УДК 620.186.4

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ МИКРОПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ И ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛОС СКОЛЬЖЕНИЯ ПРИ УСТАЛОСТНОМ НАГРУЖЕНИИ.

© Александр Викторович Гончар[1], Александр Леонидович Руденко[2], Василий Васильевич Мишакин[1]

[1] Нижегородский филиал института машиноведения РАН, Нижний Новгород, Россия

[2] ДП АО "Волга-СГЭМ" "Камспецэнерго", Набережные Челны, Россия

imndt31@mts-nn.ru

Аннотация. В работе проведено исследование влияния упругопластического циклического деформирования на процессы развития микропластических деформаций и формирование полос скольжения на примере низкоуглеродистой стали 15ЮТА. Получена высокая корреляционная связь между концентрацией грубых полос скольжения и величиной микропластической деформации при различных значениях амплитуды нагружения (от 275 до 336 МПа). Интенсивность изменения микропластических деформаций и концентрацию полос скольжения предлагается использовать в качестве диагностических параметров для прогнозирования текущего и критического значения количества циклов нагружения по данным оптических измерений.

***Ключевые слова*:** *усталостное разрушение, оптический метод, микропластические деформации, полосы скольжения.*

THE INVESTIGATION OF EVOLUTION MICROPLASTIC DEFORMATION AND SLIP BANDS FORMATION BY FATIGUE LOADING

© A.V. Gonchar[1], A.L. Rudenko[2], V.V. Mishakin[1]

[1] Nizhny Novgorod branch of the Institute of Mechanical Engineering of the RAS, Nizhny Novgorod, Russia

[2] JSC "Volga-SGEM" "Kamspetsenergo", Naberezhnye Chelny, Russia

Abstract. *In this paper the influence of cyclic elastoplastic deformation on the evolution process of microplastic deformation and formation of slip bands on the example of low carbon steel M1015 is studied. A high correlation between the concentration of persistent slip bands and microplastic deformation at different values of the amplitude of loading (from 275 to 336 MPa) is obtained. The intensity of changes of microplastic deformations and the concentration of slip bands as diagnostic parameters for predicting the current and the critical number of loading cycles on the data of optical measurements is proposed to use.*

Key words: *fatigue failure, optical method, microplastic deformation, slip bands.*

1. Введение. Множество стальных конструкций и деталей машин подвергаются многократным нагрузкам, напряжения которых лежат ниже макроскопического предела текучести. Тем не менее, в отдельных микрообластях материала наблюдаются микропластические деформации, где и происходит процесс накопления рассеянных микроповреждений, что, в конечном итоге, приводит к появлению макротрещин и окончательному разрушению материала [1].

Появление пластических микродеформаций при упругих макродеформациях обусловлено неоднородностью напряжений и деформаций второго рода. В соответствии с критериями пластичности при сложном напряжённом состоянии пластические микродеформации возникают в так называемых “слабых” зонах [1], где интенсивность напряжения превышает локальный предел текучести. В работе [2] показано, что при любой схеме напряженного состояния показатели относительной неоднородности поля интенсивностей напряжений и деформаций в кубических поликристаллах пропорциональны анизотропии упругих свойств зерен. Исследования показали, что усталостное разрушение сопровождается изменением характеристик распределения микропластических деформаций [1,2]. Измерение микродеформаций производилось методом сеток. Размер ячеек сеток был соизмерим со средним размером зерна. Исследования показали, что в ряде случаев поведение характеристик микропластичности неоднозначно определяет исчерпание ресурса материала. Это, по-видимому, связано с тем, что развитие микропластических деформаций не всегда означает интенсивное накопление повреждений. Микропластические деформации могут способствовать релаксации микронапряжений и уменьшать скорость их накопления.

Известно, что на другом структурном уровне происходят существенные пластические деформации, локализованные в полосах скольжения внутри зерна и в ряде случаев выходящих на границы зерна. Механизм зарождения микротрещин связанный с полосами скольжения приведен в [3]. Рельеф полос скольжения представляет собой чередующиеся выступы (экструзии) и впадины (интрузии). Интрузии представляют собой промежуток между двумя соседними экструзиями и не достигают уровня недеформированной поверхности. Скорость роста интрузий составляет от 1 до 10 нм/цикл [4].

