

КОНТРОЛЬ ЖИВУЧЕСТИ РАМНЫХ НЕСУЩИХ СИСТЕМ МОБИЛЬНЫХ МАШИН В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Проведен анализ публикаций об эксплуатации мобильных машин с усталостными повреждениями несущих систем. Приведены конструкции емкостного датчика для определения степени накопления усталостных повреждений и датчика угла закручивания рамы, при помощи которых можно контролировать в эксплуатации запас живучести поврежденных конструкций.

В настоящее время в отраслях машиностроения, выпускающих мобильные машины широкого спектра назначения (автотранспортные средства, тракторы и сельскохозяйственные машины, строительно-дорожные машины, подвижной состав железных дорог и т.д.), оценка ресурса деталей и конструкций, работающих в условиях циклического нагружения, производится в соответствии со следующими тремя положениями.

Положение первое: усталостное разрушение рассматривается как процесс с замедленной в ряде случаев кинетикой разрушения, при которой наработка машины с развивающейся усталостной трещиной до достижения предельного состояния в среднем в 4 раза больше наработки до появления видимой трещины (длиной около 5 мм) [1]. Примером могут служить трещины на поперечинах рам полноприводных автомобилей, зарождающиеся при сравнительно небольшом пробеге (иногда 5-10 тыс. км), которые часто не развиваются дальше или увеличиваются в течение значительного пробега очень медленно. Это, по-видимому, объясняется технологическим первоначальным перенапряжением металла, которое дает более высокие концентрации напряжений на поперечинах, чем на лонжеронах, при внешних воздействиях. После образования трещины на поперечине это напряжение снимается. Количественные характеристики явления перераспределения напряжений между элементами конструкции по мере появления и развития повреждений практически отсутствуют.

Положение второе: ограниченное во времени функционирование конструкции при наличии в ней развивающихся усталостных трещин полагается возможным. Для оценки способности конструкции выдерживать требуемые нагрузки при частичном или полном разрушении какого-либо из силовых элементов применяют термин *эксплуатационной живучести*.

Положение третье: несущая способность конструкции ограничивается моментом достижения заданными параметрами соответствующих критических значений. Методы механики разрушения не позволяют в настоящее время непосредственно рассчитывать живучесть при нестационарном нагружении металлоконструкции, поэтому за критерий предельного состояния принимают либо окончательное разрушение элемента (для многократно статически неопределимых систем), либо трещины, охватывающие более 30-40% площади исходного сечения (для деталей типа валов, сварных балок открытых и замкнутых профилей, листовых сварных конструкций) [2]. Эти повреждения принимаются определяющими при рассмотрении снижения жесткости несущей системы, происходящего одновременно с ростом усталостных трещин.

Снижение жесткости приводит к нарушению взаимного расположения и точности кинематического взаимодействия узлов и агрегатов машины. Так, у тракторных самосвальных прицепов 2ПТС-4 при суммарной длине трещин 1,5 м или длине трещин в соединениях поперечин с лонжеронами 0,35-0,4 м появляются «шарниры пластичности» и возникают остаточные деформации рамы, в результате чего затрудняется посадка платформы на опорные кронштейны рамы после разгрузки. Кроме того, снижение жесткости и появление остаточных деформаций несущей системы приводит к аварийному скручиванию рамы в экстремальных условиях, например, при разгрузке несимметрично нагруженной платформы назад.

В работе [3] описан метод определения начала образования «шарнира пластичности» путем измерения остаточного раскрытия трещины специальными датчиками, установленными на этих трещинах. В ходе испытаний периодически воспроизводили режимы

максимальной нагруженности (нагрузка и переезд кювета) и замеряли полное и остаточное раскрытия трещины до тех пор, пока остаточное раскрытие какой-либо из трещин при одиночных перегрузках не превышало допустимое.

Поэтому, решая вопрос о возможности эксплуатации машины с трещиной в несущей системе, необходимо непременно учитывать следующие факторы:

- возможность наблюдения за ростом трещин;
- влияние развивающейся трещины на работоспособность узлов, сопряженных с поврежденным узлом;
- степень риска (в том числе для жизни людей) аварийного разрушения узлов;

– возможность хрупкого разрушения элементов от усталостной трещины при низких температурах;

– стоимость и объем ремонтных работ по устранению повреждения.

