УДК 620.178.539.43

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ И ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ В ПРОЦЕССЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ И ИХ ВЗАИМОСВЯЗЬ С ПОКАЗАТЕЛЯМИ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ

Ромашев М.А.

ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, e-mail: basmiho@gmail.com

Рассмотрены изменения структуры и повреждаемости поверхности стали 30ХГСН2А в процессе циклического нагружения по схемам консольного изгиба вращающихся образцов и плоского поперечного изгиба. Выявлена зависимость наклона левой ветви кривой усталости и повреждаемости материала поверхностных слоев образца.

Ключевые слова: повреждаемость поверхности, сопротивление усталости, прочность, долговечность, предел выносливости, частота циклического нагружения, масштабный эффект.

CHANGES IN THE STRUCTURE AND DAMAGING THE SURFACE OF THE STEEL DURING CYCLIC LOADING AND THEIR RELATIONSHIP WITH INDICATORS OF FATIGUE RESISTANCE

Romashev M.A.

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhniy Novgorod, e-mail: basmiho@gmail.com

The changes in the structure and of damage to the steel surface 30HGSN2A during cyclic loading schemes cantilever bending and rotating samples flat lateral bending. The dependence of the slope of the left branch of the curve of fatigue and material damage of the surface layers of the sample.

Keywords: surface damaging, fatigue resistance, strength, durability, endurance limit, frequency of loading cycles, scale effect.

Циклические нагрузки, изменяющиеся по величине и напряжению, при которых работают некоторые детали машин и конструкций, заметно снижают прочность и долговечность, так как при повторно-переменном напряжении металл разрушается от усталости. Характерной особенностью такого разрушения является тот факт, что разрушение происходит при напряжениях меньших предела прочности, текучести и упругости. В металлах и сплавах появляются микротрещины, которые постепенно развиваются и приводят к разрушению деталей [1-13].

Известно, что на сопротивление разрушению металлов и сплавов при циклическом нагружении оказывает влияние большое количество факторов: природа металла, температура, масштабный эффект, концентрация напряжений, асимметрия циклического нагружения, частота циклов и др. [8,12,14-19].

Целью работы является изучение изменения структуры и повреждаемости поверхности стали 30ХГСН2А в процессе различных видов циклического нагружения, и определение закономерностей изменения показателей сопротивления усталости в зависимости от влияния частоты циклического нагружения и масштабного эффекта.

Неоднозначное влияние фактора ω и масштабного эффекта было рассмотрено в ряде работ [14÷20]. Изменение частоты циклических напряжений приводит к изменению скорости деформации, а при нагружении образца сначала деформируется его поверхностный слой [21-22]. Деформация поверхностного слоя именуется поверхностными эффектами. Поверхностные эффекты есть следствие физических процессов, происходящих в слое с аномальными свойствами. В представленной работе основное внимание уделено исследованию изменений микро и субмикроструктур в процессе циклического нагружения.

В настоящее время механическое оборудование работает в широком диапазоне напряжений и долговечности от области малоциклового нагружения до базового числа циклов усталости. Фиксированная величина, предел выносливости не соответствует надежной оценке сопротивления усталости деталей машин и конструкций. Чтобы указанная оценка была более надежной, должны фигурировать две величины: напряжение (ограниченный предел выносливости σ) и долговечность (количество циклов до разрушения N). Тогда следует ввести показатель, выражаемый отношением приращe-

ния напряжения dσ к приращению долговечности dN. Таким образом, получаем тангенс угла наклона касательной к кривой усталости и соответственно к оси N. Сравнение поведения разных металлов по тангенсу угла наклона, записанному в виде отношения dσ/dN является сложным, так как в каждый последующий момент описанная функция насыщается. Таким образом, обычные координаты σ – N не являются удобными. Удобными координатами являются логарифмические. Они удобны тем, что кривые усталости, в сущности, превращаются в прямые.

$$tg\alpha_w = \frac{d\lg\sigma}{d\lg N}$$

представляет собой постоянную величину, что позволяет проводить обобщения широкой гаммы материалов и условий их испытания. Наклон tg α_w зависит от ряда различных факторов. Факторы, определяющие природу усталости, так или иначе влияют на положение кривой в координатах lg σ – lg N, поэтому наклон tg α_w может выступать как характеристика, отображающая физические явления, происходящие в образцах (деталях), а точнее, в их поверхностных слоях, которые имеют свойства, отличные от свойств глубинных слоев материала [14÷20].