Исследования показывают, что между поверхностью материала и экструзией возникает концетратор напряжения, который приводит к зарождению усталостной трещины. Развитие полос скольжения и образование микротрещин влияет на деформацию зерна. Микропластические деформации и характеристики полос скольжения (средняя длина, ширина и концентрация) можно определять оптическим методом в лабораторных условиях и непосредственно на конструкции например с помощью переносного металлографического комплекса СПЕКТР МЕТ [5]. Исследование связи деформаций на уровне зерна с характеристиками полос скольжения позволит более детально описать процесс разрушения металла и выявить диагностические параметры для оценки состояния материала методом неразрушающего контроля.

Целью данной работы является изучение связи усталостного разрушения с развитием микропластических деформаций и формированием полос скольжения на примере низкоуглеродистой стали 15ЮТА, определение диагностических параметров, для оценки величины усталостного разрушения до образования макротрещины.

2. Материалы и методика исследований. Для исследования использовались образцы, вырезанные вдоль направления проката из листовой горячекатаной стали 15ЮТА. Сталь 15ЮТА имеет следующие механические свойства: $\sigma_т$=290 МПа, $\sigma_В$=430 МПа. Химический состав стали 15ЮТА: C 0,09-0,15 %; Si 0,5-0,8 %; Mn 0,8-1,2 %; Cr, Ni, Cu не более 0,3%; Al и Ti не более 1,5%. Усталостные испытания проводились по схеме консольного изгиба на машине резонансного типа с частотой нагружения 9 Гц на образцах прямоугольного сечения III типа (ГОСТ 25.502-79). Для поддержания постоянной амплитуды нагружения использовалось следящее устройство с обратной связью. Геометрические размеры образцов – 120×20×3 мм. Согласно ГОСТу 25.502-79 в середине образцов находилась выточка полукруглой формы радиусом R= 25мм, где происходила локализации упругопластической деформации и проводились металлографические исследования. Испытания каждого образца проводились сериями до появления макротрещины длиной 1мм.

Каждая серия испытаний включала 10-15 тысяч циклов. Исследования проводились после каждой серии испытаний в зоне локализации упруго-пластической деформации.

Изучение микроструктуры материала проводилось оптическим методом с помощью переносного металлографического комплекса СПЕКТР МЕТ.

Для характеристики структурных изменений связанных как с деформацией на уровне зерна, так и с появлением полос скольжения, использовался следующий подход. Фотографии микроструктуры были отмасштабированы и повернуты относительно начального изображения, соответствующее исходному состоянию материала. Масштабирование и поворот с шагом 1 пиксель проводились до появления максимального контраста текущего изображения с исходным. В программе Mathcad отредактированные изображения были преобразованы в двухмерный массив данных, каждый элемент которого соответствовал величине интенсивности (яркости) пикселя на фото, которая может принимать значения от 0 до 255. Для выявления структурных изменений проводилось вычитание значений элементов последующих двумерных массивов значений интенсивности для различных серий нагружения из матрицы, соответствующей начальному состоянию материала. В результате вычитания получены массивы данных. Для их визуализации и дальнейшего анализа они были преобразованы обратно в фотографии.

Изменение интенсивности каждой точки поверхности для каждой серии усталостного нагружения k вычислялось по формуле:

$$\Delta I_{i,j}^{k} = I_{i,j}^{k} - I_{i,j}^{0},$$

где $I_{i,j}^{0}$ - значение интенсивности точки поверхности, соответствующей начальному состоянию материала, $I_{i,j}^{k}$ - значение интенсивности точки поверхности, соответствующей состоянию материала после одной из серии усталостного нагружения. Для количественной оценки общей величины структурных изменений поверхности среднее значение изменения затемнения (параметр S) определялось по формуле:

$$S = \frac{1}{n \cdot m} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} \Delta I_{i,j},$$

где n и m количество точек поверхности по горизонтали и вертикали соответственно.

Относительное изменения параметра $S_{отн}$ определялось как: $S_{отн} = S/S^*$, где S^* - значение параметра S соответствующий моменту образования макротрещины.