Изложенное позволяет предложить перейти от доминирующего в настоящее время принципа *безопасного ресурса* к принципу *регламентированного разрушения*. На практике эксплуатации мобильных машин это будет означать переход к индивидуальному прогнозированию остаточного ресурса (живучести) конструкции, имеющей усталостные повреждения, по результатам наблюдений за ее состоянием в процессе эксплуатации.

Схема влияния усталостных повреждений несущей системы на работоспособность мобильной машины представлена на рисунке 1.

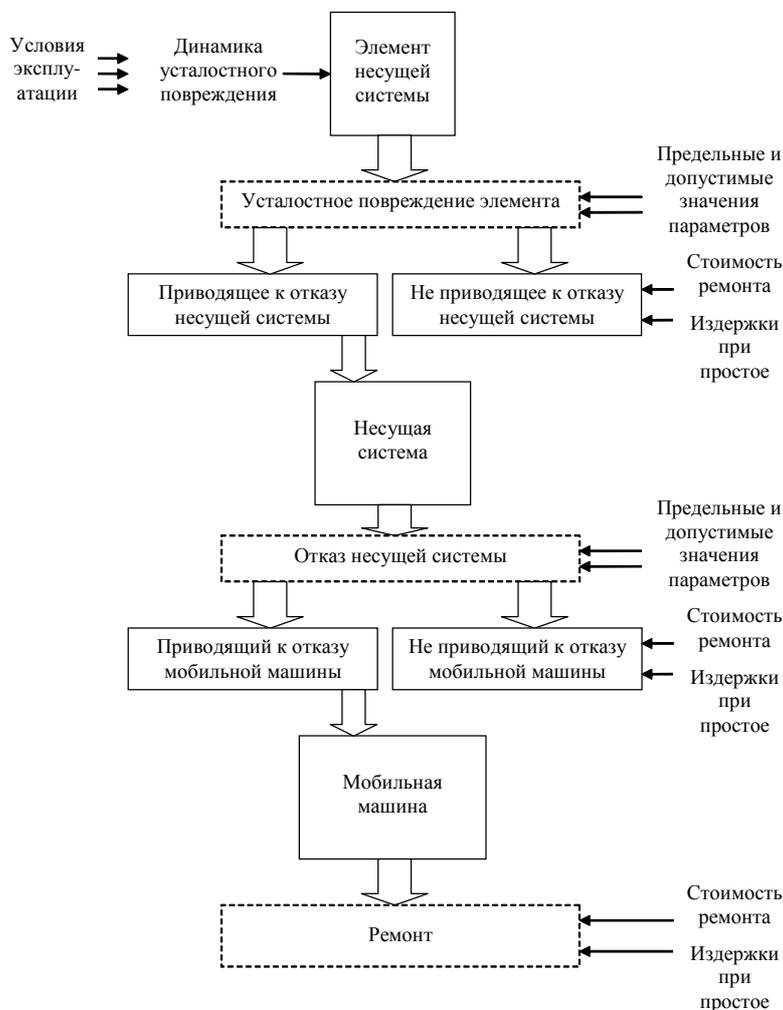


Рисунок 1. Схема влияния усталостных повреждений несущей системы на работоспособность мобильной машины

Известно, что многообразие интегральных кривых роста трещин в зависимости от наработки можно свести к четырем формам: линейной, криволинейной прогрессирующего типа, криволинейной затухающего типа и комбинированной (с линейными и криволинейными участками). У большинства узлов мобильных машин кривые можно отнести к линейным; для некоторых соединений поперечин с лонжеронами рам прицепов типичны кривые прогрессирующего характера [1].

Исходя из этого, возможность контроля за ростом трещин при эксплуатации конструкций оценивалась автором с позиций двух способов.

Первый способ заключается в том, что на определенном расстоянии по направлению роста трещины наклеивают специальные датчики – свидетели истории нагружения данного экземпляра конструкции, которые работают по принципу изменения электрического сопротивления, происходящего с увеличением числа циклов нагружения

[4, 5]. Известно большое количество конструкций таких датчиков, однако большинство из них не лишено недостатков.

