

УДК 629.424.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ВАЛОВ С НЕСОВЕРШЕНСТВАМИ МАТЕРИАЛА**Горобец В.Л., Мямлин С.В., Горобец Е.В.****RESEARCH OF BILLOWS DURABILITY WITH IMPERFECTIONS OF MATERIAL****Horobec V., Myamlin S., Horobec E.**

В статье рассмотрена методология оценки прочности и допускаемых нагрузок валов с несовершенствами материала, передающих крутящий момент. При составлении методик использованы специальные приложения метода сечений, также методы сопротивления материалов и теории разрушения. Предложен принцип создания специальных расчетных моделей для оценки напряженно-деформированного состояния внутреннего сечения, в котором дислоцирован эллиптический трещиноподобный дефект с целью дальнейшей оценки уровня нагрузок, которые не приводят к росту трещины.

Ключевые слова: прочность, вал, несовершенства, метод сечений.

Введение. Одним из актуальных вопросов теории прочности является проблема инженерного расчета несущей способности силовых (несущих) металлоконструкций с несовершенствами (неметаллическими включениями, усталостными трещинами и т.п.). При решении данной проблемы применено специфическое приложение одного из базовых методов определения внутренних усилий – метода сечений.

Постановка проблемы. Очевидно, что создание идеальных, бездефектных несущих металлоконструкций, например валов электродвигателей для серийного производства, практически невозможно. Даже в случае их жесткого отбора и контроля качества остаются актуальными вопросы обеспечения прочности валов после действия длительных циклических нагрузок и постепенного раскрытия трещин и несплошностей.

Анализ последних исследований и публикаций. В работах [1-5] рассмотрены основные инструменты и принципы расчетов на прочность сплошных тел, подверженных действию переменных нагрузок. В области железнодорожного транспорта, требования, предъявляемые к несущим нагрузкам элементам регламентируются Нормами расчета [6] или иными аналогичными документами. Задача определения прочности конструкции с тре-

щиной решается как аналитически [7-9], так и экспериментально [10-13]. Однако, некоторые особенности программных сред для выполнения расчетов на прочность приводят к повышенным погрешностям в определении напряженно-деформированного состояния вблизи границ трещин, что, в свою очередь влияет на общий результат такого расчета.

Цель статьи. В работе предложен подход к оценке прочности элементов металлоконструкции, работающей на кручение (вал) с несовершенством типа несплошности эллиптической формы, дислоцированной в продольной плоскости, проходящей через его ось. Данный подход применим также и для других типов нагружений.

Результаты исследований. С целью оценки требований к нагруженности тяговых электродвигателей (ТЭД) электропоездов ВЛ80, ВЛ82, разработаны теоретические основы и проведены расчеты допустимого уровня тягового момента на вале ротора ТЭД, при котором маловероятно быстрое развитие трещин и несплошностей их материала.

Оценивая поведение несущих конструкций при действии на них переменной нагрузки нужно обратить внимание на поведение макроскопических трещин с момента их появления до потери конструкцией несущей способности.

Происхождение трещин в металлах имеет физическую основу, которая связана с его поведением на субмикроскопическом уровне структуры материала, где все металлы имеют монокристаллическую структуру, но с некоторым несовершенством в виде вакансий и дислокаций и несплошностей [1,14].

В поле механического напряжения дислокации могут взаимодействовать и передвигаться. Наиболее возможным движением являются сдвиги или скольжение кристаллических пластов друг относительно друга, наибольшая чувствительность к нагрузке оказывается при этом под углом 45° к направлению действия нагрузки. Во время этого процесса, линии дислокаций обязательно будут двигаться к поверхности кристалла, где их можно увидеть как микро-

скопические полосы, т.е. полосы скольжения, на которой канавки действуют как центры зарождения микротрещин, которые распространяются вдоль межкристаллитных границ.

Эти трещины наиболее чувствительны к компонентам напряжений, направленных под углом 90° к поверхности трещины, под действием циклических нагрузок, они будут расти скачкообразно.

Рассмотрим небольшую плоскую трещину, которая идет из поверхности. Распределение местного напряжения можно описать в локальной системе координат, где оси x и z перпендикулярны линии фронта трещины, как это показано на рисунке 1.