В материале этих слоев при деформации деталей происходят физические процессы повреждаемости. Проблема оценки прочности и долговечности деталей машин и конструкций по повреждению материала поверхностных слоев, в настоящее время особенно актуальна, т.к. увеличилось количество катастроф, аварий и т. п. связанных с усталостным разрушением используемых материалов.

Повреждение поверхности оценивается по изменению микроструктуры материала под действием циклических напряжений [23-27]. В качестве оценочной характеристики служат полосы скольжения, возникающие на шлифе образца, изготовленного в зоне наибольших напряжений [28-30]. Для исследований были изготовлены образцы небольшого диаметра (5 и 10 мм) и плоские (3х3 мм) с десятикратной длиной. Испытания образцов обрабатывались методом математической статистики с построением «спрямленных» кривых усталости по уравнению:

$$\lg\sigma = (\lg\sigma)_0 - tg\,\alpha_w \lg N$$

при удовлетворительном коэффициенте корреляции ($K_{кор}$).

Наряду с параметром сопротивления усталости tg α_w, речь идет и о повреждаемости поверхности, оценочным показателем которой являются полосы скольжения [31-35]. Сталь марки 30ХГСН2А является одним из лучших материалов в смысле показателя сопротивления усталости и повреждаемости поверхности. Для этой стали в закаленном состоянии tg α_w = 0,08723 при испытании плоских образцов; tg α_w = 0,1299 и tg α_w = 0,09257 при вращении круглых изогнутых образцов диаметром 10 мм (рис. 1). Вид испытания мало сказался на величине показателя сопротивления усталости. Отжиг тех же круглых образцов привел к небольшому ухудшению показателя tg α_w и к более значительному уменьшению абсолютного значения предела усталости на базе, превышающей 10^6 циклов (рис. 1). Увеличение абсолютных размеров образцов приводит к ухудшению показателя сопротивления усталости (рис. 2). Микроструктуры стали после испытаний представлены на рис. 3 и 4.

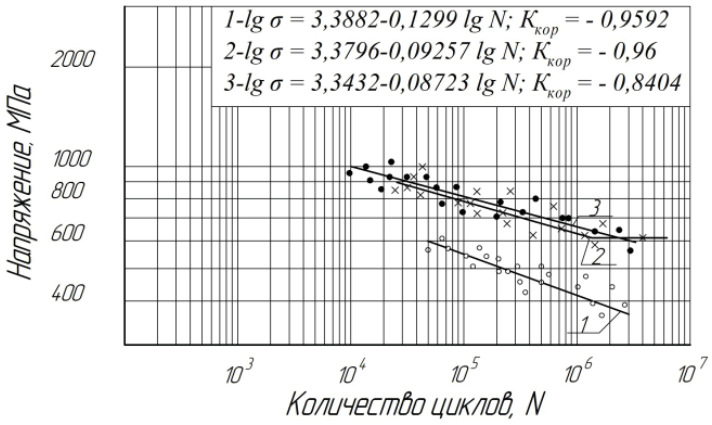

Рис. 1. Кривые усталости стали 30ХГСН2А при температуре 20°С:
1,2 – деформация изгиба вращающихся круглых образцов диаметром 10 мм, ω = 50 Гц (1 – образцы отожжены); 3 – деформация поперечного изгиба плоских образцов сечением 3х3 мм, ω = 3,33 Гц (закаленные образцы)

