

учетом коэффициента чувствительности конечно-элементной модели  $K_s = 14,6[4]$ , составит от -44 до -438 МПа). И это близко к результатам физического моделирования. Таким образом, предложена методика расчета величин напряжений и ВСФ, возникающих при сборке несущей конструкции - рамы транспортного средства.

Таким образом, итогом работы является следующее.

1. Предложен комплекс методов и средств по экспериментальному исследованию остаточных напряжений, возникающих в несущих элементах и крепеже сборных конструкций транспортных средств.

2. Впервые предложена и апробирована методика расчета МКЭ величин напряжений и ВСФ, возникающих при сборке рамы транспортного средства.

3. Сделан вывод о том, что ОНС не релаксируют до нуля в результате циклического нагружения и могут влиять как на зарождение, так и развитие усталостных трещин.

4. Предложены способы стабилизации, оптимизации влияния и повышения ресурса за счет управления технологической наследственностью - напряжениями от сборки - на долговечность конструкции имеющей множество потенциальных мест повреждений на стадии проектирования и расчетов МКЭ. Предложенная методика использует результаты оценки характеристик сопротивления усталости локальным моделированием, а также расчета конструкции МКЭ на рабочие нагрузки и сборочные (монтажные) воздействия.

### Список литературы

1. Проектирование металлических конструкций. В.В. Брюлов, И.И. Кошин, И.И. Крылов и др. - Л.: Стройиздат, 1990 - 432 с.
2. Гольман Л.Д., Коновалов Л.В., Курович А.Н. Многоэлементные предварительно напряженные машиностроительные конструкции. М.: Машиностроение, 1992.
3. Живейнов Н.Н., Карасев Г.Н., Цвей И.Ю. Строительная механика и металлоконструкции строительных и дорожных машин. - М.: Машиностроение, 1988 - 280 с.
4. Панов А.Н. Сборные несущие конструкции. Управление остаточными напряжениями / Сборка в машиностроении, приборостроении, №4, 2003 с.34-38.

УДК 639.2

## СБОРНЫЕ НЕСУЩИЕ КОНСТРУКЦИИ МАШИН. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПО КОМПЛЕКСНЫМ КРИТЕРИЯМ

Панов А. Н.

*Институт механики и надежности машин Академии наук, Минск, Беларусь*

[a.panov@tut.by](mailto:a.panov@tut.by)

Пусть имеется опытный образец продукции (сборочной единицы) либо лишь его проектная документация. Для простоты понимания предлагаемого подхода примем, что рассматриваемая продукция - объект невозстановливаемый, и контроль его функционирования в эксплуатации не предусмотрен. Традиционно в проекте технических условий (ТУ) либо в техническом задании (ТЗ) нормируется средний ресурс ( $X_n$ ) и гарантийный срок эксплуатации ( $x_n$ ). Добавим новые исходные данные, определяемые исхо-

для из требований к системам менеджмента качества и конкурентной экономики. Ими являются: величина потерь (в денежном выражении) из-за не достижения качества (брак, гарантийные ремонты, потеря имиджа и т. п.), затрат на предупреждение (перепроектирование и т.п.) и контроль объекта; классификация серьезности последствий для несоответствий на всех уровнях детализации объекта; допустимый показатель FMEA для продукта - [RPN]; количество несоответствий на миллион - [PPM]. Величины параметров, упомянутых в дополнении, могут определяться не только внутренними требованиями предприятия, но и условиями контракта на поставку.

Рассмотрим методику прогнозирования показателей надежности машин на этапе анализа проекта согласно, п. 4.4.6. ISO 9001, QS 9000, п. 08.4 VDA6.1 для условий массового и серийного производства [1-7]. Оценку вероятности несоответствия продукции по причинам, возникающим при ее тиражировании в производстве в данной работе, опустим.