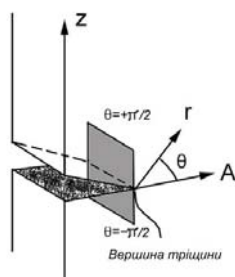


Рис. 1. Координаты, описывающие зависимость между локальными деформациями и напряжениями во фронте вершины трещины

Выражая линейное уравнение связи деформаций и напряжений в полярных координатах (r, θ) и допуская, что эти переменные независимы, компоненты локального напряжения можно записать [1]

$$\sigma_{ij} = R(r) \Theta_{ij}(\theta) \quad (1)$$

На поверхностях, положения которых определяется как $\theta = \pm \pi/2$ относительно направления роста трещины, как нормальные напряжения, так и касательные должны равняться нулю.

Параметр, который описывает напряжение, который объясняет это требование, должен иметь радиальную функцию вида

$$R(r) = r^{\frac{n}{2}-1}$$

где n – величина, равная нулю или целому числу. Реальным значением будет $n=1$, которое дает сингулярность в фронте трещины с порядком $-1/2$.

Для этого значения компоненты напряжений можно записать в виде

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \Theta_{ij}(\theta) \quad (2)$$

здесь $\sqrt{2\pi}$ – нормирующий множитель, введенный для удобства. Коэффициентом K , общим для всех компонент напряжения, обозначают интенсивность напряжений. Он зависит от формы трещины и ори-

ентации тензора номинального напряжения и пропорциональный превосходящей компоненте номинального напряжения, которое обозначается как σ_∞ .

В некоторых особых случаях, интенсивность напряжений K может быть выведена аналитически с помощью интегрирования комплексной функции. Для длинной плоской трещины в металлической пластине длиной $2x$, перпендикулярной продольному напряжению, компоненты местного напряжения будут составлять

$$\sigma_{ij} = \sqrt{\frac{\chi}{2r}} \sigma_\infty \Theta_{ij}(\theta);$$

$$K = \sqrt{\pi \chi} \sigma_\infty$$

Тогда, даже если номинальные напряжения σ_∞ малые, компоненты местного напряжения σ_{ij} в фронте трещины при $r=0$ могут быть чрезвычайно высокими. Они могут быть даже выше, чем прочность материала на разрыв.

Такая неоднородность в поле напряжений может привести к разрушению материала в очень малой области возле вершины трещины и увеличить эту трещину. Тем не менее, если напряжение достаточно мало, неоднородность будет сведена на нет, когда фронт трещины увеличивается на расстояние, сравнимое с размером зерна [1].

Поэтому, будет достаточно корректным принять, что напряжения, превышающие допустимые уровни, могут действовать на расстоянии от острия трещины, которая не превышает среднего размера зерна металла.

Получение адекватных результатов напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции с несплошностью является далеко не тривиальным вопросом. Во-первых, метод конечных элементов (МКЭ) создает локально плохо обусловленную систему уравнений в случае, когда конфигурация конечного элемента содержит углы, близкие к 0° , что приводит к недопустимым погрешностям определения компонент напряженно-деформированного состояния в таких зонах [9]. Во-вторых, при попытках создать какой-либо унифицированный тип стандартного острия трещины, напряжение в его зоне отличаются в разы.

Анализ разрушений валов якорей ТЭД позволяет сделать вывод, что первичной причиной разрушений является крутящий момент тяги, вызывающий возникновение трещины вдоль оси вала (рисунок 3, показано стрелкой) в отличие от изгиба, который служит причиной дальнейшего развития трещины в плоскости его поперечного сечения.

Таким образом, специальная расчетная модель для определения НДС должны моделировать несплошность, расположенную в плоскости, которая проходит через продольную ось вала.



Рис. 2. Вид участка разрушения вала ТЭД от крутящего момента

Для решения данной проблемы предлагается следующий подход:

- применив метод сечений [3], разделить массивное тело в направлении дислокации несплошности (для вала якоря ТЭД это будет плоскость, которая проходит через его продольную ось);
- провести расчет НДС [2] целого вала;
- провести расчет НДС [2] части вала, отделенной плоскостью, которая проходит через продольную ось вала, и закреплениями этой плоскости достичь качественного и количественного совпадения напряжений полной и рассеченной плоскостью моделей;
- выделить в раздельной плоскости отдельный субэлемент, который размером, формой и расположением совпадает с избранной типичной несплошностью;
- внутренняя область субэлемента освобождается от закреплений, моделируя тем самым плоскую трещину.

