

УЧЕТ ГИГАЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ СТАЛЕЙ ПРИ ОЦЕНКЕ СРОКА СЛУЖБЫ ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ТЕХНИКИ

Виявлене останнім часом явище гігациклової втомлюваності, пов'язане з руйнуванням матеріалів при навантаженнях, менших за межу витривалості та при більш ніж 10^8 циклах навантаження, безпосередньо стосується безпеки руху. Для оцінки остаточного ресурсу та прийняття рішення щодо подовження терміну служби відповідальних деталей рухомого складу необхідним є проведення випробувань з визначення міцності сталей, що застосовуються в області високих циклів навантаження.

Обнаруженное в последнее время явление гигацикловой усталости, связанное с разрушением материалов при нагрузках меньших предела выносливости и при более чем 10^8 циклах нагружения, напрямую касается безопасности движения. Для оценки остаточного ресурса и принятия решения о продлении срока службы ответственных деталей экипажной части подвижного состава необходимо проведение испытания по определению прочностных свойств применяемых сталей в области высоких циклов нагружения.

The phenomenon found out recently gigacycle fatigue, connected with destruction of materials at loadings of a smaller limit of endurance and at more than 10^8 cycles regime, directly concerns traffic safety. For an estimation of a residual resource and decision-making on prolongation of service life of responsible vehicle details carrying out of test on determination mechanical properties applied steels in the field of high cycle's regime is necessary.

Явление гигацикловой усталости, обнаруженное в конце прошлого века, заключается в усталостном разрушении материалов от воздействия нагрузок, меньших предела выносливости материала, при количестве циклов нагружения большем базового. За базу испытаний на усталость обычно принимается $10^7 \dots 10^8$ циклов [1].

Проблема разрушения при ультравысоком числе циклов была сформулирована в трудах первой (1998 г., Франция), а затем и второй (2001 г., Австрия) конференции по гигацикловой усталости. Основные работы в этом направлении ведутся зарубежными исследователями, например [2-4]. В нашей стране этой проблеме уделяют внимание ученые ИМАШ РАН и ИМЕТ РАН [5-8].

Как было обнаружено, кривая усталости имеет ступеньку (разрыв) в области обычного предела выносливости (рис. 1) [9].

В работах [10, 11] приведены результаты исследований, показывающие существенное снижение предела выносливости различных конструкционных материалов при изменении базы испытаний с 10^6 до 10^9 циклов. Так, например для мартенситной нержавеющей стали снижение составляет 20...200 МПа, для подшипниковой – 100 МПа, для пружинной – 150...200 МПа. В работе [12] имеются данные о снижении предела выносливости сталей 45 и

У10А при увеличении количества циклов нагружения с 10^6 до 10^9 циклов на 20 % (рис. 2).

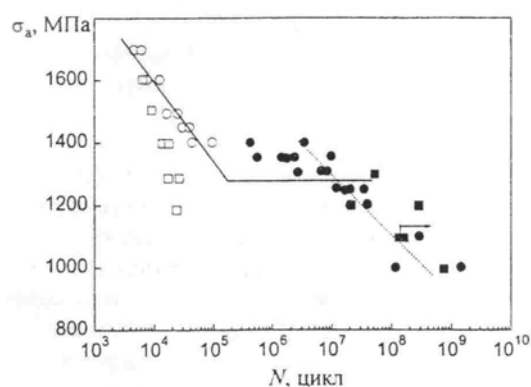


Рис. 1. Циклическая прочность высокоуглеродистой хромистой подшипниковой стали SUJ2 (1,01 C; 0,23 Si; 0,36 Mn; 1,45 Cr; 0,012 P; 0,007 S, вес. %): светлые точки – зарождение трещины на поверхности, темные – под поверхностью образца

В то же время концепция предела усталости, служащая в настоящее время основой для нормативной документации, базируется на гипотезе существования предела выносливости – горизонтальной асимптоты на кривой усталости (по крайней мере, для металлов с кубической объемноцентрированной решеткой), т. е. при нагружении нагрузками меньшими предела выносливости материал будет иметь неограниченную долговечность.

