

УДК 639.3

СБОРНЫЕ НЕСУЩИЕ КОНСТРУКЦИИ, ПОДВЕРГАЕМЫЕ ЦИКЛИЧЕСКОМУ НАГРУЖЕНИЮ. СОЗДАНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО-НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Панов А. Н.

Институт механики и надежности машин Академии наук, Минск, Беларусь
a.panov@tut.by

Остаточными напряжениями (ОН) называют напряжения в замкнутой системе, на которую не воздействуют внешние силовые факторы. Связанные с ОН внутренние силовые факторы находятся в равновесии. Наиболее широко используется классификация ОН предложенная Н.Н.Давиденковым (различие ОН в объемах, в которых эти напряжения уравниваются). Напряжения I рода (макронапряжения) уравниваются в объеме всего образца, детали или сборочной единицы. Причиной возникновения ОН являются:

- неоднородная пластическая деформация монолитного объема (термическая обработка, сварка, обработка резанием, холодная деформация и др.);
- сборочные операции между несколькими объемами (сварка, нанесение защитного покрытия, диффузия, сборка конструкций; натяжение при намотке, сушка, охлаждение и усадка композитов и др.).

Что касается применения ОН в искусственных объектах, то широкое распространение получили различные методы упрочнения деталей, а также усиление конструкций методами регулирования напряжений. Классификация методов искусственного регулирования напряжений в металлоконструкциях представлена в работе [1]. Можно видеть, что искусственное регулирование напряжений осуществляется двумя методами без использования высокопрочных элементов (изменение первоначальной схемы нагружения, применение контргрузов, выгиб конструкции, изменением уровня опор, введение предварительно сжатых стержней и др.), и с использованием предварительно напряженных высокопрочных элементов (затяжек; шпренгелей; вант, подвергнутых предварительному напряжению и др.).

В работе [2] рассматриваются вопросы сопротивления усталости многоэлементных предварительно напряженных машиностроительных конструкций (стантин металлургического оборудования, скрепленного затянутой лентой). Влияние ОН на сопротивление усталости, живучесть, размеры и форму, а также устойчивость металлоконструкций строительных и дорожных машин рассматриваются в работах [1-4].

Резервы повышения сопротивления усталости несущих конструкций, работающих при переменных напряжениях, кроются в таком свойстве, как чувствительность металлов к асимметрии цикла переменных напряжений. Указанное свойство характеризуется коэффициентом чувствительности металла к асимметрии цикла

$$\varphi_{\sigma} = \frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_s}$$

где σ_{-1} , σ_0 – пределы выносливости при симметричном и отнулевом циклах нагружения соответственно. Значения φ обычно находятся в пределах 0,1...0,2 для углеродистых сталей и 0,2...0,3 для легированных. Указанный параметр можно использовать в первом

приближении и при оценке влияния остаточных напряжений (погрешность возникает при условии протекания пластических деформаций).

Степень влияния остаточных напряжений на выносливость сварных соединений и сборных конструкций можно оценить следующим образом

$$\sigma_a = \sigma_{-1} - \varphi_\sigma \sigma_m,$$

где σ_a – предельная амплитуда напряжений; σ_m – среднее напряжение цикла, при этом величина остаточных напряжений $\sigma_{ост} = \sigma_m$.

Для сталей марок Ст3 или низколегированной при растяжении-сжатии $\varphi = 0,2 \dots 0,3$, а отношение $\sigma_{ост} / \sigma_{-1} = 1 \dots 1,5$ (и более). В зависимости от типа соединения, а также наличия конструктивных концентраторов, предел выносливости может снижаться на 20...50 %. Технологические методы позволяют снижать отрицательный эффект влияния растягивающих напряжений. При этом σ_a и σ_{-1} принимают значения характеристик, полученных на стандартных образцах с учетом коэффициентов влияния конструкторско-технологических факторов зоны разрушения конструкции, либо оцененных на локальных моделях [4].

