

2. Циклическое нагружение. Полученный результат распространим на случай любого n -го циклического нагружения. Пусть при n -ом нагружении внешними силами F_i^n, R_i^n при граничных перемещениях u_{ij}^n возникают напряжения σ_{ij}^n , деформации ε_{ij}^n и перемещения u_i^n . При этом должны удовлетворяться уравнения равновесия, граничные условия и соотношения Коши (3). Введем следующие разности:

$$\begin{aligned}\sigma_{ij}^{*n} &= (-1)^n (\sigma_{ij}^{n-1} - \sigma_{ij}^n), & \varepsilon_{ij}^{*n} &= (-1)^n (\varepsilon_{ij}^{n-1} - \varepsilon_{ij}^n), \\ u_i^{*n} &= (-1)^n (u_i^{n-1} - u_i^n).\end{aligned}\quad (10)$$

Примем, что при любом n -ом нагружении связь между шаровыми составляющими тензоров напряжений и деформаций остается упругой. Повторя предыдущее предположение о возможности описания кривых $s'_{ij} \sim \varepsilon'_{ij}$ и $s_{ij}^{*n} \sim \varepsilon_{ij}^{*n}$ функциями нелинейности одинакового аналитического вида f' :

$$s_{ij}^{*n} = 2G\varepsilon_{ij}^{*n} f'(\varepsilon_u^{*n}, I_1, a_k^{*n}), \quad (11)$$

закключаем, что решение задачи для величин со звездочками (10), (11) при любом n -ом нагружении можно получить из решения задачи, соответствующей нагружению из естественного состояния. Например, если известно перемещение $u_i' = u_i'(x, \varepsilon_u', \varepsilon_s', I, a_k')$, то соответствующая величина со звездочкой будет $u_i^{*n} = u_i'(x, \varepsilon_u^{*n}, \varepsilon_s^{*n}, I_1, a_k^{*n})$. Искомое перемещение u_i^n найдем, обобщая (9):

$$u_i^n = u_i' - \sum_{k=2}^n (-1)^k u_i^{*k}. \quad (12)$$

Напряжения и деформации вычисляются по формулам типа (12).

Таким образом, выводы известной теоремы В. В. Москвитина о переменных нагружениях упругопластических тела, распространена на случай комплексного радиационно-силового воздействия.

Литература 1. Старовойтов Э. И. Сопrotивление материалов. Гомель, 1999.–220с. 2. Москвитин В. В. Циклические нагружения элементов конструкций. М.: Наука, 1981.–344с.

УДК 539.3

А. Н. Панов

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА КОНСТРУКЦИИ НА ЭТАПЕ АНАЛИЗА ПРОЕКТНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

*Институт надежности машин НАН
Минск, Беларусь*

Величина назначенного ресурса автомобиля при первой категории условий эксплуатации (ГОСТ 21624) определяется техническими условиями (ТУ) изготовителя. Критерием достижения ресурса является предельное состояние рамы и кабины. Критерием предельного состояния рамы является разрушение ее несущих элементов. Понятие категории эксплуатации условно. Но это позволяет установить шкалу, по которой можно сравнивать ресурс автомобилей. На автополигоне НАМИ накоплен опыт форсированных испытаний с приведением пробега к условиям первой категории. Опыт испы-

таний и эксплуатации рам позволил получить изготовителям коэффициенты перехода от числа циклов при стендовом нагружении к ресурсу при первой категории эксплуатации. Распределение пробега при форсированных испытаниях (ФРИ) и коэффициент эквивалентности на автополигоне регламентируется [1,2].

В работе [3] реализован подход к прогнозированию ресурса на основе измерения нагруженности опытного образца. В настоящей работе ставится иная задача – прогнозирование до появления конструкции в металле. Для таких сложных конструкций с множеством зон повреждений и различными механизмами повреждений подход, представленный в работе [4] основанный на оценке динамической нагруженности и расчете методом конечных элементов (МКЭ), не достаточно точен, слабо реализуем на практике [1], к тому же для данного вида конструкций частотный диапазон на энергию повреждения влияет не существенно [4]. Анализ [3] позволяет сделать вывод о влиянии на нагруженность зон повреждений конкретного вида дорог (например, трек, профилированный булыжник и т.п.). Представим движение транспортного средства как последовательность единичных видов нагружений (например, вертикальная нагрузка, закручивание, параллелограммирование и т. п.), а затем, на основе принципа суперпозиций, осуществлять комбинации видов нагружения. Указанные данные позволяют формировать блоки нагружения для имитации ездового цикла на ЭВМ при расчете МКЭ.

Методика прогнозирования ресурса несущих элементов рамы при заданном блоке нагружения по критерию циклической долговечности основана на оценке характеристик сопротивления усталости (ХСУ) зон повреждений методом локального моделирования [4], анализе МКЭ напряженно-деформированного состояния (НДС) натурной конструкции и зоны повреждения [5], для которой и были определены ХСУ.