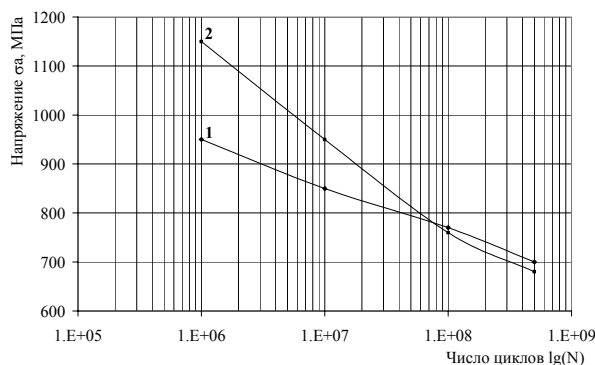


Рис. 2. Кривые усталости стали У10А [12]:
 1 – закалка 780 °С, охлаждение в масле до 160 °С,
 2 – с дополнительным отпуском при 180°С в теч. 1,5 ч

Таким образом, существующая концепция не является строгой и ее следует применять лишь в качестве удобного упрощения при достаточном обосновании с экономической точки зрения с учетом требований безопасности.

Интерес к гигацикловой усталости связан с тем, что при увеличении срока службы ответственных деталей и конструкций повышается вероятность их выхода из строя, что может привести к авариям и катастрофам. Согласно [13] аварийные сходы с рельс высокоскоростных поездов с Германии и Англии были связаны с накоплением в колесе 10^9 циклов нагружения, из-за неровной поверхности рельса. Особую актуальность этот вопрос имеет для стран СНГ, где в последнее время существуют объективные трудности по обновлению парка железнодорожной техники. В железнодорожной отрасли наиболее важные детали экипажной части подвижного состава (колесная пара и рама тележки) за срок эксплуатации могут подвергаться количеству циклов нагружения, превышающему базовые 10^7 . Поэтому увеличение ресурса элементов конструкций, подвергающихся в процессе эксплуатации воздействию циклических нагрузок, приводит к необходимости проведения исследований сопротивления усталости конструкционных материалов на больших базах нагружения с учетом влияния конструкционных и эксплуатационных факторов.

Испытания на гигацикловую усталость весьма дороги, трудоемки и требуют значительных временных затрат. Для деталей и элементов конструкций проводить такие испытания экономически затруднительно. В то же время при конструировании и расчете деталей машин актуально обеспечение безопасной работы именно в области, превышающей 10^8 циклов, из чего следует необходимость проведения исследований характеристик сопротивления усталости материалов в данной области с целью

обоснования уровня допустимых напряжений.

Циклическое нагружение при амплитуде напряжений незначительно превышающих физический предел выносливости приводит к перемещению дислокаций с образованием ячеистой структуры в поверхностном слое образца (детали). Учитывая, что в поверхностном слое зерен пластическая деформация облегчена по сравнению с внутренним (дислокации и вакансии имеют выход на поверхность металла, напряжение работы источников Франка-Рида снижается) повреждение металла начинается с образованием устойчивых полос скольжения, интрузий и экструзий [14].

При поверхностном упрочнении образцов путем наклепа, нагартовки, накатки, химико-термической обработки (азотирования, цементации), нанесения более прочных, чем основной металл, покрытий и т. д. зарождение трещин на поверхности затрудняется, и очаг разрушения возникает на некотором расстоянии вглубь образца. Примерами осуществления такого механизма разрушения служат подповерхностные трещины в рельсах, выщербины в бандажах, повреждения азотированных коленвалов, прокатных валков.

Смена расположения очага трещины является основной особенностью гигациклового разрушения, отмечаемой большинством исследователей. Трещина при гигацикловой усталости возникает, как правило, на границе основного металла и неметаллического включения [15]. Согласно [11] в диапазоне $10^7 \dots 10^9$ циклов нагружения более чем в 99 % случаев очаг разрушения находится под поверхностью. В стали 54SiCr6 (аналог 55C2A) подповерхностное разрушение происходит при наличии неметаллических включений, больших 1 мкм [10]. Помимо неметаллических включений, большую роль в разрушении при гигацикловой усталости имеет наличие остаточного водорода, приводящего к охрупчиванию зоны вокруг неметаллического включения и образованию очага подповерхностного разрушения – так называемого «рыбьего глаза» [16].

Остаточные напряжения возникают вокруг подповерхностных включений при термической обработке и воздействии циклических нагрузок из-за концентрации напряжений. Максимальные напряжения возникают у алюминатов кальция, окиси алюминия и шпинельных включений. Оксидные включения, покрытые сульфидами марганца или кальция, являются более вредными, чем чистые оксиды [17]. Влияние неметаллических включений на уста-

лостную прочность материалов при гигацикловой усталости достаточно подробно представлено в [16].

