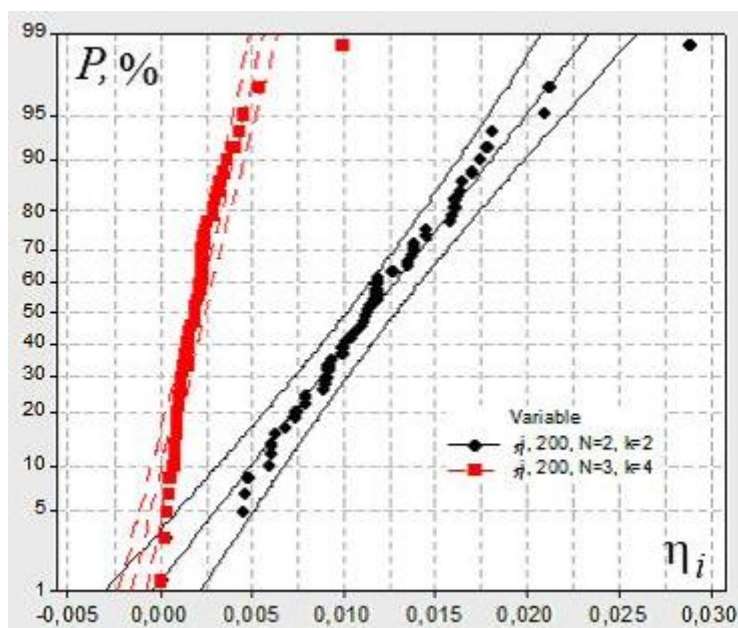


Рис.21. Статистическое распределение локальных повреждений стали ТС на базе 200 мкм во втором и третьем циклах нагружения (полуцикл растяжения)

Выводы

1. Исследована деформационная и структурная неоднородность различных по своему структурному состоянию конструкционных сталей (однофазных и двухфазных) при циклическом упругопластическом деформировании. Показано, что наибольшая деформационная неоднородность для всех испытанных сталей наблюдается на начальной стадии циклического нагружения (первые циклы) с последующей их стабилизацией. При этом наблюдается также локализация зон с неоднородной деформацией в процессе нагружения до возникновения предельных состояний (рассредоточенного трещинообразования).

2. Предложен альтернативный метод оценки деформационной неоднородности на основе показателей структурной неоднородности, определяемой на основе данных по измерению микротвердости.

3. Статистической обработкой установлено, что рассеяние значений местных деформаций и микротвердости для однофазной стали подчиняется нормальному закону распределения с количественным совпадением коэффициентов неоднородности, что позволяет оценивать деформационную неоднородность по структурной неоднородности, определяемой на основе статистических данных измерений микротвердости материала на рабочей базе образца.

4. Для структурно однородной стали (ст. X18H10T) коэффициенты неоднородности деформаций на рабочей базе образца могут быть определены по параметрам статистического распределения характеристик структурной неоднородности, определяемых параметрами статистического распределения значений микротвердости.

5. Для двухфазной стали с ферритно-перлитной структурой (сталь 45) статистическое распределение локальных деформаций подчиняются нормальному закону распределения для каждой из структурных составляющих (феррита и перлита). Ферритная составляющая является «слабым звеном», в котором активизируются пластические деформации и в ее участках в первую очередь возникают предельные состояния (образование микротрещин).

6. В двухфазном поликристаллическом материале, состоящем из двух резко различающихся по своим деформационным и пластическим свойствам фаз: феррита (α -железа) и цементита, каждая из которых сопротивляется циклическому упругопластическому деформированию по своим собственным закономерностям, проявляется более высокий уровень деформационной неоднородности по сравнению с однофазным материалом.

7. Характер статистического распределения коэффициентов структурной и деформационной неоднородности повторяется для распределения локальных деформаций и микротвердости. Ферритная составляющая (α -железо), не связанная с цементитом, в основном обуславливает высокую структурную и деформационную неоднородность, и распределение ее коэффициентов деформационной неоднородности лишь приближенно и раздельно может быть описано нормальным законом.

8. Предложено оценку предельных состояний (образование микротрещин) в локальных зонах неоднородно деформируемого поликристаллического материала оценивать на основе деформационно-кинетического критерия разрушения с введением в него коэффициентов деформационной (структурной) неоднородности.

9. Исследование предельных состояний в локальных участках деформируемых поликристаллических материалов позволяет описать рассредоточенное трещинообразование, предшествующее образованию магистральной трещины.

Список литературы

1. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 1.
2. Романов А.Н. Разрушение при малоцикловом нагружении. Изд-во «Наука», 1988, 278 с.
3. Романов А.Н., Филимонова Н.И. Структурная и деформационная неоднородность конструкционных материалов и рассредоточенное трещинообразование при циклическом нагружении. Сборник статей по материалам Первой международной конференции «Деформация и разрушение материалов», 2006, т. I, с. 32-35.
4. Романов А.Н., Филимонова Н.И. Рассредоточенное трещинообразование в конструкционных материалах при циклическом нагружении в связи с их структурной неоднородностью. Труды Международной научно-технической конференции «Прочность и надежность магистральных трубопроводов» «МТ-2008», Киев, Украина, 2008.
5. Романов А.Н., Филимонова Н.И. Неоднородность накопления повреждений в конструкционных металлических материалах при циклическом нагружении в связи с их структурной неоднородностью. Труды VII Международной конференции «Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения». 2008, Санкт-Петербург.
6. Романов А.Н., Филимонова Н.И. Структурная и деформационная неоднородность конструкционных металлических материалов. «Информатизация и связь», № 4, 2009. с. 48-54.
7. Романов А.Н. Предельные состояния при циклическом деформировании и разрушении конструкционных материалов. Сб. трудов Третьей международной конф. «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов», Москва, 2009. Интерконтакт Наука, т.2, с.371-372.