Так, известен фольговый тензорезистор [6], содержащий чувствительный элемент, выполненный в виде замкнутого кольца, состоящего из последовательно соединенных проводников, к каждому из которых параллельно подсоединен дополнительный проводник с концентратором напряжений, и пару контактных площадок, размещенных на диаметрально противоположных сторонах кольца. Недостатком тензорезистора является возможность фиксировать один, в случае идентичных выемок (концентраторов напряжений) в противолежащих дополнительных проводниках, или максимум два, в случае различных выемок в вышеуказанных проводниках, критических уровня усталостного повреждения конструкции. После разрыва фольги по выемкам в обоих противолежащих дополнительных проводниках тензорезистор не способен дальше фиксировать усталостное повреждение конструкции в данном направлении.

Известен также емкостной датчик для измерения длины усталостной трещины [7], содержащий изоляционную подложку и размещенную на ней обкладку гребенчатой формы, зубья которой выполнены разной ширины, монотонно изменяющейся по длине обкладки. Недостатком датчика является то, что его необходимо наклеивать на исследуемую конструкцию так, чтобы направление зубьев совпадало с направлением максимальных механических напряжений, которое не всегда возможно выявить, особенно для сложных конструкций в условиях воздействия случайных циклических нагрузений.

Для упрощения использования описанного емкостного датчика путем исключения юстировки положения датчика на исследуемой конструкции предложена конструкция емкостного датчика для определения степени накопления усталостных повреждений [8], в которой зубья чувствительного элемента выполнены в виде полукруглых полос, имеющих общий центр, ширина и радиусы которых монотонно возрастают.

Датчик (рисунок 2) содержит изоляционную подложку 1, на которую наклеен чувствительный элемент 2, зубья 3 которого выполне-

ны в виде полукруглых полос, имеющих общий центр, ширина и радиусы которых монотонно возрастают. Основание чувствительного элемента имеет электрический вывод 4, соединяемый вместе с исследуемой конструкцией 5 с измерителем емкости.

Датчик наклеивают на поверхность электропроводящей конструкции, при этом ориентация его на конструкции не регламентируется. По мере накопления усталостных повреждений и роста усталостной трещины происходит разрыв чувствительного элемента в месте действия наибольших растягивающих напряжений, что приводит к скачкообразному изменению емкости чувствительного элемента относительно конструкции. В дальнейшем, при разрыве следующих зубьев чувствительного элемента, из-за того, что они имеют разное сопротивление, фиксируются различные скачкообразные, либо монотонно возрастающие, либо монотонно убывающие, изменения емкости, по которым судят о направлении развития усталостной трещины.

Число зубьев чувствительного элемента может быть большим, что обеспечивает возможность исследования роста трещины в течение продолжительного периода нагружения конструкции.

Второй способ контроля за ростом трещин при эксплуатации конструкции является косвенным и основан на принятии в качестве интегральной характеристики состояния рамной металлоконструкции относительной величины снижения ее крутильной жесткости. Предельное по условиям эксплуатации значение этой характеристики является количественной оцен-

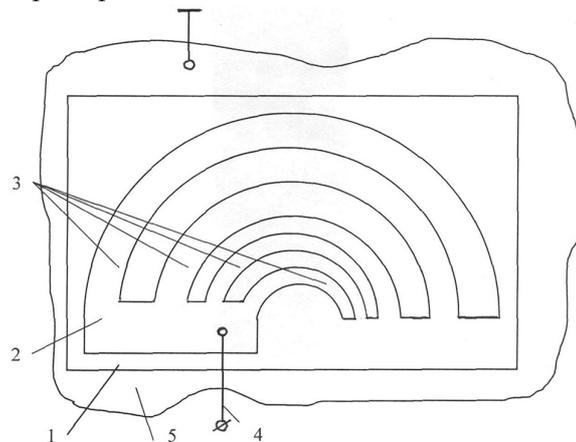


Рисунок 2. Емкостной датчик для определения степени накопления усталостных повреждений

кой критерия предельного состояния. Применительно к тракторным самосвальным прицепах установлено, что предельное состояние несущих систем соответствует снижению их крутильной жесткости на 30-35% [9]. В указанной работе отмечалось, что данный критерий может быть положен в основу разработки технических средств диагностирования несущих систем.

Однако с применением названного критерия возникает задача оценки жесткости рамы при движении мобильной машины. В настоящее время она решается несколькими способами.