Применена следующая последовательность шагов:

а) формирование блока нагружения рамы имитирующего режим ФРИ полигона, либо стендового - имитирующего воздействие ездового цикла;

б) анализ НДС несущих элементов по итогам расчета МКЭ на воздействие ездового цикла; приведение процессов нагружения типичных зон повреждений с переменным коэффициентом асимметрии цикла нагружения к эквивалентному по повреждению симметричному; составление блока нагружения для каждой зоны повреждения;

в) анализ НДС зон повреждения по итогам расчета МКЭ локальных моделей на вид воздействия приводящего к повреждению; оценка чувствительности КЭ-модели [5];

г) анализ НДС зон повреждений несущего элемента по итогам расчета МКЭ остаточных напряжений от сборки (ОНС) (если имеется необходимость учесть влияние существующего процесса сборки, создать благоприятное воздействие от сборки); моделирование действия ОНС на зону повреждения (суммирование со статической нагрузкой или изменением предела выносливости с использованием коэффициента чувствительности к асимметрии цикла);

д) расчет циклической долговечности по гипотезам суммирования усталостных повреждений (линейной, скорректированной и с учетом снижения предела выносливости) на базе ХСУ полученных локальным моделированием (КТФ реального производства), коэффициента чувствительности КЭ-модели.

Расчет ресурса проиллюстрирован при блоках №1, №2 соответственно моделирующие режим ФРИ и испытание на стенде. Результаты расчетов НДС МКЭ (рис.) скорректировались с помощью коэффициентов чувствительности конечно-элементной модели [4]. Прогноз (Табл.) сравнивался с имеющимися косвенными [5] экспериментальными данными. Таким образом, впервые предложена методика оценки (особенно в зонах нерегулярности) ресурса несущих элементов обладающая большей достоверностью. Это стало возможным за счет: учета чувствительности КЭ-модели; имеющейся

базы знаний ХСУ, полученных на моделях с учетом КТФ; формирования нормированных блоков на основании расчетных случаев режима ФРИ и стенда.

Для прогнозирования надежности крепежа (разрушение, ослабление заклепок, болтов и т.п.) разработана методика на основании оценки предельного состояния крепежа и широко используемого расчета МКЭ. При этом критерием является его циклическая долговечность. Предложенный критерий: учитывает воздействия всех внутренних силовых факторов (ВСФ), действующих на крепеж, поскольку в эксплуатации возможны различные виды разрушений, причем, описанных минимальным числом параметров; связан с (КТФ) реального производства; не зависит от конкретного узла; прост в использовании. Критерием прочности крепежа в соединении при расчете его нагруженности МКЭ предложена пирамида допустимых значений ВСФ [4]. Методика апробирована при моделировании МКЭ рам автомобилей МАЗ 6422, МАЗ 5432, МАЗ 64221, МАЗ 54421, МАЗ 5516, узла лонжерон-поперечина при имитации нагрузочного цикла в стендовых условиях. Процедура оценки степени перегрузки соединений реализована в программе EZAKL. Степень перегрузки определяется по отношению к плоскости допустимых значений ВСФ. Расположение заклепок и болтов (темные точки) в соединениях рамы и эпюры коэффициентов перегрузки заклепок, болтов представлены на рис. Необходимо отметить, что исследовались не только рабочие величины ВСФ, но и сборочные. Анализ результатов [5] свидетельствует о нижеследующем: прогноз циклической долговечности крепежа в соединении с приемлемой достоверностью совпадает с результатами имеющихся экспериментальных данных физического моделирования.

Таким образом, предложенная методика прогнозирования соединений позволяет давать достоверные прогнозы на стадии проектирования конструкции, на этапе анализа проектной документации.

Литература 1. Методика форсированных ресурсных испытаний автопоездов общетранспортного назначения. – Дмитров.: ЦНИАП НАМИ, 1981 – 17 с. 2. РД 37. 052. 032 – 82. Методика предварительных испытаний специализированных автотранспортных средств. – Дмитров.: ЦНИАП НАМИ, 1984 – 22 с. 3. Панов А.Н., Ракицкий А.А., Горбачевич М.И. и др. Прогнозирование ресурса несущих элементов рам автомобилей. Опер.-инф. материалы. – Мн.: ИНДМАШ АН БССР. 1991. 55 с. 4. Панов А. Н. Оценка характеристик сопротивления усталости и моделирование напряженно-деформированного состояния зон разрушений рамы с учетом различных механизмов повреждения. Нормирование оценок и моделей. / Ин-т надежности машин НАН Беларуси. – Мн., 2000. – 27 с. – Деп. в БелИСА 25.07.2000, № Д200052 // Реферативный сборник. – 2000. – № 18. – С. 102. 5. Панов А. Н. Прогнозирование ресурса сборной несущей конструкции до появления ее в металле при учете различных механизмов и множества зон повреждений / Ин-т надежности машин НАН Беларуси. – Мн., 2000. – 40 с. – Деп. в БелИСА 25.07.2000, № Д200054 // Реферативный сборник. – 2000. – № 18. – С. 103.