Необходимо отметить четыре немаловажных аспекта использования резерва повышения ресурса конструкций. Во-первых, это наличие конструкторско-технологических ограничений; во-вторых, сложность конструкций создает множество вариантов реализации способов; в третьих, не достаточная разработанность расчетных методов оценки величин ОН в сложных конструкциях (в отличие от экспериментальных методов), и, наконец, в четвертых, отсутствие достаточно простых и широко используемых методов расчета технико-экономической эффективности в эксплуатации принятия того или иного технического решения. Рассмотрим их ниже.

К конструкторско-технологическим ограничениям можно отнести: реализуемость технологических процессов создания ОН; не превышение пределов текучести, выносливости, характеристик потери устойчивости для элементов конструкции; условия не раскрытия стыка, не снижения пределов выносливости для болтовых и заклепочных соединений и др.; обеспечение определенного закона распределения суммарных напряжений при рабочей нагрузке.

Что касается учета сложности конструкции и множества вариантов реализации способов, можно отметить следующее. Для выбора наилучшего варианта в заданных условиях необходимо использовать методы оптимизации несущих конструкций, в том числе, с учетом ОН.

К сожалению, в существующей практике не используется в достаточной мере оптимизация с целью достижения максимальной эффективности использования того или иного конструкторско-технологического варианта. Имеющиеся методы страдают двумя основными недостатками. Сложностью ручного счета при отсутствии широко апробированных программных средств и необходимостью множества числовых значений, которые крайне сложно "заставить" искать разработчика конструкции.

Рассмотрим еще один немаловажный аспект-методику оценки ОН в конструкциях. Создание расчетных методов оценки ОН в несущих конструкциях представляет собой самостоятельную задачу и, в отличие от экспериментальных методов, разработаны недостаточно. Тем не менее, на стадии проектных расчетов конструкций без них не обойтись.

Проектная идеология расчета в дополнение к экспериментальной методике должна состоять в следующем (рис.1). Блоки, выделенные двойной рамкой, по-видимому, являются основополагающими. Необходимо отметить, что, согласно литературным данным, влияние средних напряжений на сопротивление усталости (предел выносливости) болтовых соединений не существенно для болтов из мягкой стали с нарезанной

резьбой при растяжении и при растяжении с изгибом для болтов различных классов прочности. Для заклепочных соединений, как показали исследования, асимметрия цикла нагружения при растяжении с изгибом несущественно влияет на предел выносливости одиночной заклепки. И, тем не менее, нельзя считать данные утверждения верными для всех значений поскольку необходимо учитывать влияние деталей стыка, а также, что напряжение затяжки болтов (усадки заклепок) существенно проявляется на сопротивлении усталости крепежа особенно для крайних значений и при раскрытии стыка. Поэтому при создании остаточных напряжений от сборки к оценке перегрузки крепежа необходимо относиться предельно внимательно.

Рассмотрим предлагаемую концепцию создания предварительного-напряженного состояния в сборных конструкциях, подвергасмых циклическому нагружению.

Цель – создание методики, позволяющей получить экономический эффект при эксплуатации технического объекта за счет использования резервов конструкции (подвергаемой в эксплуатации циклическому нагружению и определяющей ресурс технического объекта) путем создания остаточных напряжений от сборки. Обобщенный алгоритм указанной методики представлен на рис. 2. Даже предварительный просмотр алгоритма позволяет сделать вывод о необходимости системного подхода к разработке конструкции, а также наличия многочисленных наработок расчетного и экспериментального характера, квалифицированных кадров и программно-аппаратных средств, в том числе, баз данных и знаний.

Важным моментом в создании программных средств является удобство для пользователя. Дело в том, что расчетчику-прочности необходимо решать как прямую, так и обратную задачи создания благоприятного распределения сборочных напряжений. Под прямой задачей понимается задача оценки эффективности заданного варианта изменения конструкции при известных ограничениях. Обратная задача - задача выбора величины остаточных напряжений по заданной величине изменения благоприятного фактора (например, повышение ресурса) и проверки выполнения ограничений.