Путь структурного анализа, т. е. оценки вероятности отказа сборочной единицы путем перемножения и (или) сложения вероятностей отказа составных частей с учетом многообразия механизмов повреждения и т. д. для рассматриваемого случая малоперспективен. Причины: отсутствие многих исходных данных; сложные зависимости взаимосвязанных процессов; крайняя удаленность результатов от экономических показателей предприятия и продукции; даже в случае оценки вероятности отказа – возврат к исходным данным для поиска слабых звеньев, а затем поиск причин их возникновения; и т. п., а так же то, что предполагаемая стоимость точной информации (EVPI) – разность между ожидаемой прибылью в условиях уверенности и ожидаемой прибылью в условиях риска - не может быть высокой. Упомянутые подходы крайне затруднительно использовать (и практика это подтверждает) для сложной продукции массового и серийного производства конкурентоспособные сроки постановки на производство которых в настоящее время не превышают трех лет. Примеры такой продукции – автомобили, тракторы.

Предлагается идти по пути – от сложного к простому, развертывая функции качества; структурируя: конструкцию, функции; анализируя «дерево дефектов – дерево причин»; прогнозируя вероятность появления каждой причины несоответствия (с учетом серьезности последствий и вероятности обнаружения при контроле) и сравнивая ее с требуемой. Итогом является оценка экономических последствий несоответствий и затрат на корректировки. Решение принимается, исходя из экономической целесообразности для данного исторического момента жизненного цикла предприятия, проекта, продукции.

Традиционно методики прогнозирования качества и надежности совершенствовались для повышения их точности. Указанная деятельность и политика высшего руководства предприятия в области качества в отсутствие конкуренции вступали в противоречия. Отсутствовала потребность в совершенствовании продукции на основании использования новейших достижений науки и техники. В условиях обострившейся конкуренции необходимо постоянно оценивать эффективность с точки зрения экономических последствий совершенствования продукции, эффективности применяемых методов расчета и анализа и т. д. Предложенный подход был апробирован при прогнозировании ресурса рам автомобилей.

В качестве примера реализации предлагаемого подхода рассмотрим объект – несущую конструкцию транспортного средства. Как правило, данный объект определяет средний ресурс и гарантийный срок эксплуатации для всей системы, составной частью которой он является. Причиной неблагоприятного события, например, является разрушение вследствие усталости, фреттинг-усталости, ослабления соединений, износов и т.д., а данные о нагруженности известны. Структурно конструкция состоит из следующих уровней: узел; соединение с группой крепежа; соединение с единицей крепежа;

зона повреждения. Функции несущей конструкции - обеспечение компоновки, нормальной работы агрегатов, контакта колес с дорогой и т. д. В таком случае «дерево дефектов» - снижение жесткости несущей конструкции, элементов и т. п., а «дерево причин» - разрушение несущих элементов, крепежных деталей и т. п..

Прогнозирование вероятности появления неблагоприятного события осуществим поэтапно:

1. Оценим (для каждой зоны повреждения) характеристики сопротивления конструкции нагружению (характеристики сопротивления усталости и т. п.) по справочникам, либо путем локального моделирования с учетом влияния различных конструкторско-технологических факторов.

2. Проанализируем нагруженность:

2.1. **Случай I** (имеются записи о нагруженности опытного образца в эксплуатации, на полигоне, стенде)

а) схематизация методом «потоков дождя» (либо другим) случайных процессов нагружения потенциальных зон зарождения трещин при эксплуатации;

б) приведение случайных процессов нагружения с переменным коэффициентом асимметрии к эквивалентному по повреждению с постоянным R.