С помощью металлографического комплекса СПЕКТР-МЕТ были проведены измерения расстояний между точками пересечения опорной линии с границами зерен. Эти расстояния использовались в дальнейшем для определения характеристик микропластических деформаций. Величина деформации в i-ом зерне определялась как:

$$\varepsilon_i = \frac{l_i - l_{i0}}{l_{i0}} \cdot 100\%,$$

где l_{i0} – начальное расстояние между точками, l_i – расстояние между точками после циклического нагружения. Среднее по модулю значение микропластической деформации, измеряемой вдоль и поперек проката определялось как:

$$\bar{\varepsilon}_{x,y} = \frac{1}{m} \sum_{i}^{m} \left| \varepsilon_i^{x,y} \right|,$$

где m – количество зерен, по которым проводились вычисления, $\left| \varepsilon_i^{x,y} \right|$ - абсолютное значение деформации в i-ом зерне вдоль и поперек оси нагружения. Погрешность измерения величины микропластической деформации составила не более 0,5%. Погрешность измерения длины и ширины грубых полос скольжения – 0,1 и 1 мкм соответственно.

3. Результаты и их обсуждение. Фотографии микроструктуры, в исследуемой зоне приведены на рис.1*а-в* (для материала в исходном состоянии рис.1*а*, после 100 000 циклов нагружения рис.1*б* и после образования усталостной макротрещины (222 000 циклов) рис.1*в*). Средний размер диаметра зерна составил 8 мкм. Как видно из фотографий поверхности микрошлифов, после первой серии усталостных испытаний в некоторых зернах появляются полосы скольжения в виде тонких линий. После нескольких серий эксперимента наблюдается как увеличение длины и ширины полос скольжения, так и образование новых, появляются темные пятна – что связано со стесненным поворотом и фрагментацией зерен в процессе разрушения материала, которое приводит к изменению условий отражения света (угла отражения и коэффициента отражения) от поверхности материала.
Как видно из рис. 1*г-е* образовавшиеся очаги микродеформаций после первого блока нагружения закрепляются и развиваются в процессе исчерпания ресурса материала. Анализ рисунков изменения структуры в области образования трещины даёт повод предположить о кластерном механизме образования трещины, когда наиболее протяжённые повреждённые фрагменты материала сливаются, образую макроскопическую трещину.