Рассмотрим проблему моделирования и управления остаточными напряжениями в несущих конструкциях транспортных средств. Причиной возникновения остаточных напряжений I рода (ОНС) является применяемый в авто- и авиастроении метод упругой (или силовой) сборки несущих элементов с использованием крепежа (заклепки, болты и т.п.). Данный метод представляет собой один из способов технологической компенсации погрешностей изготовления несущих элементов, обладающих малой жесткостью. ОНС имеют случайный характер; при их суммировании с эксплуатационными увеличивается среднеквадратическое отклонение долговечности конструкции. Благоприятное же с позиций усталости распределение ОНС, как правило, позволяет увеличить ресурс.

Проблема моделирования при проектировании продукции, процессов сборки и использования благоприятного эффекта на циклическую долговечность еще далека от решения. В частности, отсутствуют рекомендации и методики: по назначению предельных отклонений соединяемых податливых элементов сборных конструкций, экспериментального измерения и расчета сборочных напряжений в зонах стыков имеющих концентрации напряжений (отверстия под заклепки, болты), оценка которых возможна, например, только методом конечных элементов; каким образом за счет технологического процесса сборки снижать отрицательное влияние растягивающих либо повышать влияние сжимающих напряжений на ресурс конструкций, в случае если имеется множество потенциальных зон повреждений конструкции. Остается открытым и вопрос релаксации напряжений в случае воздействия на конструкцию при эксплуатации циклического нагружения.

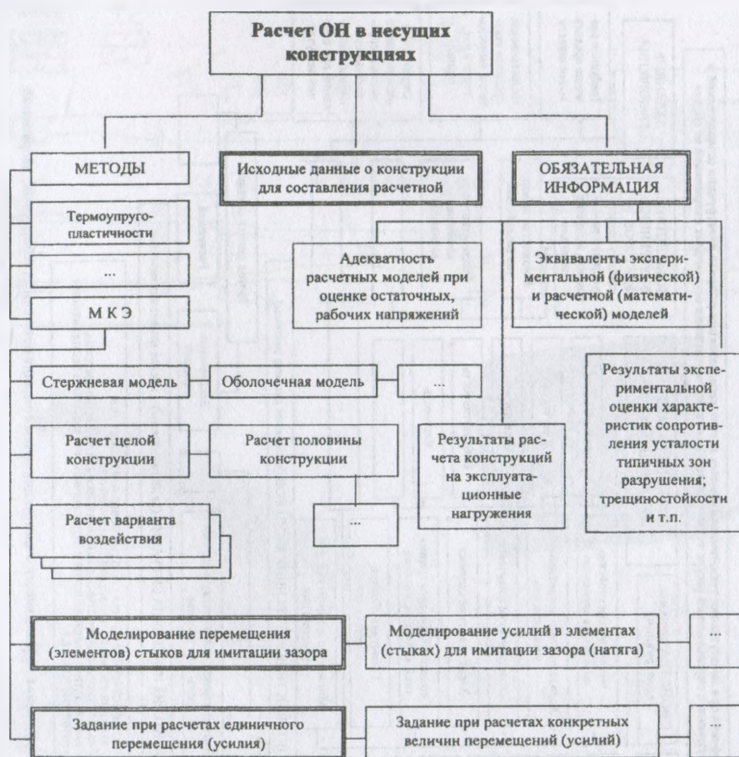


Рис.1. Проектная идеология расчета остаточных напряжений в несущих конструкциях.

Объектом исследования являлись рамы автомобиля (рис.3.1) большой грузоподъемности (типа трехосных тягачей). Для экспериментального определения ОНС в элементах (в зонах зарождения усталостных трещин), а также внутренних силовых факторов (ВСФ) в крепеже использовался метод тензометрии.

Первая задача – изучить причину возникновения ОНС в раме при ее сборке согласно технологическому процессу. При этом варьировали длину и расположение (угол относительно номинального) поверхностей кронштейнов внутренних поперечин.