Одним из этапов учета влияния гигацикловой усталости на прочность деталей является теоретическое обоснование и дальнейшее экспериментальное подтверждение критического размера неметаллических включений и содержания остаточного водорода.

Существует много гипотез, объясняющих наличие на кривой усталости переломов и разрывов [6, 8], из них основными являются следующие:

- достижение циклического предела текучести;
- неоднородное распределение пластической деформации по сечению образца, вызывающее пластическое течение его поверхностного слоя;
- влияние среды, в частности водородное охрупчивание.

Несмотря на обилие гипотез, достаточно хорошего количественного описания процесса разрушения при гигацикловой усталости пока не имеется. Рассмотрим некоторые основные зависимости позволяющие оценить долговечность материалов в области гигацикловой усталости. Наибольший перечень уравнений кривых усталости представлен в [12].

Согласно [18] кривая усталости имеет горизонтальный участок и записывается в виде:

$$\begin{cases} \sigma^m N = \sigma_R^m N_G, & \text{при } \sigma > \sigma_R; \\ N = \infty & \text{при } \sigma \leq \sigma_R. \end{cases} \quad (1)$$

где N – суммарное количество циклов за срок работы;

N_G – количество циклов, соответствующее пределу выносливости;

σ – действующее номинальное напряжение;

σ_R – предел выносливости;

m – показатель наклона кривой усталости.

Уравнение (1) описывает кривую усталости с горизонтальным участком, соответствующим пределу выносливости. На рис. 3 уравнению (1) соответствует кривая ABC.

Кривая усталости ADE на рис. 3 имеет при больших количествах циклов горизонтальную асимптоту, характеризующуюся порогом чувствительности, который в первом приближении равен половине предела выносливости [7]. В этом случае кривая усталости описывается уравнением

$$m \cdot \lg(\sigma - 0,5\sigma_R) + \lg N = C. \quad (2)$$

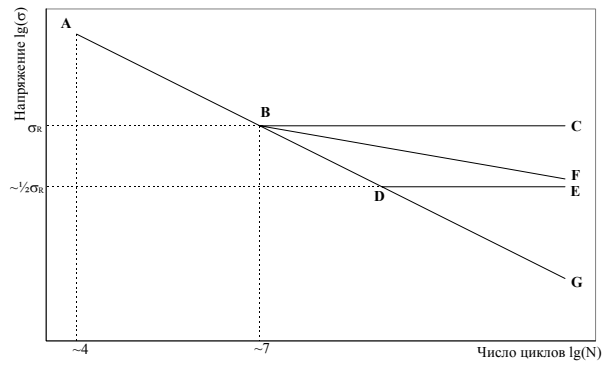


Рис. 3. Кривые усталости материала в двойных логарифмических координатах

Кривая ABF на рис. 3 имеет лишь перелом согласно гипотезе Хайбаха [7] с уравнением кривой усталости:

$$\begin{cases} \lg N = C_1 - m_1 \cdot \lg(\sigma), & \sigma < \sigma_R; \\ \lg N = C_2 - m_2 \cdot \lg(\sigma), & \sigma > \sigma_R. \end{cases} \quad (3)$$

В общем случае, на кривой усталости, описываемой уравнением

$$\lg N = C - m \cdot \lg(\sigma), \quad (4)$$

отсутствуют и горизонтальный участок, и перелом. Уравнению (4) на рис. 3 соответствует кривая ABDG.

Согласно расчетам [7] наибольшее совпадение с экспериментальными данными дают уравнения (2) и (4); результат использования уравнения (3) укладывается в 80 %-й доверительный интервал; кривая усталости (1) приводит к плохо сопоставимому с экспериментом результату.

Уравнение (3) в работах [19, 20] рекомендуется для расчета долговечности осей колесных пар, причем m_2 принимается равным $(2m_1 - 2)$ для прессовой посадки и $(2m_1 - 1)$ для остальных зон.

Расчет долговечностей производится с применением различных гипотез. Наибольшее распространение за свою простоту в использовании получила гипотеза линейного суммирования повреждений, именно она рекомендована нормативной документацией [21]:

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1. \quad (5)$$

Наиболее лучшую сходимость с экспериментом имеет гипотеза Пальмгрена-Майнера [19, 20] (рис. 4), в соответствии с которой можно получить выражение [22, 23]:

$$\frac{N}{N_G} = \frac{1}{n_p^m \sum \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_{\max}} \right)^m p_i}, \quad (6)$$

где N_G – количество циклов, соответствующее перелому кривой усталости;

$\frac{\sigma_i}{\sigma_{\max}}$ – амплитуды напряжений в относительных единицах;

p_i – вероятность появления амплитуды σ_i ;

n_p – коэффициент перегрузки.