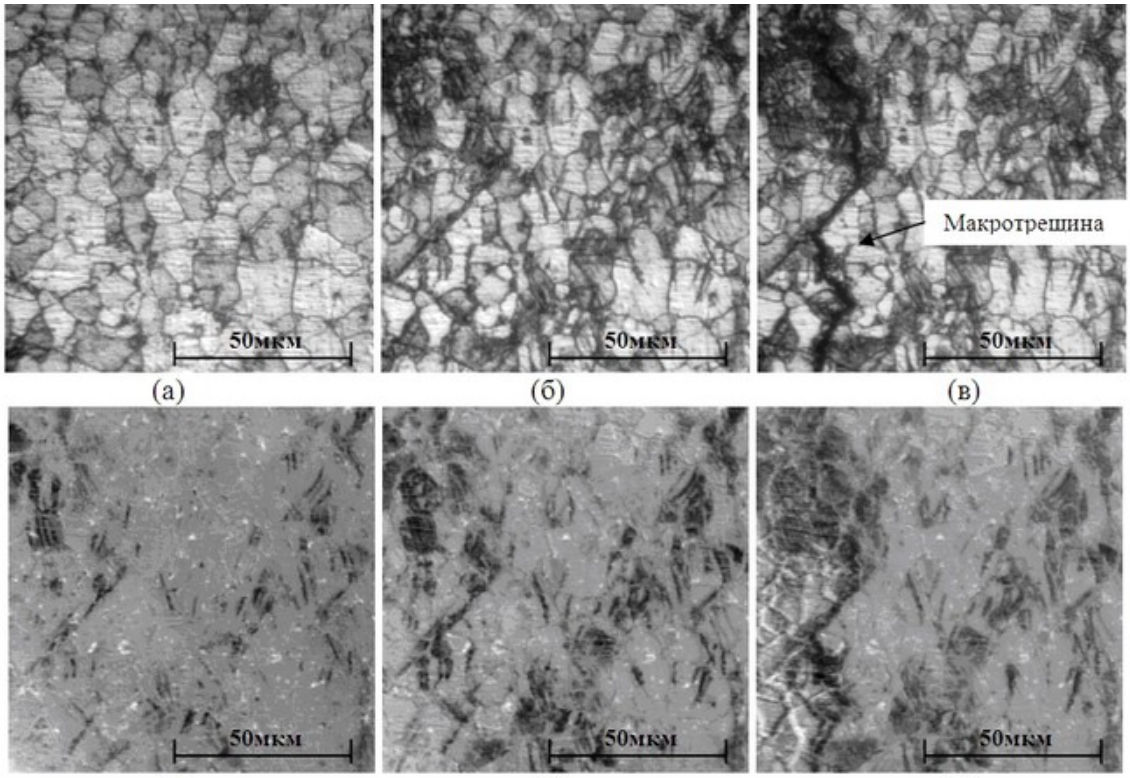
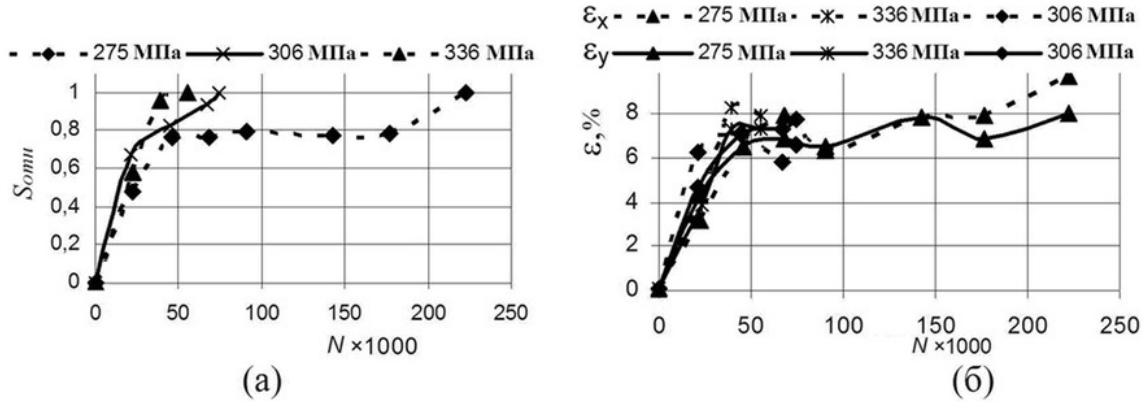


Рис. 1. Фотографии поверхности микрошлифа стали 15ЮТА одной и той же области исследования: а – исходное состояние материала до нагружения, б – после 100 тыс. циклов нагружения, в – после образования макротрещины; изменение яркости поверхности микрошлифа, г – после первой серии испытаний(23000 циклов), д – после 100 000 циклов, е – после образования усталостной трещины (222 000 циклов).

На рис. 2*а* дана зависимость $S_{отн}$ от количества циклов нагружения N, на рис. 2*б* приведена зависимость микропластической деформации от N.

Средняя по абсолютному значению величина микропластической деформации не превышала 9%.

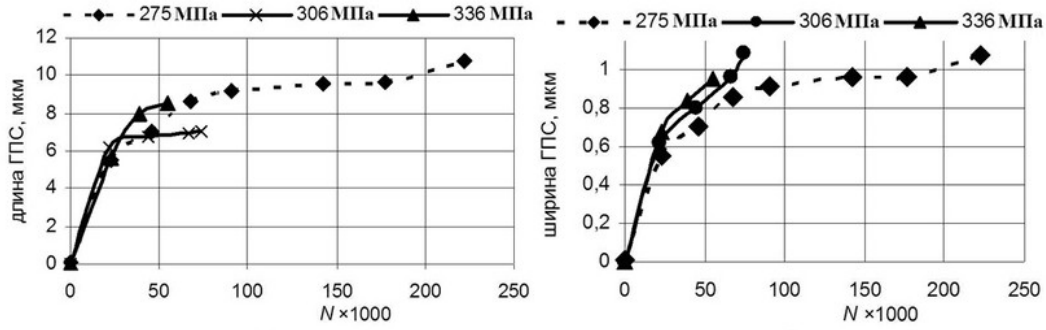
Графики зависимости длины, ширины и концентрации грубых полос скольжения (ГПС) от количества циклов нагружения представлены на рис. 3*а,б* и рис. 4*а*.