Вторая задача – ответить на вопрос, релаксируют ли до нуля ОНС в результате циклического нагружения. Рамы, имеющие предельные повреждения – трещины на элементах, после испытания на стенде разрезали по лонжеронам или по внутренним поперечинам.

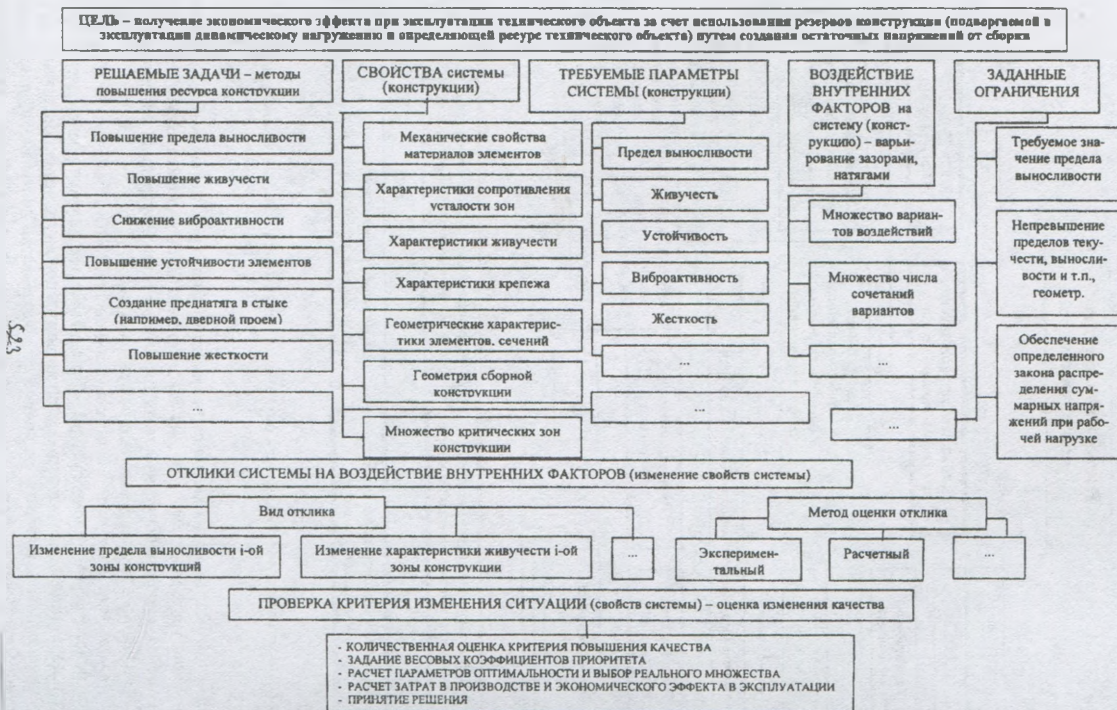


Рис. 2. Обобщенный алгоритм повышения эффективности конструкции путем создания остаточных (сборочных) напряжений