Идеализация вала якоря ТЭД приведена на рисунке 3.

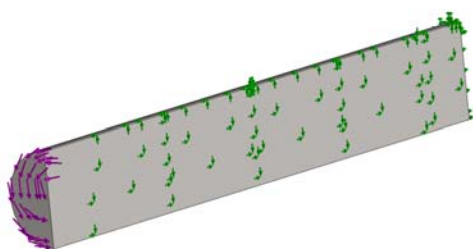


Рис. 3. Идеализация вала якоря ТЭД

В продольной плоскости выбран несплошностью эллиптический элемент (Рисунок 4), размером 20х60 мм, расположенный вдоль продольной оси вала в центральной плоскости его подповерхностной зоне на расстоянии 1 мм от поверхности.

В районе несплошности возникают концентраторы напряжения, показанные на рисунке 5. Будем далее считать, что распределение расчетных напряжений имеет гиперболический характер, в соответ-

ствии с выражением (2) и будет аппроксимирован выражением

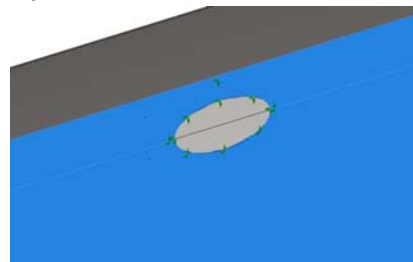


Рис. 4. Расположение модели продольной несплошности вала якоря ТЭД

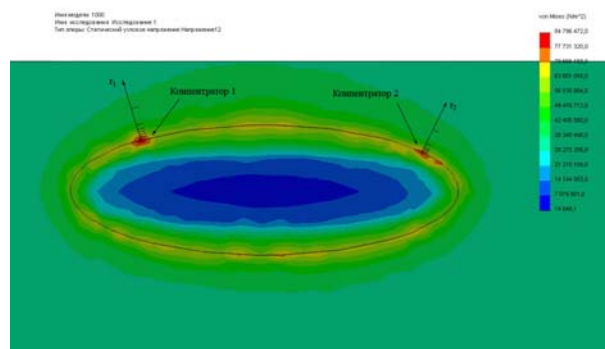


Рис. 5. Напряжения в валу якоря ТЭД с несплошностью и двумя концентраторами напряжения

$$\sigma_R = \frac{K}{\sqrt{r}} \quad (3)$$

где σ_R - расчетное (Von Mises) напряжение; K - коэффициент пропорциональности; r - расстояние по оси, расположенной от острия трещины в направлении ее роста.

Графики расчетных и теоретических зависимостей распределения напряжений в зоне острия трещины, соответственно, для концентраторов 1 и 2, приведены на рисунках 6 и 7.

Следующие ниже расчетные формулы назначаются для определения зон и уровня допустимых напряжений. Учитывая то, что в области острия трещины циклическая нагрузка всегда симметрична, определим величину σ_{-1} с которой будет сравниваться амплитудное теоретическое значение напряжения в острие трещины.

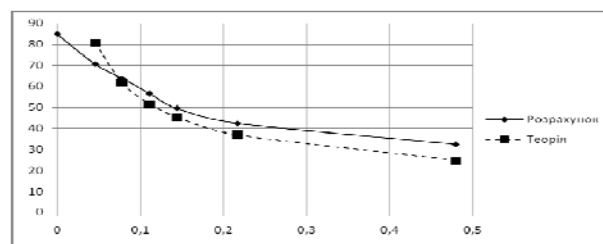


Рис. 6. Расчетные и теоретические напряжения в зоне концентратора 1

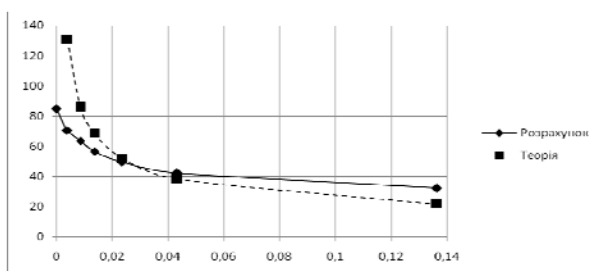


Рис. 7. Расчетные и теоретические напряжения в зоне концентратора 2

В соответствии с [4], с учетом соблюдения нормативного [6] коэффициента запаса $[n]=2$, имеем