(а) (б)

Рис.2. а – зависимость *Sотн* от количества циклов нагружения, б – величина микропластической деформации от количества циклов нагружения.

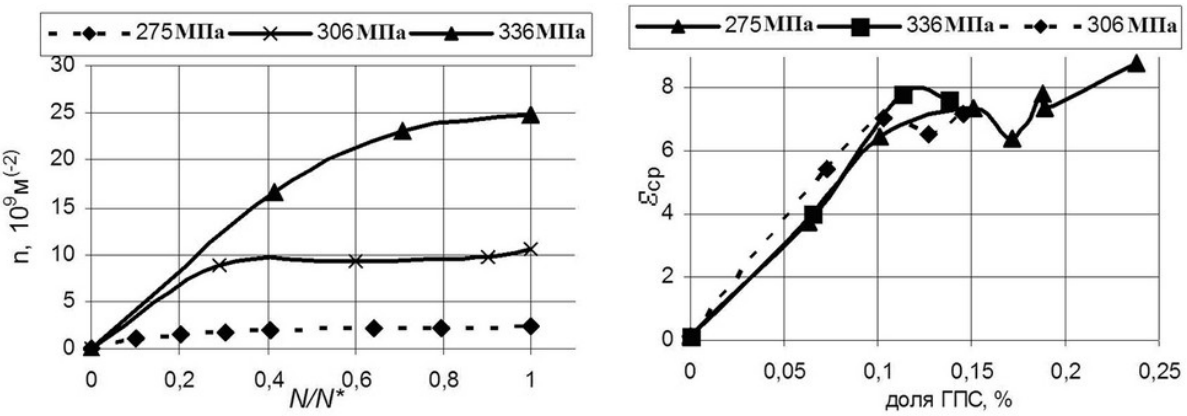
Длина и ширина полос скольжения при критическом значении циклов нагружения (количества циклов соответствующим появлению макротрещины) для разных амплитуд нагружения отличалась не существенно и достигала 7-10 мкм (рис. 4*а*) и 1 мкм соответственно (рис. 4*б*). Концентрация полос скольжения в момент образования макротрещины для различных амплитуд нагружения значительно отличались от $2{,}5\times10^9$ до 25×10^9 полос на м^2, рис.4*а*.



(а) (б)

Рис. 3. График зависимости длины (рис. а) и ширины (рис. б) грубых полос скольжения от количества циклов нагружения.

Зависимость среднего значения микропластических деформаций вдоль и поперек проката $\varepsilon_{ср} = (\bar{\varepsilon}_x + \bar{\varepsilon}_y)/2$ от доли площади, занимаемой ГПС, отнесенной к общей площади исследования представлен на рис.4(б).



(а) (б)

Рис.4. Зависимости: а - концентрации грубых ПС от количества циклов нагружения; б - величины микропластической деформации от площади грубых ПС.

Из графиков приведенных на рис. 2*б* видно, что на начальном этапе нагружения происходит наиболее интенсивное развитие микропластических деформаций, а затем её замедление и стабилизация на уровне 7%. Стабилизацию микропластической деформации можно объяснить появлением микропор, микротрещин в полосах скольжения, способствующих релаксации микронапряжений в очагах микропластической деформации. Для амплитуд нагружения 275 – 336 МПа стабилизация значения микропластических деформаций происходила в диапазоне 30-50 тысяч циклов.

Получены зависимости величины микропластических деформации ε_x и ε_y от концентрации ГПС (рис.5) из которых видно, что произошло разделение кривых в соответствии с амплитудами нагружения.