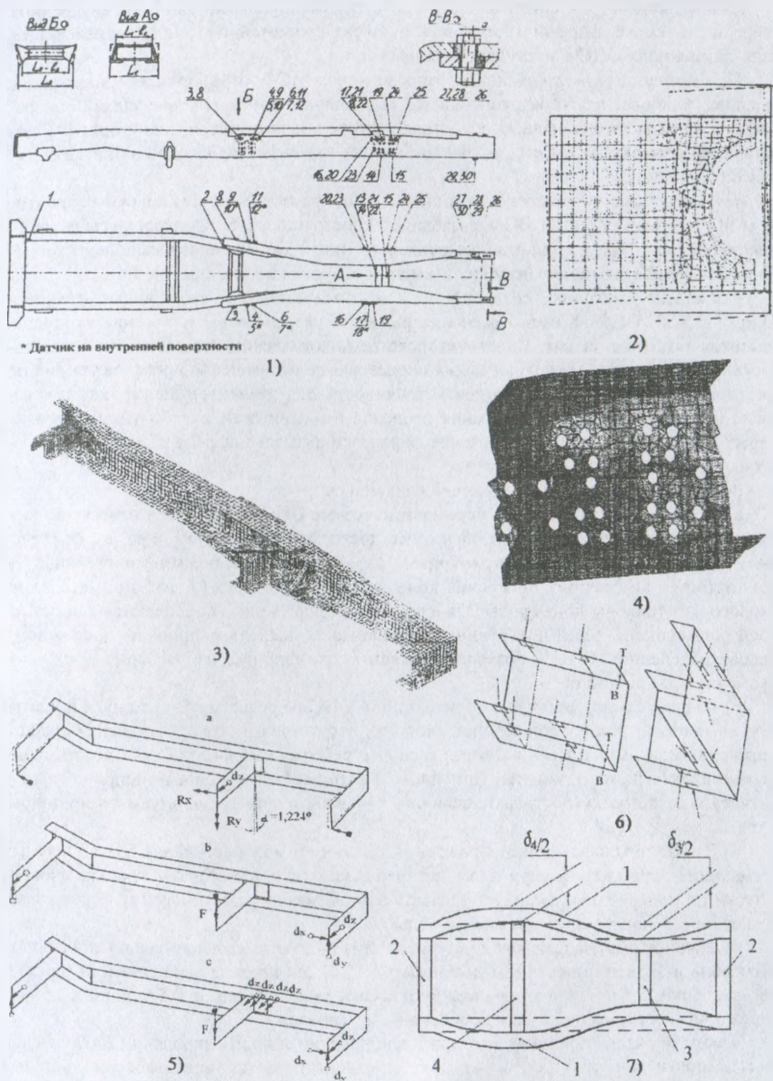


Рис. 3. Физическое и математическое моделирование ОНС

Третья задача – исследовались рамы с рекомендуемыми длинами внутренних поперечин, а также формой и расположением их кронштейнов (рис.3.1) с целью создания сжимающих ОНС в зонах зарождения трещин.

При решении *четвертой задачи* определялись ВСФ от сборки, возникающие в заклепках, наиболее часто разрушающихся в эксплуатации (крепление задней поперечины и т.д.). Для этого была разработана методика и тензометрический болт [4], позволяющий измерять осевые силы и изгибающие моменты, действующие на заклепку при монтаже рамы.

Пятая задача – совершенствование методики расчета методом конечных элементов (МКЭ) величин ОНС и ВСФ в сложных конструкциях. В процессе исследований моделировалось три варианта нагружения (рис.3.5), оценивалось напряженно-деформированное состояние несущих элементов и крепежа (рис. 3.3, 3.4, 3.6).

Разработка методик создания и оптимизации (в том числе технико-экономической) ОНС за счет изменения размеров, формы и расположения входящих элементов – шестая задача. Конструкторско-технологическим ограничением этого являлось: реализуемость технологических процессов; не превышение пределов текучести, выносливости, характеристик потери устойчивости для элементов конструкции; условие не раскрытия стыка, не снижения пределов выносливости для болтовых и заклепочных соединений и др.; обеспечение определенного закона распределения суммарных напряжений при рабочей нагрузке.

Результаты исследований показали следующее:

а) ОНС на кромках полок и нормальные осевые ОНС на стенках у отверстий лонжеронов распределены сложным образом и достигают в исследуемой раме с фактическими размерами рабочих; суммарный зазор между стенками лонжеронов и кронштейнами внутренних поперечин колеблется от нуля и до 1,5 толщин металла из которого изготовлены лонжероны. Отмеченные деформации определяются как геометрией лонжеронов, так и поперечин, а варьирование последних приводит к сложному перераспределению ОНС и позволяет выявить как наиболее неблагоприятные, так и рекомендуемые сочетания.

б) В раме после циклических испытаний ОНС не релаксируют до нуля и достигают на кромках полок лонжеронов, в зонах отсутствия и распространения трещин (осевые нормальные поперек развития трещин) рабочих напряжений, что может существенно влиять на их развитие. При этом линейные деформации по ширине рамы в результате ее разрезки достигают величин, равных толщине используемого листового металла.