Рис. 4. Схема оценки срока службы

Основным недостатком линейной гипотезы суммирования повреждений является невозможность учета истории нагружения. Многочисленные данные, полученные в соответствии с гипотезой Палмгрена–Майнера, показывают существенные отклонения от единицы накопленной повреждаемости в момент разрыва образцов (5), как в меньшую, так и в большую сторону. Так, для большинства конструкционных материалов эта величина находится в пределах 0,5...2 [12, 19, 20] и зависит от статистического разброса опытных данных и ширины доверительного интервала оценки величины накопленных повреждений. В некоторых модификациях линейной гипотезы есть возможность некоторого учета влияния на повреждаемость истории нагружения и наследственных свойств [24].

В настоящее время вместо вероятностных методов оценки ресурса, основанного на статистике отказов, все большее значение приобретает тенденция оценки индивидуального ресурса оборудования на основе комплексного подхода, сочетающего результаты разрушающего и неразрушающих методов контроля с проверочными расчетами на прочность, например, расчетно-экспериментальный метод [25, 26].

Влияние гигацикловой усталости на долговечность реальных железнодорожных конст-

рукций сопряжено с учетом:

- сложной геометрии детали и связанной с ней местной концентрации напряжений,
- неопределенности реального блока нагружений,

- величины имеющихся полей остаточных напряжений,

- изменения физических свойств металла в процессе эксплуатации.

Иллюстрацией такой работы является оценка усталостной прочности рам тележек скоростного электропоезда ЭР-200.

Исходя из данных, указанных в паспортах тележек, было рассчитано число циклов нагружения, которым подверглись рамы тележки электропоезда. Так, на момент проведения в ТЧ-10 ТР-2 в феврале 2006 г. пробег тележки вагона № 105 составил 1294888 км, тележки вагона № 107 – 1372980 км. Зная частоту галопирования рамы тележки (по данным ВНИИЖТ и ВНИКТИ – порядка 7 Гц) определили количество циклов нагружения, которое составило более $2 \cdot 10^8$ циклов нагружения.

Результаты исследования состояния тележек вагонов № 105 и 107, проведенного в период с 19 по 21 апреля 2007 года в процессе капитального ремонта (КР-2) показали наличие большого количества дефектов сварки и трещин. При этом в одной из боковин рамы тележки были обнаружены продольные трещины в основном металле, которые полностью не удалось удалить зачисткой на глубину до 1 мм.

Рамы тележек были изготовлены на Рижском вагоностроительном заводе, после сварки был выполнен высокотемпературный отпуск для снятия термических напряжений. При последующих ремонтах (ТР-2, ТР-3 выполненных в депо и КР-1, КР-2 выполненных на ОЭВРЗ) снятие остаточных напряжений не проводилось.

Результаты исследований остаточных напряжений в рамах тележек, проведенное специалистами ИМАШ АН РФ, показали, что остаточные напряжения в зоне ремонтных сварных швов достигают значительных величин, сопоставимых с пределом текучести. Остаточные напряжения в швах, выполненных на Рижском заводе при изготовлении рам, составляют около 10 МПа, что соизмеримо с погрешностью измерений. Исследования остаточных напряжений проводилось методом цифровой спекл интерферометрии, основные положения и методика которого представлена в [27].