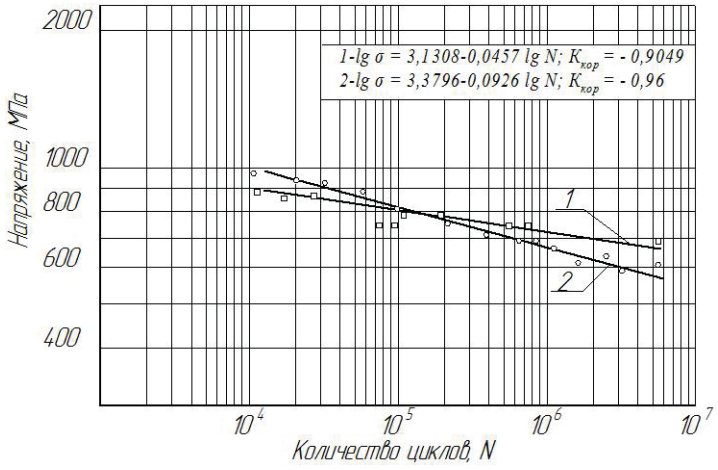

Рис. 2. Кривые усталости закаленной стали марки 30ХГСН2А при температуре 20°С: 1, 2 – образцы диаметром 5 и 10 мм соответственно

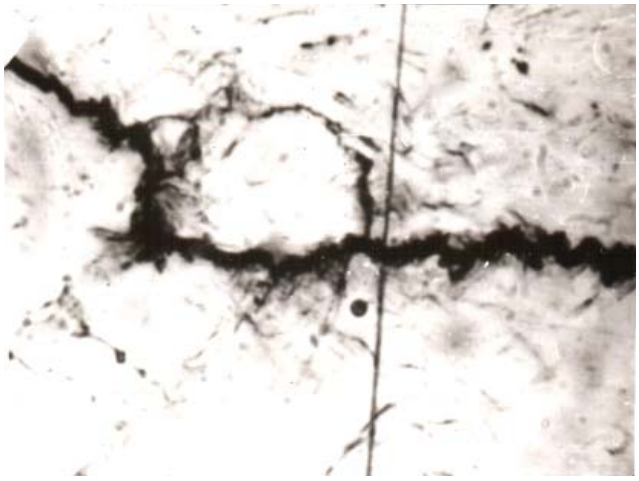

Рис. 3. Микроструктура закаленной стали 30ХГСН2А после циклического плоского изгиба образца сечением 3х3 при температуре 20°С; (х 416); ω = 3,33 Гц; σ = 930 МПа; N = 1500 циклов. Образец не разрушен

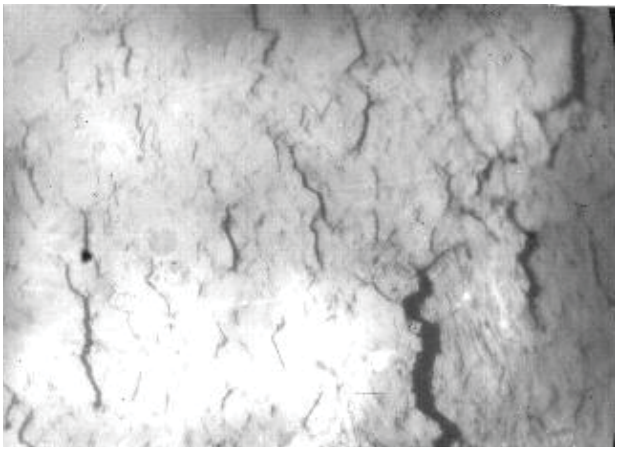

Рис. 4. Повреждение поверхности закаленной стали 30ХГСН2А после плоского изгиба образца сечением 3х3 при температуре 20°С; (х 340); ω = 3,33 Гц; σ = 980 МПа; N = 1,3·10⁴ циклов (полная наработка). Шлиф не травлен

Выводы

У стали 30ХГСН2А выявлена закономерность соответствия показателя сопротивления усталости и повреждаемости материала поверхностных слоев образца. Соблюдается правило: чем больше повреждаемость, тем хуже сопротивляется материал усталости (больше tg α_w). Зависимость tg $\alpha_w = f(\Phi)$ не прямолинейная.