в) В потенциальных зонах зарождения трещин возможно создание благоприятных сжимающих напряжений, при этом нет необходимости ужесточать технологические допуски на поперечины, а следует задавать зазоры между стыкуемыми поверхностями лонжеронов и поперечин в локальных областях.

г) Наибольшие растягивающие усилия и моменты в заклепке соединения полок лонжерона и задней поперечины достигают 7-15 % от предела выносливости одиночной заклепки, а величина зазора между полками уменьшается от 0,5 толщины применяемого для изготовления полки поперечины материала.

Таким образом, показано, что при планировании и прогнозировании циклической долговечности конструкций, в которых предусматривается использование упругой сборки как метода технологической компенсации погрешностей изготовления, необходимо учитывать и управлять ОНС.

Рассмотрим задачу принудительной релаксации остаточных напряжений в сборных несущих конструкциях.

Для снижения величин ОНС рекомендован способ [4], отличающийся тем, что собранную раму (рис.3.7, где δ – отклонения длин поперечин от величины, требуемой

для сборки конструкции без создания ОНС) одновременно нагревают локально в частях поперечин имеющих наименьшее поперечное сечение, до температуры не ниже температуры рекристаллизации и не выше верхнего предела температуры горячей обработки давлением материала поперечины (для стали 700...1300° С), при этом ширину зоны нагрева h определяют по предложенному выражению

$$h \geq |KY / (1 - K)|,$$

где K – коэффициент допустимого изменения площади сечения поперечины в зоне нагрева (рекомендуется $1,25 \geq K \geq 0,8$); Y – сумма полей допусков на длину поперечины и кривизну лонжеронов.

Управление остаточными напряжениями с учетом множества зон повреждений в сборных конструкциях представляет собой особую задачу.

Предложен способ [4] сборки, включающий соединение элементов конструкции при предварительном выбранных отклонениях отдельных элементов для обеспечения создания в них сжимающих напряжений, формирование вариантов сборки с различными номинальными размерами, формой и расположением элементов в заданных геометрических пределах, измерение нагруженности в возможных зонах разрушения, оценку для каждой зоны величину предела выносливости и сопоставление ее с допустимой величиной, выбор варианта сборки, для которого величина I , определяемая по формуле:

$$I = \sum_{i=1}^n C_i \left(\frac{\sigma_{ai} - [\sigma_{a\min}]}{[\sigma_{a\min}]} \right) + \sum_{j=1}^k C_j \left(\frac{\sigma_{aj} - [\sigma_{a\min}]}{[\sigma_{a\min}]} \right),$$

принимает наибольшее значение, где: i, j – число типичных зон разрушения, лимитирующих и не лимитирующих долговечность конструкции; σ – значение предела выносливости зоны, полученное в результате варианта сборки; σ_{\min} – минимальное значение предела выносливости зоны, обеспечивающее требуемую долговечность конструкции; C_i, C_j – весовые коэффициенты приоритета для каждой зоны, причем

$$\sigma_{ai} - [\sigma_{a\min}] \geq 0$$

$$\sigma_{aj} - [\sigma_{a\min}] \geq 0$$

Для оценки экономической эффективности предложено выражение (коэффициент экономической эффективности), достаточное для данного этапа разработки конструкции,

$$\mathcal{E}_v = (K_{RN} / K_{RN}) - 1,$$

где K_{RN}, K_{RN} – соответственно, коэффициенты увеличения ресурса и трудоемкости изготовления (при $\mathcal{E}_v < 0$ отсутствие экономического эффекта).

Для реализации способа предложены алгоритмы и программное обеспечение прямой и обратной задачи. Под прямой задачей понимается оценка эффективности заданного варианта изменения конструкции при известных ограничениях. Под обратной – выбор величины остаточных напряжений по заданному изменению благоприятного фактора (например, повышение ресурса) и проверка выполнения ограничений (в том числе допускаемых значений ВСФ для крепежа).