При этом используется выражение

$$\sigma_i = \sigma_{ai} + \psi (\sigma_{mi} - \bar{\sigma}_m),$$

где  $\sigma_{ai}$  и  $\sigma_{mi}$  - амплитуда и среднее напряжение i-го цикла случайного процесса;  $\psi$  - коэффициент чувствительности асимметрии нагружения;  $\bar{\sigma}_m$  - общее значение среднего напряжения;

в) представление полученных процессов в виде вариационных рядов с помощью трехпараметрического уравнения Почтенного Е.К.:

$$p_i / (N_{bl} + 1) = \exp [-(\sigma_i^m - A) / B],$$

где  $N_{bl}$  - число значений амплитуд  $\sigma_i$  - в полученном ряду;  $p_i$  - порядковый номер амплитуды  $\sigma_i$  - в убывающем вариационном ряду; A, B, m - параметры.

г) формирование обобщенного блока нагружения учитывающий комплекс эксплуатационных условий.

2.2 **Случай II** (имеются результаты расчета конструкции, например, методом конечных элементов с соответствующими уточнениями (коэффициент чувствительности КЭ модели и т. п.)).

а) формирование обобщенного блока нагружения, учитывающего комплекс расчетных случаев.

Затем повторяются этапы б), в).

3. Рассчитаем циклическую долговечность в циклах, блоках, км пробега и т. д., используя гипотезы суммирования усталостных повреждений: линейную, корректированную и с учетом снижения предела выносливости

$$N = \sum_{j=1}^q \left( 1 / \sum_{i=1}^k \beta_i / \Delta N_i \right),$$

где  $q$  - число фиксированных значений предела выносливости,  $k$  - число повреждающих ступеней напряжения при  $j$ -том значении предела выносливости,  $\Delta N_i$  - разность долговечностей, вычисляемых по уравнению кривой усталости при  $i$ -том напряжении в рассматриваемом интервале снижения предела выносливости,  $\beta_i$  - относительная продолжительность действия напряжения  $\sigma_i$  в блоке.

4. Оценим вероятное количество несоответствий исходя из посылки что каждая причина (повреждение элемента системы) приведет к возникновению отказа. Критерии

несоответствия – не достижение заданного среднего ресурса, гарантийной наработки и т. д. При допущении о нормальном распределении и использовании таблиц квантиль нормального распределения

$$U = (X_n - \bar{X}_1) / S_1,$$

где  $X_n$  – граничные значения (средний ресурс, гарантийный пробег и т. д.);  $\bar{X}_1$  – среднее значение ресурса;  $S_1$  – стандартное отклонение.

5. Сравним расчетную величину несоответствий (PPM) с базовой [PPM].

6. Оценим вероятность появления несоответствия в связи с серьезностью возникновения последствий. Для этого используем фактические показатели FMEA – RPN и сравним их с допустимой величиной.

7. На основании анализа потенциальных затрат и потерь примем решение о соответствии конструкции требованиям контракта, о необходимости корректировки (конструкторской документации, снижение рассеяния характеристик соответствия деталей путем ужесточения требований к субпоставщикам, резервирование ресурсов на рекламации и т.п.) либо экономической целесообразности совершенствования продукции.

Пример реализации. Объект – рама автомобиля, состоящая из несущих элементов и крепежных деталей. По ТЗ или проекту ТУ:

- средний ресурс,  $X_n = 800000$  км;
- гарантийная наработка  $x_n = 80000$  км;
- критерий отказа – не обеспечение функционирования закрепленных на раме узлов и агрегатов в заданных кинематических ограничениях, причина – разрушение несущих элементов и крепежных деталей;
- вид нагружения – циклическая нагрузка от заданных условий эксплуатации, приведенная к эквивалентному блоку.

Исходя из результатов анализа и планирования качества (в рамках функционирования системы менеджмента предприятия) назначаются и для нашего примера извещения:

- стоимость возврата транспортного средства из-за обнаруженных несоответствий 1200\$ (здесь и далее финансовые показатели, являющиеся коммерческой тайной, приведены в качестве примера);

- гарантийного ремонта - 1000\$;
- перепроектирования - 5000\$;
- потери имиджа (ниши рынка) – 100\$ на каждый несоответствующий автомобиль;
- показатели серьезности последствий несоответствия – «С»; вероятности возникновения причины несоответствия – «О»; вероятности обнаружения при контроле – «D» определенные согласно рекомендациям;

- показатель [PPM] = 2000;
- объем выпуска – 10000 автомобилей;
- показатель [RPN] = 200;
- характеристики сопротивления усталости для зон повреждений несущих элементов и крепежных деталей (болты, заклепки, сварка) и их чувствительность к конструкторско-технологическим факторам (например, остаточным напряжениям от сборки).