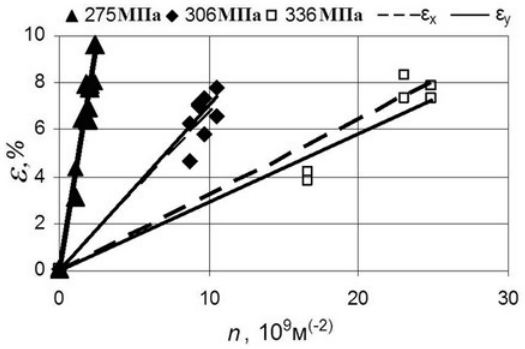


Рис.5. Зависимость величины микропластических деформаций от концентрации грубых полос скольжения.

Связь $\varepsilon_{x,y}(n)$ хорошо аппроксимируется линейной зависимостью. Зависимость тангенса угла наклона Q этих кривых с числом циклов нагружения N^* соответствующих моменту образования макротрещины приведена на рис. 6а.

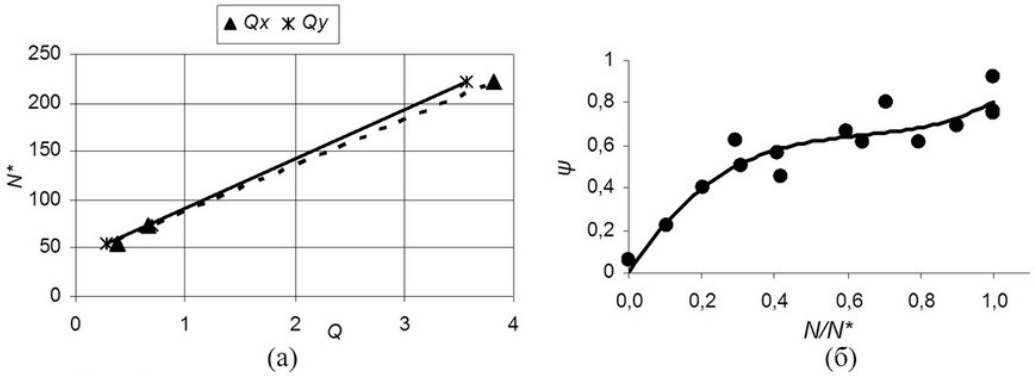
Связь поврежденности ψ рассчитанной с помощью формулы Пальмгрена [6] ($\psi = N / N^*$) с концентрацией полос скольжения и величиной $\overline{Q} = (Q_x + Q_y)/2$ определялась в виде ряда ограниченного членами второго порядка:

$$\psi = k_{0\Psi} + k_{1\Psi}\overline{Q} + k_{2\Psi}n + k_{3\Psi}n\overline{Q} + k_{4\Psi}\overline{Q}^2 + k_{5\Psi}n^2, \quad (1)$$

где $k_{i\Psi}$ - коэффициенты.

Значение коэффициентов $k_{i\Psi}$ рассчитанных с помощью нелинейной множественной регрессии: $k_{0\Psi} = -0{,}203$, $k_{1\Psi} = 0{,}476$, $k_{2\Psi} = -0{,}026$, $k_{3\Psi} = 0{,}118$, $k_{2\Psi} = -0{,}132$, $k_{2\Psi} = 0{,}001$.

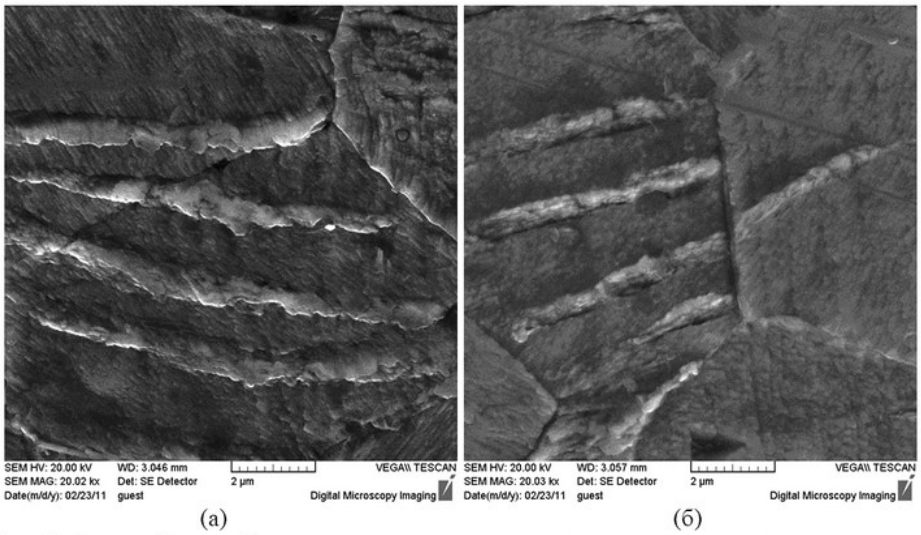
Наблюдается высокая корреляция (коэффициент корреляции более 0,9) между расчетными значениями ψ и относительным количеством циклов нагружения $N/N*$ полученных по данным механических испытаний. Наличие высокой корреляции дает возможность с помощью оптических измерений используя в качестве диагностических параметров интенсивность изменения микропл1астической деформации и концентрацию полос скольжения оценить величину поврежденности материала. Корреляционное поле значений ψ рассчитанных с помощью выражения (1) и значений $N/N*$ полученных по данным механических испытаний приведены на рис. 6*б*