Рассмотрим еще один немаловажный аспект-методику расчетной оценки ОН в конструкциях. Создание расчетных методов оценки ОН в несущих конструкциях представляет собой самостоятельные задачи и, в отличие от экспериментальных методов разработаны недостаточно. Тем не менее, на стадии проектных расчетов конструкций без них не обойтись. Нельзя считать, что влияние средних напряжений, а значит и сборочных, на сопротивление усталости (предел выносливости) болтовых соединений и

заклепочных соединений не существенно. Необходимо учитывать влияние деталей стыка, а также, что напряжение затяжки болтов (усадки заклепок) существенно проявляется на сопротивлении усталости крепежа особенно для крайних значений и при раскрытии стыка.

Поэтому при создании остаточных напряжений от сборки к оценке перегрузки крепежа необходимо относиться предельно внимательно. Объектом исследования являлась рама (седельного тягача). Целью проводимых исследований являлось создание расчетной конечноэлементной модели, позволяющей осуществить оценку напряженно-деформированного состояния несущей конструкции, подвергнутой упругой сборке. Причем такой сборки, которая позволяет создать сжимающие напряжения на поверхности в зоне зарождения трещин. В качестве примера исследовалась зона соединения лонжерона с четвертой поперечиной рамы (зона наиболее вероятного зарождения трещин между отверстиями на стенке лонжерона).

Создана [4] конечноэлементная модель, позволяющая оценивать напряженно-деформированное состояние несущей конструкции, подвергнутой упругой сборке. В качестве примера исследовалась зона соединения лонжерона с четвертой поперечиной рамы (зона наиболее вероятного зарождения трещин между отверстиями на стенке лонжерона). Модель (конечными элементами пакета ANSYS) части рамы (рис.3.2) выполнялась с повторением реальных размеров. Конструктивные элементы рамы из листового проката моделировались оболочечными, трубчатые и прутковые профили (в том числе тела болтов и заклепок) - трехмерными балочными элементами, имеющими характеристики реальных профилей и т.д. К особенностям конечноэлементной модели необходимо отнести следующее:

- а) для осуществления взаимодействия между двумя контактирующими поверхностями (в зоне кронштейна 4-й поперечины и стенки лонжерона) и предотвращения их взаимопроникновения использовались GAP-элементы; они характеризуются тем, что их жесткость при работе на сжатие больше, чем у конструктивных элементов и равна нулю при растяжении;
- б) стенка лонжерона, контактирующая со стенкой усилителя, а также стенка и полка лонжерона в сопряжении с кронштейном поперечины N 3 и полками поперечины N 5 моделировались вместе плоскостью увеличенной толщины;
- в) модель заклепки состояла из двух восьмиугольных областей, выполненных по размеру головки заклепки и разбитых на 8 треугольных элементов с толщиной большей, чем у соединяемых поверхностей, и балочного элемента, соединяющего центры этих областей и имеющего характеристики сечения такие же, что и у тела заклепки.

В процессе исследований моделировалось остаточные напряжения тремя вариантами нагружения.

Первый случай нагружения. Исследуемая поперечина и стенка лонжерона выполнены под углом (соответствует 5 мм линейного перемещения). На соседние поперечины прикладывались перемещения для обеспечения требуемой геометрии рамы.

Второй случай нагружения. На удаленную зону исследуемой поперечины накладывались перемещения обеспечивающие смещение точек исследуемой зоны на 5 мм.

Третий случай нагружения аналогичен второму, плюс дополнительные ограничения на перемещения нижней зоны поперечины.

В результате получены значения напряжений эквивалентных составляющих вдоль осей X, Y, на наружной и внутренней поверхностях, а также по средней линии; внутренних силовых факторов в крепеже, деформации стенки лонжерона (рис.3.2, 3.3, 3.4, 3.6). Анализ напряжений на наружной поверхности лонжерона позволяет сделать вывод, что в зонах зарождения трещин между близко расположенными заклепками верхнего ряда получены МКЭ сжимающие напряжения величиной от -3 до -30 МПа (что с

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

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-