В результате прогнозирования по предложенному алгоритму получили для каждой  $i$ -той зоны:  $\bar{X}_i$ ;  $S_i$ ; PPM <sub>$i$</sub> ; RPN <sub>$i$</sub> .

Вероятность отказа несущей конструкции, представленной как независимые последовательно и (или) параллельно соединенные элементы, рассчитанная по традиционной методике, была бы близка к единице, то есть вероятность того, что автомобиль выработает средний ресурс практически близка к нулю, что далеко от реальности. Причины – не однозначность критерия (не принятие во внимание серь-

езности последствий каждого несоответствия), статическая неопределимость сложной конструкции (недопустимо считать отказы независимыми событиями).

Для иллюстрации нашего примера воспользуемся данными публикаций для несущих конструкций автомобилей большой грузоподъемности:

1) для полки лонжерона рамы (см. табл.)  $\bar{X} = 1100000$  км;  $S = 184547$  км; тогда - фактический показатель  $RPN = 8 \times 8 \times 10 = 640 > 200$ , поскольку серьезность последствий - "отказ не связан с безопасностью человека, полная потеря функции продукции"  $C = 8$ ,  $O = 8$ ,  $D = 10$ ; - фактический  $PPM = 52000 > 2000$  (т.е. 5,2 % автомобилей не вырабатывает средний ресурс);

2) для каждой заклепки (болта) перегрузка ( $n$  – см. рис.) которой больше 0% (при  $X_n = 0\%$  не наступает превышение предела выносливости соединения по критерию разрушения крепежа с вероятностью не разрушения 0,5), например,  $\bar{X} = 128\%$  (перегрузка заклепок);  $S = 10\%$ ; тогда  $RPN = 7 \times 6 \times 10 = 420 > 200$ , серьезность последствий – "функционирование продукции на очень низком уровне, потребитель крайне неудовлетворен",  $C = 7$ ,  $O = 6$ ,  $D = 10$ ; фактический  $PPM$  стремится к 1000000, то есть практически все 100% автомобилей при среднем ресурсе будут иметь разрушенный крепеж.

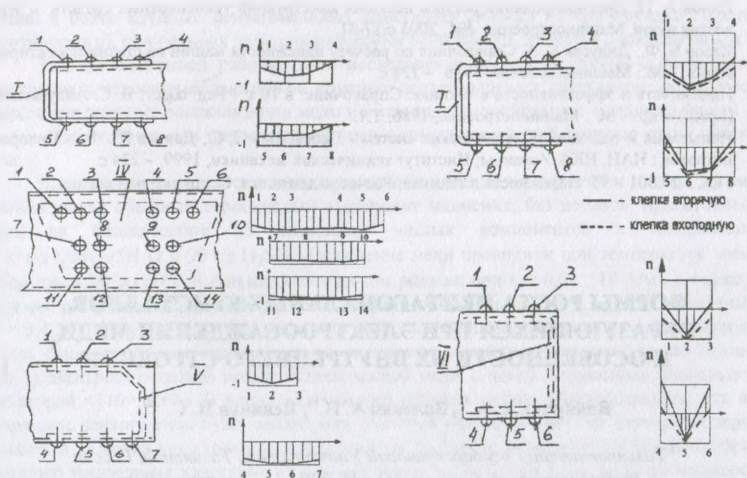
Поскольку анализ проекта конструкции показал, что требования не выполнены, необходимо принять решение об экономической целесообразности перепроектирования конструкции, либо с несоответствием можно смириться, поскольку величина потеря из-за недостижения качества несущественна. Для нашего примера затраты на перепроектирование составляют 5000\$, а потери имиджа (ниши рынка)  $520 \times 100\$ = 52000\$$ . Следовательно, экономически целесообразно совершенствовать конструкцию. Указанный алгоритм повторяется до достижения требуемых величин [RPN], [PPM] и оптимального соотношения затрат и потерь, связанных с качеством.