Список литературы

1. Иванова В.С. Разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1979.

2. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Структура и усталостное разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1975.

3. Mylnikov V.V., Shetulov D.I., Chernyshov E.A. Influence of the heat treatment of 03H18K9M5T-ЭЛ E{cyrillic} L{cyrillic} steel on its microplastic and cyclic deformation // Steel in Translation. – 2013. – T. 43, № 11. – C. 695-697.

4. Терентьев В.Ф. Усталостная прочность металлов и сплавов. – М.: Интермет инжиниринг, 2002.

5. Mylnikov V.V., Rozhkov I.I., Shetulov D.I. Damage to the surface of rare-earth metals und er cyclic loading with changes in cycle frequency // Modern scientific research and their practical application. – 2013. – Vol. J11307. – № 4. – pp. 206-213.

6. Анализ аварийных разрушений / А.Дж. Мак-Ивили; пер. с анг. Э.М. Лазарева, И.Ю. Шкадиной; под. ред. Л.Р. Ботвиной. – М.: Техносфера, 2010.

7. Готтштайн Г. Физико-химические основы материаловедения / пер. с англ. К.Н. Золотовой, Д.О. Чаркина; под. ред. В.П. Зломанова. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011.

8. Мыльников В.В., Чернышов Е.А., Шетулов Д.И. Прогнозирование циклической прочности и долговечности конструкционных материалов. – М.: Издательство “Спутник+”, 2013.

9. Механика разрушения и прочность материалов: справ. пособ. / под. ред. В.В. Панасюка. – Т. 4. Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / О.Н. Романив, С.Я. Яремы, Г.Н. Никифорчин и др. – Киев: Наукова думка, 1990.

10. R.W.K. Honeycombe. The Plastic Deformation of Metals. – London: Edward Arnold Ltd., 1984.

11. Shetulov D.., Myl’nikov V.V. Fatigue Induced Damage of High Strength Steels // Russian Metallurgy. – 2014. – № 3. – pp. 241–245.

12. Трощенко В.Т. Прочность металлов при переменных нагрузках. – Киев: Наук. думка, 1978.

13. Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов. – М.: Металлургия, 1984.

14. Мыльников В.В., Чернышов Е.А., Шетулов Д.И. Влияние частоты циклического нагружения на сопротивление усталости высокопрочных конструкционных материалов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2009. – №2. – С. 33-36.

15. Мыльников В.В. Частота циклического нагружения как фактор влияющий на изменение прочности и долговечности конструкционных материалов // Сборник материалов VIII Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов». – М: ИМЕТ РАН, 2011. – С. 87-88.

16. Myl’nikov V.V., Shetulov D.I., Chernyshov E.A. Variation in faktors of fatigue resistance for som pure metals as a function of the freguensy of loading sycles // Russian Journal of Nonferrous metals. – 2010. – Vol. 51. – № 3. – pp. 237–242.

17. Мыльников В.В., Чернышов Е.А., Шетулов Д.И. Влияние фактора частоты циклического нагружения на изменение повреждаемости поверхности и наклона кривой усталости при деформации изгиба вращающихся образцов // Сборник материалов IV Международной конференции «Deformation and Fracture of Materials and Nanomaterials». – М.: ИМЕТ РАН, 2011. – С. 984-985.

18. Мыльников В.В., Чернышов Е.А., Шетулов Д.И. Влияние частоты циклического нагружения на суммарную пластическую деформацию конструкционных материалов // Международный журнал экспериментального образования. – 2013. – №10 (часть 2). – С. 380-381.

19. Мыльников В.В. Анализ влияния частоты циклов нагружения на суммарную пластическую деформацию металлических материалов / В.В. Мыльников, Д.И. Шетулов, И.И. Рожков, А.И. Пронин // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2013. – №10 (часть 2). – С. 228.