(а) (б)

Рис. 6. а - зависимость критического значения количества циклов нагружения от параметра *Q*, *б* – корреляционное поле значений ψ и значений $N/N*$ полученных по данным механических испытаний.

Детальный анализ с помощью сканирующего электронного микроскопа VEGA II LSU показал, что грубые полосы скольжения в исследуемой стали, являются источниками образования микротрещин как внутри зерна, так и на границе зерен. Отмечено, что в местах выхода ГПС (рис.7а,б) на границу зёрен обнаруживаются микротрещины. Микротрещины образуются также вдоль границы ГПС (рис.12б). Снижение интенсивности изменения микропластических деформаций можно объяснить разгрузкой очагов микропластических деформаций при появлении микротрещин.



(а) (б)

Рис. 7. Фотографии грубых полос скольжения, полученные на растровом электронном микроскопе.

Можно сказать, что локализация пластической деформации в грубых полосах скольжения (ГПС) приводит к перераспределению микропластических деформаций на уровне зерна. Появление ГПС и изменение интенсивности деформаций зерен, определяемой по изменению их формы, является процессом взаимосвязанным.

4. Заключение. Получено, что развитие микропластических деформаций характеризуется двумя участками. На начальном этапе нагружения наблюдается наиболее интенсивное развитие микропластических деформаций, а затем её замедление и стабилизация по мере исчерпания ресурса материала. Стабилизацию микропластической деформации на уровне зерна можно объяснить локализацией деформации в полосах скольжения и появлением микропор, микротрещин, способствующих релаксации микронапряжений в очагах микропластической деформации. Получена высокая корреляционная связь близкая к линейной, между концентрацией грубых полос скольжения и величиной микропластической деформации при различных значениях амплитуды нагружения (от 275 до 336 МПа). Предлагается использовать интенсивность изменения микропластической деформации и концентрацию полос скольжения в качестве диагностических параметров для прогнозирования текущего и критического значения количества циклов нагружения соответствующего появлению макротрещины.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 09-08-00892, грант 11-08-97070 и грант 09-08-00827).

Литература

1. Гурьев А.В., Карпов А.П. Роль микропластических деформаций в формировании частотной зависимости // Проблемы прочности. — 1986. — № 4 — С.24–27.
2. Вайнштейн А. А. Развитие пластических микродеформаций при упругих макродеформациях// Проблемы прочности. — 1985. — № 7 — С.90–92.
3. Mughrabi H. Cyclic Slip Irreversibilities and the Evolution of Fatigue Damage// Metallurgical and Materials Transactions A. — 2009. — V. 40A, № 7 — P.1257–1279.
4. Терентьев В. Ф. Усталость металлических материалов: научное издание. — М.: Наука, 2003. — С.254.: ил.
5. Использование оптического и акустического методов контроля для оценки поврежденности сталей на ранних стадиях усталостного разрушения/ Ф.М. Митенков, В.В. Мишакин, С.Н. Пичков, В.А. Клюшников, Н.В. Данилова// Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2009. № 12 — С.40-45.
6. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение: Пер. с англ. — М.: Мир,1984.-624с.