Углы закручивания рамы могут оцениваться при помощи торсионных угломеров или тензометрированием в эксплуатационных условиях при размещении тензометрических датчиков либо на поперечине рамы, либо на специальном датчике. Целесообразность второго варианта объясняется тем, что в волокнах датчика допускаются большие напряжения, чем в поперечине рамы, поэтому сигнал от тензорезистора меньше искажается помехами и требует меньшего усиления.

В работе [10] описан трубчатый тензометрический датчик угла закручивания из дюралевой трубки с фланцами на концах для установки между лонжеронами исследуемой рамы. С его помощью исследовались углы закручивания автомобильных рам при движении, используемые при проведении программных стендовых испытаний рам на кручение. Однако вследствие действия кососимметричных динамических нагрузок на поперечные элементы рамы действуют, кроме крутящего момента, поперечная сила, изгибающие моменты в двух плоскостях и бимомент.

Для устранения влияния изгибающих и растягивающих усилий в конструкцию датчика было предложено ввести компенсаторы осевых (от растяжения) и поперечных (от изгиба) деформаций [11]. В качестве осевого компенсатора использовано шлицевое соединение, а в качестве поперечного-шарнирная муфта.

Конструкция устройства поясняется схемой, представленной на рисунке 3. Чувствительным элементом датчика является труба 5, изготовленная из дюралюминия, с наклеенным на нее тензорезистором 6. Труба 5 жестко соединена одним концом с шарнирной муфтой 3, а другим – с валом 4, который, в свою очередь, соеди-

нен шлицевым соединением со второй муфтой 3. Закрепление шарнирных муфт 3 на полках лонжерона 1 рамы осуществляется при помощи струбцин 2.

Оценка угла закручивания рамы мобильной машины при ее движении осуществляется по результатам измерения при помощи тензорезистора 6 главных деформаций, возникающих в трубе 5 под действием крутящего момента. При этом изгибающие моменты и осевые усилия, входящие в состав сложного нагружения рамы мобильной машины, не влияют на напряженно-деформированное состояние трубы 5 датчика вследствие ее подвижного (в осевом и поперечном направлениях) соединения с лонжеронами 1 рамы.

Недостатком описанного устройства является то, что по показаниям тензорезистора непосредственно не может быть принято заключение о необходимости ремонта несущей рамной конструкции. Такое заключение может быть сделано только после проведения трудоемких стендовых испытаний, подобных выполненным для тягового подвижного состава железных дорог и описанным в работе [12].

Поэтому предложен способ [13] принятия решения о необходимости ремонта несущей рамной конструкции непосредственно после сигнализации о достижении критических уровней развития трещины или снижения жесткости, характеризующих уровни накопленного усталостного повреждения конструкции.

Для этого предлагается использовать датчик любого вида с чувствительными элементами, разрушающимися при трех различных уровнях допустимых напряжений, при этом сигнал при разрушении соответствующего чувствительного элемента передается на световой, звуковой или иной другой индикатор, расположенный в кабине мобильной машины.

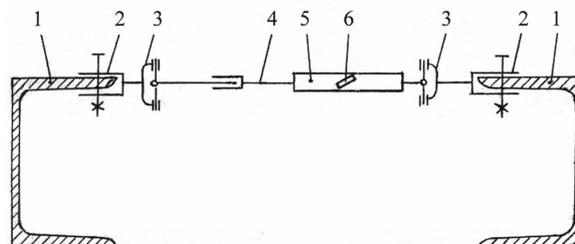


Рисунок 3. Датчик угла закручивания рамы мобильной машины

По мере накопления усталостных повреждений жесткость несущей рамной конструкции снижается, поэтому повышаются напряжения от кручения, действующие в трубе 5 устройства. При превышении достигаемыми напряжениями критического уровня для чувствительного элемента датчика 6 низшего уровня допускаемых напряжений этот элемент разрушается, и сигнал соответствующего тона (цвета и т.д.) через индикатор доносится до водителя мобильной машины. При последующей эксплуатации машины, по мере исчерпания несущей рамной конструкцией эксплуатационной живучести, разрушается чувствительный элемент среднего, а затем и высшего (критического) уровня фиксируемых напряжений. После этого несущая рамная конструкция мобильной машины должна быть подвергнута ремонту.