В заключение отметим, что приведенная методика прогнозирования показателей надежности сложных конструкций по комплексным критериям позволяет:

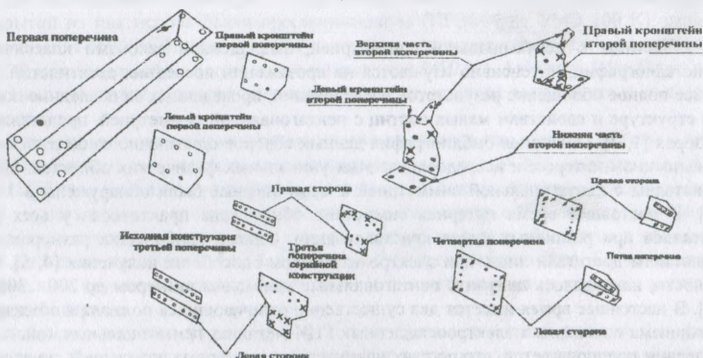
- а) оценивать вероятное количество несоответствующей продукции вместо вероятности работы единицы продукции;
- б) учитывать серьезность возможных последствий от каждого несоответствия;
- в) достигать отказа системы для несоответствий с высокой степенью серьезности последствий до практически невероятного события и с незначительной степенью серьезности последствий - с высокой вероятностью появления;
- г) добиваться максимальной удовлетворенности потребителя при заданных ограничениях ресурсов (финансовых, временных, трудовых, информационных);
- д) создавать системы «равной удовлетворенности потребителя» не теряя ресурсы на получение экономически нецелесообразных данных;
- е) осуществлять неразрывную связь анализов экономической эффективности предприятия и надежности продукции на этапе проекта.

Таблица. Результаты прогнозирования ресурса несущих элементов рамы

№ п / п	Модель автомобиля	Зона повреждения	Прогноз, вероятность неразрушения 0,5/ 0,9				Эксперт-стэнд, цикл	Эксплуатация, тыс. км
			Блок №1 (ФРИ)		Блок №2 (стэнд)			
			цикл	км	цикл	км		
1	Трехосный седельный тягач	Верхняя полка лонжерона у поперечины №1	306787/ 211604	1363499/ 940460	1470542/ 655540	735200/ 327770	1252800* 1526000* 1249000 1206000* *-разрушения не произошло	—
2	Трехосный седельный тягач	Между верхним рядом заклепок у поперечины №4	—	—	387903/ 299061	193951/ 149530	64000... 336000; 21600... 51500; 846000	20... 200
3	Двухосный седельный тягач	Нижняя полка лонжерона у переднего кронштейна задней рессоры	203926/ 161031	1459507/ 1073400	203926/ 161031	101963/ 80595	88000	—
4	Двухосный седельный тягач	Между верхним рядом отверстий у поперечины №3	183662/ 133366	1224416/ 889108	183662/ 133366	91831/ 66683	40000 48000 905000	—
5	Трехосный самосвал	Нижняя полка лонжерона у начала усилителя	1026185/ 635702	6841231/ 4238000	1026185/ 635702	513092/ 317851	—	—
6	Трехосный самосвал	Нижняя полка лонжерона в зоне стыков усилителей	165961/ 129567	1100000/ 863780	165961/ 129567	82980/ 64793	148000 215000	—



а)



б)

**Рис.** Результаты прогноза надежности крепежных деталей (заклепок и болтов) рам автомобилей а), б) зоны соединений несущих элементов заклепками и болтами (обозначены позициями),  $n$  – коэффициент перегрузки крепежа, прогноз надежности: затемненные точки – болты, незатемненные – заклепки; перечеркнутые один раз точки – «перегруженный» крепеж, дважды – совпадение результатов прогноза и испытания.