20. Mylnikov V.V. Accelerated metod to forcast the parameters of metal materials fatigue resistance with consideration of repeated loading frequency // International Journal Of Applied And Fundamental Research. – 2013. – № 2 –www.science-sd.com/455-24311.

21. Мыльников В.В., Шетулов Д.И., Чернышов Е.А. Температурно-скоростные зависимости сопротивления деформации некоторых чистых металлов // Литейные процессы. – 2012. – №11. – С.124-132.

22. Шетулов Д.И. К оценке сопротивления усталости материалов по повреждению поверхностных аномальных слоев // Физико-химическая механика материалов. – 1984. – № 6. – С. 117.

23. Шетулов Д.И. Связь сопротивления циклической нагрузке с повреждаемостью поверхности металлов // Известия Академии Наук. Металлы. – 1991. – №5. – С. 160.

24. Мыльников В.В., Шетулов Д.И., Чернышов Е.А. Исследование повреждаемости поверхности чистых металлов с учетом частоты циклического нагружения // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2013. – №2. – С. 55-60.

25. Мыльников В.В., Рожков И.И., Шетулов Д.И. Повреждение поверхности редкоземельных металлов в условиях циклического нагружения при изменении частоты циклов // Сборник научных трудов Sworld. – 2012. – Т. 9, № 4. – С. 69-76.

26. Мыльников В.В., Шетулов Д.И., Рожков И.И. Повреждаемость поверхностных слоев стали 30ХГСН2А в условиях циклического нагружения // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2013. – №10 (часть 2). – С. 244.

27. Мыльников В.В. Связь коэффициента формы повреждений с показателями сопротивления усталости стали 30ХГСН2А / В.В. Мыльников, Д.И. Шетулов, А.И. Пронин, И.И. Рожков // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2013. – №10 (часть 2). – С. 229.

28. Мыльников В.В., Шетулов Д.И., Чернышов Е.А. Об оценочных критериях долговечности углеродистых сталей // Технология металлов. – 2010. – № 2. – С. 19-22.

29. Мыльников В.В., Чернышов Е.А., Шетулов Д.И. Разработка оценочных критериев прочности и долговечности конструкционных сталей в условиях циклической нагрузки // Труды Межрегиональной научно-практической конференции «Заготовительные производства и материаловедение» посвященной 100-летию профессора А.А. Рыжикова, НГТУ. – Н.Новгород, 2009. – С. 90-96.

30. Myl’nikov V.V., Shetulov D.I., Chernyshov E.A. Investigation into the Surface Damage of Pure Metals Allowing for the Cyclic Loading Frequency // Russian Journal of Non Ferrous Metals. – 2013. – Vol. 54. – № 3. – pp. 229–233.

31. Мыльников В.В., Чернышов Е.А., Шетулов Д.И. Изменения показателей сопротивления усталости некоторых чистых металлов в зависимости от влияния частоты циклов нагружения // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2010. – №3. – С. 40-45.

32. Мыльников В.В., Шетулов Д.И., Пронин А.И., Чернышов Е.А. Прогнозирование прочности и долговечности материалов деталей машин и конструкций с учетом частоты циклического нагружения // Известия вузов. Черная металлургия. – 2012. – №9. – С. 32-37.

33. Мыльников В.В. Связь параметра сопротивления усталости с повреждаемостью поверхности стали 30ХГСН2А // Сборник трудов SWorld. – 2012. – Вып. 3. – Т. 10. – Одесса. – С.56-62.

34. Мыльников В.В., Чернышов Е.А., Шетулов Д.И. Связь параметров сопротивления усталости ряда конструкционных материалов с изменением частоты циклического нагружения // Заготовительные производства в машиностроении. – 2012. – №7. – С. 41-45.

35. Мыльников В.В. Зависимость сопротивления усталости конструкционных материалов от частоты циклического нагружения / В.В. Мыльников, Д.И. Шетулов, Е.А. Чернышов, А.И. Пронин // Технология металлов. – 2013. – № 9. – С. 30-38.