Необходимость использования датчика с чувствительными элементами трех уровней допускаемых напряжений позволит исключить ситуацию, когда в результате фиксации случайных эксплуатационных перегрузок может быть принято решение о необоснованном изъятии машины из эксплуатации, и, следовательно, последует недоиспользование потенциальной долговечности машины.

Аналогичным образом предлагается вывести сигнализацию об уровнях развития усталостной трещины от емкостного датчика для определения степени накопления усталостных повреждений.

Переход к индивидуальному прогнозированию остаточного ресурса рамных несущих систем позволит увеличить средний ресурс мобильных машин.

Список использованной литературы:

1. Дмитриченко, С.С. Закономерности развития усталостных трещин в металлоконструкциях машин / С.С. Дмитриченко, Л.П. Шевченко, А.П. Давыдов // Вестник машиностроения. - 1974. - № 12. - С. 3-6.
2. Дмитриченко, С.С. Новые возможности для повышения усталостной прочности / С.С. Дмитриченко, Э.А. Горин, Н.М. Панкратов, Ю.С. Борисов // Автомобильная промышленность. - 1995. - № 2. - С. 13-15.
3. Баловнев, Г.Г. Рациональный способ прогнозирования долговечности рамы самосвального прицепа / Г.Г. Баловнев, Х.Д. Карабаев // Автомобильная промышленность. - 1986. - № 10. - С. 19-20.
4. Болотин, В.В. Теория датчиков повреждений и счетчиков ресурса / В.В. Болотин, С.М. Набойщиков // Расчеты на прочность. - М.: Машиностроение, 1983. Вып. 24. - С. 79-94.
5. Гайдош, Л. Применение датчиков для измерения усталостного повреждения материалов / Л. Гайдош // Заводская лаборатория. - 1983. - № 1. - С. 83-85.
6. А. с. 1693367 СССР, МКИ G 01 B 7/20. Фольговый тензорезистор / М.С. Тривайло, Ю.И. Коваль, В.И. Бойко. - № 4719576; заявл. 17.07.89; опубл. 23.11.91, Бюл. № 43. - 2 с. : ил.
7. А. с. 669181 СССР, МКИ G 01 B 7/22. Емкостной датчик для измерения длины усталостной трещины / В.К. Грибановский. - № 2552036; заявл. 06.12.77; опубл. 25.06.1979, Бюл. № 23. - 2 с. : ил.
8. Пат. 79993 Российская Федерация, МПК G 01 B 7/00, G 01 B 7/24. Емкостной датчик для определения степени накопления усталостных повреждений / Рассоха В.И., Бондаренко Е.В., Исайчев В.Т. - № 2008134447; заявл. 22.08.08; опубл. 20.01.2009, Бюл. № 2. - 1 с. : ил.
9. Погорелый, Л.В. Ускоренные испытания на усталость несущих систем тракторных прицепов и кормораздатчиков / Л.В. Погорелый, Г.В. Макушин, Э.Я. Филатов, М.С. Тракало // Тракторы и сельхозмашины. - 1981. - № 10. - С. 31-33.
10. Школьников, М.Б. Закручивание рамы грузового автомобиля и построение программы ее испытаний на усталость кручением / М.Б. Школьников, В.Ф. Шурминов, А.Л. Эйдельман // Автомобильная промышленность. - 1972. - № 5. - С. 28-30.
11. Филиппов, В.Ю. К вопросу оценки крутильной жесткости рамы мобильной машины в эксплуатации / В.Ю. Филиппов, В.И. Рассоха // Контроль. Диагностика. - 2001. - № 11. - С. 14-15.
12. Волохов, Г.М. Остаточный ресурс несущих конструкций тягового подвижного состава железных дорог : монография / Г.М. Волохов, В.П. Тихомиров. - Орел: ОрелГТУ, 2006. - 158 с.
13. Решение о выдаче патента на полезную модель от 20.10.2008 г. Российская Федерация, МПК G 01 N 3/32. Устройство для определения накопленных усталостных повреждений несущей рамной конструкции мобильной машины в эксплуатации / Рассоха В.И., Бондаренко Е.В., Исайчев В.Т. - № 2008134452; заявл. 22.08.08.