### Список литературы

1. Почтенный Е. К. Прогнозирование долговечности и диагностика усталости деталей машин. - М.: Наука и техника, 1988. - 166 с.
2. Альгин В. Б. Динамика, надежность и ресурсное проектирование трансмиссий мобильных машин. - Минск: Наука і тэхніка, 1995. - 256 с.

3. Панов А. Н. Прогнозирование ресурса несущих конструкций транспортных средств // Известия вузов. Машиностроение №1, 2003 с.17-31.
4. Хазов Б. Ф., Дидусев Б. А. Справочник по расчету надежности машин на стадии проектирования. – М.: Машиностроение. 1986. – 224 с.
5. Надежность и эффективность в технике: Справочник: в 10 т. / Ред. совет: В. С. Авдудевский (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1986. Т.1.
6. Испытания и надежность технических систем / Переверзев Е. С., Даниев Ю. Ф. – Днепропетровск: НАН, НКА Украины; Институт технической механики, 1999. – 224 с.
7. ГОСТ 27.301 – 95 Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения

## **ФОРМЫ РОСТА ПЕНТАГОНАЛЬНЫХ КРИСТАЛЛОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИИ МЕДИ, И ОСОБЕННОСТИ ИХ ВНУТРЕННЕГО СТРОЕНИЯ**

**Викарчук А. А.<sup>1)</sup>, Воленко А. П.<sup>1)</sup>, Ясников И. С.<sup>1,2)</sup>**

<sup>1)</sup> *Тольяттинский Государственный Университет, Тольятти, Россия*

<sup>2)</sup> *Исследовательский центр АО «АВТОВАЗ», Тольятти, Россия*

[fti@ttsu.ru](mailto:fti@ttsu.ru)

Частицы с пентагональной симметрией, запрещенной законами классической кристаллографии, интенсивно изучаются на протяжении последних десятилетий. Наиболее полное обобщение результатов исследований, проведенных за последние полвека по структуре и свойствам малых частиц с пентагональной симметрией, представлено в обзорах [1, 2]. Обширная библиография данных обзоров однозначно свидетельствует о повышенном интересе к исследованию этих уникальных физических объектов. Микрокристаллы с пентагональной симметрией в меди впервые были обнаружены в 1957 г. [3]. В настоящее время пятерная симметрия обнаружена практически у всех ГЦК-металлов при различных видах кристаллизации. Однако наибольших размеров такие кристаллы достигали лишь при электролитическом способе их получения [4, 5]. В частности, нам удалось получить пентагональные кристаллы размером до 200...300 мкм [5]. В настоящее время имеется два существенно отличающихся подхода к объяснению механизма появления в электроосажденных ГЦК-металлах пентагональных кристаллов: в первом предполагается, что рост их начинается с двумерных зародышей, во втором – из трехмерных [6, 7]. Предложены также модели пентагональных кристаллов, полученных методом напыления, состоящие из неправильных декаэдров [8]. Все эти модели противоречат друг другу и не могут объяснить ряд новых экспериментальных фактов [4, 5], в частности, факта существования довольно крупных кристаллов с пятерной симметрией. При их создании совершенно не использовались дисклинационные представления. В работах [2,9,10] теоретически обосновывается эффективность использования дисклинационного подхода для анализа неоднородной упругой деформации в пентагональных малых частицах и при описании их структурно-чувствительных свойств. Однако, из энергетических соображений, т.е. независимо от механизма образования, следует, что пентагональные малые частицы (ПМЧ) устойчивы лишь до некоторого критического размера (~100 нм) [9, 10]. Показано также, что дисклинации являются неотъемлемым атрибутом пятерной симметрии в малых частицах [2, 9]. Наличие дискли-