$$[\sigma_{-1}] = \frac{\sigma_s \cdot 0,496 \cdot 0,86}{[n]} \quad (4)$$

Из выражения (3) получим допустимую длину, внутри которой напряжения превышают допустимые

$$[r] = \left(\frac{\kappa}{[\sigma_R]} \right)^2 \quad (5)$$

Будем считать причиной разрушений значительную весовую норму, которая в рассматриваемом случае составляла $P_{\text{тек.}} = 50000$ кН. Тогда, допустимым можно считать вес, который определяется следующим образом

$$[P] = \frac{\bar{r}}{[r]} P_{\text{тек.}} \quad (6)$$

где $[P]$ – допустимый вес поезда, кН.; $[r]$ – допустимая длина, внутри которой напряжение превышает допустимые уровни. $\bar{r}$ – среднее значение зерна металла.

Вывод. Таким образом, предложена система оценки прочности несущей конструкции с несплошностью, передающей крутящий момент (вала). Рассмотрено несовершенство типа несплошности эллиптической формы, дислоцированной в продольной плоскости, проходящей через ось вала. Предложены соотношения для обеспечения прочности рассмотренной конструкции. Данный подход применим также и для других типов нагрузений.

Л и т е р а т у р а

- Gran S. A Course in Ocean Engineering. Developments in Marine Technology, Vol. 8. – Elsevier Science Publishers, Amsterdam - London - New York – Tokyo, 1992. – P. 379.
- Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике – М.: Мир, 1975. – 543 с.

- Тимошенко С. П. Сопротивление материалов. В 2 т. – М: Наука, 1965. – 479 с. Т. 1. Элементарная теория и задачи.
- Хейвуд Р. Б. Проектирование с учетом усталости – М.: Машиностроение, 1969. – 504 с.
- Биргер И. А. Расчет на прочность деталей машин/ И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1993. – 618 с.
- Нормы для расчета и оценки прочности несущих элементов и динамических качеств и воздействия на путь экипажной части локомотивов железных дорог МПС РФ колеи 1520 мм. -М: МПС РФ,ВНИИЖТ, 1998. – 145 с.
- Парис П., Си Дж. Анализ напряженного состояния около трещин // Прикладные вопросы вязкости разрушения / Пер с англ. под ред. Б. А.Дроздовского. -М.: Мир, 1968.- с. 64-142.
- Mott N.R. Fracture of Metals. Some Theoretical Considerations // Engineering.-1948.-p.16-18.
- Сборник "Разрушение". Редактор Г.Либовиц. Том 3. Перевод с англ. Москва, Мир, 1976.
- Сроули Дж., Браун У. Методы испытаний на вязкость разрушения / В кн. Прикладные вопросы вязкости разрушения.-М.:Мир, 1968. -с.213-297.
- ГОСТ 25.506-85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик вязкости разрушения (трещиностойкости) при статическом нагружении. -М.: Изд-во стандартов, 1982.- 56 с.
- Standard method of test for plane-strane fracture toughness of metallic materials // Annual Book of standards.-Philadelphia: ASTM E 399-74, 1974.-432 p.
- Кроули Дж., Браун У.Ф. Методы испытаний на вязкость разрушения.-В кн.: Прикладные вопросы вязкости разрушения.-М.: Мир, 1968.-с.213-297.
- Мармер Э.Н. Углеродистые материалы.- М.:Металлургия, 1973.- 135 с.