В заключении можно отметить, что актуальность исследований прочностных свойств

материалов при больших количествах нагружений сложно переоценить. В настоящее время в ОАО «ВНИКТИ» начаты работы по исследованию поведения сталей в области гигацикловой усталости. Были проведены испытания стандартных лабораторных образцов, поставлена на испытания рама тележки электропоезда ЭР-200, совместно с ИМАШ проводятся теоретические изыскания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 25.502-79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость.
2. Bathias C. There is no infinite fatigue life in metallic materials // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. - Vol. 22. - 1999. - № 7.
3. Wang Q. Y. Subsurface crack initiation due to ultra-high cycle fatigue / Q. Y. Wang, G. Baydry, C. Bathias, O. H. Berard // *Advances in Mechanical Behavior. Plasticity and Damage: Proceeding of EUROMAT-2000*. - Elsevier. - Vol. 1. - 2000. - № 2.
4. Marines, X. Bin and C. Bathias. An understanding of very high cycle fatigue of metals // *International Journal of Fatigue*. - Vol. 25. - 2003. - №№ 9-11.
5. Махутов Н. А. Усталость металлов в широком диапазоне числа циклов // *Заводская лаборатория*. - 2004. - № 4.
6. Терентьев В. Ф. Усталостная прочность металлов и сплавов - М.: Интермет инжиниринг, 2002.
7. Петрова И. М. Оценка циклической прочности конструкционных сталей в области длительной долговечности / И. М. Петрова, И. В. Гадолина // *Вестник машиностроения*. - 2005. - № 10.
8. Ботвина Л. Р. Гигацикловая усталость - новая проблема физики и механики разрушения // *Заводская лаборатория*. - 2004. - №4.
9. Ochi Y. In: *Proceedings of the Internat. / Y. Ochi, T. Matsumura, K. Masaki, S. Yoshida // Conf. on Fatigue in Very High Cycle Regime*, - Vienna, Austria. 2001.
10. Zhang J. M. Influence of inclusion size on fatigue behavior of high strength steels in the gigacycle fatigue regime / J. M. Zhang and others // *Internat. Journal of Fatigue*. - 2006.
11. Wang Q. Y. Effect of inclusions on subsurface crack initiation and gigacycle fatigue strength / Q. Y. Wang, C. Bathias, N. Kowagoishi Q. Chen // *Internat. Journal of Fatigue*. - V. 24. - 2002. - № 12.
12. Трощенко В. Т., Сосновский Л. А. Сопротивление усталости металлов и сплавов: Справочник в 2х ч. - К.: Наук. думка, 1987.
13. Miller K. J. *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* / K. J. Miller, W. J. O'Donnell. - V. 22. - 1999. - № 7.
14. Золоторевский В. С. Механические свойства металлов. - М.: МИСИС, 1998.
15. Матохнюк Л. Е. Сопротивление усталости ма-

- териалов на больших базах нагружения / Л. Е. Матохнюк, А. В. Войналович, Т. Ю. Яковлева. // *Заводская лаборатория*. - 2004. - № 4.
16. Терентьев В. Ф. Зарождение усталостных трещин в высокопрочных сталях при гигацикловой усталости // *Сб. мат. конф. «Деформация и разрушение материалов»* - М.: ИМЕТ им. А. А. Байкова РАН, 2006. - С. 307-310.
 17. Терентьев В.Ф. Усталость высокопрочных сталей // *Деформация и разрушение материалов*. - 2006. - № 8.
 18. ГОСТ 25.504-82. Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости.
 19. Fisher G. Versagen von Radsatzwellen und dessen Ursachen / G. Fisher, V. Grubisic // *ZEVrail Glasers Annalen*. - vol. 130. - 2006. - № 3.
 20. Fisher G. Betriebfeste Bemessung von Radsatzwellen / G. Fisher, V. Grubisic // *ETR*, - Vol. 55. - № 3. - 2006.
 21. ГОСТ 25.507-85. Методы испытаний на усталость при эксплуатационных режимах нагружения (общие требования).
 22. Когаев В. П. Прочность и износостойкость деталей машин / В. П. Когаев, Ю. Н. Дроздов. - М.: Высш. шк., 1991.
 23. Серенсен С. В. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность / С. В. Серенсен, В. П. Когаев, Р. М. Шнейдерович. - М.: Машиностроение, 1975.
 24. Багмутов В. П. Функциональная схема оценки усталостной долговечности конструкционного материала при нестационарном нагружении / В. П. Багмутов, А. Н. Савкин // *Труды конф. «Деформация и разрушение материалов»*, М.: ИМЕТ им. А. А. Байкова РАН. - 2006. - С. 548-550.
 25. Милешкин М. Б. Новый подход к оценке остаточного ресурса элементов конструкций / М. Б. Милешкин, И. В. Библик. // *Тр. конф. «Деформация и разрушение материалов»*. - М.: ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН. - 2006. - С. 771-773.
 26. Северинова Т. П. Расчетно-теоретическое обоснование живучести боковых рам и надрессорных балок с допустимыми дефектами // *Вестник ВНИИЖТ*. - 2002. - № 5.
 27. Апальков А. А. Исследование остаточных напряжений в элементах конструкций ЯЭУ методом сверлений отверстий и цифровой спекл интерферометрии: Автореф. дис... канд. техн. наук. - М., 2005.

Поступила в редколлегию 24.09.07.