References

- Gran S. A Course in Ocean Engineering. Developments in Marine Technology, Vol. 8. – Elsevier Science Publishers, Amsterdam - London - New York – Tokyo, 1992. – P. 379.
- Zenkevich O. Finite Element Method in the Technology - M: . Mir , 1975. -543 p.
- 3.Timoshenko SP Strength of Materials . In 2 vols . - Moscow : Science, 1965. -479 p. Т. 1. Elementary theory and - garden .
- Haywood RB Design for fatigue - M .: Mechanical engineering , 1969. - 504 p.
- Birger IA Calculation of the strength of machine parts / IA Birger , BF Shorr , GB Iosilevich . - M: Machinery - swarming , 1993. - 618 p. .
- The rules for the calculation and evaluation of the strength of load-bearing elements, cops and dynamic qualities and impact on the way the vehicle-part of the Ministry of Railways locomotive 1520 mm gauge railways. -M: The Ministry of Railways, Railway Scientific Research Institute, 1998. - 145 p.
- Paris, P., J. C. Analysis of the stress state of an eye-lo cracks // Applied destroy viscosity-of / Translated from English. ed. B. A.Drozdzovskogo. -M .: Mir, 1968.- p. 64-142.
- Mott N.R. Fracture of Metals. Some Theoretical Considerations // Engineering.-1948.-p.16-18.
- "The destruction of the" Collection. Editor G.Libovits. Volume 3. Translated from English. Moscow, Mir, 1976.

10. Srouli J. Brown W. Test methods for fracture toughness / In. Applied viscosity ra-zrusheniya. M.: Mir, 1968. -s.213-297.
11. GOST 25.506-85 . Calculations and tests of strength . Methods of mechanical testing of metals . The definition of the characteristics , fracture toughness (fractured bone) under static loading . -M .: Publishing house of the mill - dards , 1982.- 56 p.
12. Standard method of test for plane-strane fracture toughness of metallic materials // Annual Book of standards.-Philadelphia: ASTM E 399-74, 1974.-432 p.
13. Crowley J., Brown WF Test methods for elm - bone razrusheniya. - Proc .: Applied vyazkos -minute razrusheniya. -M .: Mir , 1968. - s.213-297 .
14. Marmer EN Carbon and graphite materialy.- Moscow: Metallurgy, 1973.- 135 p.

Горобець В.Л., Мямлін С.В., Горобець Є.В. Дослідження міцності валів з недосконалістю матеріалу.

У статті розглянуто методологію оцінки міцності та допустимої навантаженості валів, з недосконалістю матеріалу, що передають крутний момент. При складанні методик використані спеціальні додатки методу перерізів, а також методи опору матеріалів і теорії руйнування. Запропоновано принцип створення спеціальних розрахункових моделей для оцінки напружено-деформованого стану внутрішнього перерізу, в якому дислокований еліптичний тріщиноподібний дефект з метою подальшої оцінки рівня навантажень, які не призводять до інтенсивного росту тріщини. Розроблена схема закріплення внутрішнього перерізу, що дозволяє оцінювати рівень і характер розподілу напружень поблизу вістря тріщини, яке далі узгоджується з теоретичними залежностями, які аналі-

тично описують ці розподіли. При цьому, умовою міцності і відсутності інтенсивного зростання тріщини в конструкції з дефектом вважається не перевищення напруженої допустимого рівня на середньому розмірі зерна металу.

Ключові слова: міцність, вал, недосконалість, метод перерізів.

Horobec V, Myamlin S, Horobec E. Research of billows durability with imperfections of material

In the article considered methodology of estimation of durability and assumed loading of billows with imperfections of material, transmitted a twisting moment. For drafting of methods the special appendixes of method of sections are used, also methods of resistance of materials and theory of destruction. Principle of creation of the special calculation models is offered for the estimation of the tensely-deformed state of internal section, in which an elliptic crack similar defect is deployed with the purpose of further estimation of level of loading which do not result in the height of crack.

Keywords: durability, billow, imperfection, method of cuts.

Горобець В.Л. – д.т.н., головний наук. співр ДНУЗТ, e-mail: v-gorobets@mail.ru.

Мямлін С.В. – д.т.н., проф., проректор з наукової роботи ДНУЗТ. e-mail: sergeymyamlin@gmail.com.

Горобець Є.В. – асп., e-mail: sparrow.eugene@mail.ru.

Рецензент: д.т.н., проф. **Соколов В.І.**

Стаття подана 14.03.2016