

**Исследование локального напряженного состояния и оценка
долговечности конструкции авиационного изделия
с дискретными сварными соединениями при случайном
нагружении**

Рыбаулин А.Г.,* Сидоренко А.С. **

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский универси-
тет), Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

**e-mail: artcomj@gmail.com*

***e-mail: k906@mai.ru*

Аннотация

Представлены методика численного моделирования и данные расчетной оценки характеристик напряженного состояния при случайной вибрации конструкции авиационного изделия с точечными сварными соединениями. Сварные соединения моделируются с учетом изменения механических свойств материала в зоне сварного контакта. Рассматривается действие случайной кинематической нагрузки в условиях эксплуатации изделия на внешней подвеске маневренного носителя. Получены спектральные характеристики и уровни вибронапряжений в различных точках конструкции изделия. Определены зоны максимальных напряжений в конструкции и выявлены особенности динамического напряженного состояния в сварных соединениях. Для оценки долговечности сварного соединения на основе полученных спектральных плотностей и алгоритмов статистического моделирования построены временные реализации случайного процесса напряжений.

Ключевые слова: авиационное изделие, конструкция, крыло, сварное соединение, точечная сварка, метод конечного элемента, оболочка, напряженное состояние, виброускорение, вибронапряжение, спектральная плотность, сопротивление усталости.

Введение

Соединение деталей с помощью точечной сварки применяется в несущих конструкциях летательных аппаратов (ЛА), выполненных как из сталей, так и легких сплавов. Ее основными преимуществами по сравнению с клепкой является повышение производительности сборки в 3-5 раз. С помощью точечной сварки можно соединять детали с существенно различающимися толщинами металла, а также пакет из нескольких листов.

В результате сравнительных испытаний образцов со сварными и заклепочными соединениями на усталость установлено, что предел выносливости точечных сварных соединений может быть ниже предела выносливости аналогичных заклепочных соединений. Эти свойства объясняются значительно более высокой концентрацией напряжений в сварном соединении, а также уменьшением неослабленного сечения листа, связанного с большим поперечным размером сварной точки по сравнению с заклепкой при равной ширине образца [1, 2]. Усталостные трещины возникают между свариваемыми листами на контуре сварной точки. В дальнейшем трещина распространяется по толщине в перегретом участке околошовной зоны и выходит на поверхность листов.

Подобные данные могут быть использованы лишь для предварительной оценки прочностных характеристик сварного соединения в реальных конструкциях, так как они получены в основном для плоских образцов из листового материала и не позволяют оценить влияние изгибной и крутильной жесткости соединяемых конструктивных элементов на прочностные характеристики соединения. Помимо этого, для получения более обоснованных количественных результатов необходимо учитывать механические характеристики материалов соединяемых деталей.

Таким образом, для обоснованной оценки прочностных характеристик точечного сварного соединения в реальной конструкции следует проводить экспериментальные исследования на натурных или модельных конструкциях. Наиболее сложной задачей здесь является определение характеристик локального напряженно-деформированного состояния (НДС) в зонах сварных точек, а так же учет механических и жесткостных свойств материала в этих зонах. В силу высокой сложности и стоимости экспериментальных исследований с использованием натурных конструкций или физических моделей наиболее рациональным путем решения этой задачи в настоящее время является использование математических моделей с использованием метода конечных элементов (МКЭ). В публикациях [3, 4] оценка долговечности на основе МКЭ проводится для относительно простых моделей точечного сварного соединения, содержащих одну или две сварные точки. При этом рассматривается однокомпонентное регулярное циклическое нагружение (растяжение или сдвиг). В тоже время наибольшую сложность представляет исследование напряженного состояния в реальных многоточечных сварных соединениях при

случайной вибрации, характерной для режимов эксплуатации ЛА.

Целью настоящей работы является исследование локального напряженно-деформированного состояния несущей конструкции авиационного изделия в зонах сварных соединений, а так же формирование реализаций случайных приведенных процессов напряжений, которые необходимы для оценки усталостной долговечности при действии случайной эксплуатационной вибрации. В отличие от известных работ здесь исследования проводятся на основе методики моделирования напряженного состояния многоточечного сварного соединения в реальной конструкции при нерегулярном (случайном) нагружении. Далее проводится уточненное моделирование напряженного состояния для наиболее нагруженных точек. Предложена новая методика моделирования, в которой сварная точка разделяется на отдельные зоны с учетом изменения свойств основного материала при сварке, для чего используются эмпирические соотношения между микротвердостью и пределом текучести.

Разработанные численные модели напряженного состояния изделия могут быть использованы для оценки динамического состояния и вибрационной прочности изделий с точечными сварными соединениями при различных видах и условиях эксплуатационного нагружения (гармонического, полигармонического, случайного узко- и широкополосного).

Постановка задачи

Рассматривается несущая конструкция авиационного изделия, которая представляет собой тонкостенную цилиндрическую оболочку, содержащую наполни-

тель, имитирующий массу изделия. На оболочке с помощью точечной сварки закреплены четыре плоскости расположенные крестообразно и симметрично относительно вертикальной плоскости под углом ± 45 градусов (рис. 1). Плоскость представляет собой штампованный каркас с обшивкой из тонкостенных листов стали, с массивными элементами в корне, а так же кронштейнов, с помощью которых крепится к оболочке посредством точечного сварного соединения. Точечное сварное соединение плоскостей с оболочкой выполнено в виде двух однорядных сварных швов (рис. 2). Конструкция изделия выполнена из жаропрочной стали.

При эксплуатации изделия на него действуют статические и динамические нагрузки, которые могут вызвать достаточно высокий уровень напряжений в зонах сварных точек, а так же вблизи нерегулярностей конструкции. На оболочке закреплены два узла подвески изделия к носителю (бугели), в которых случайные кинематические нагрузки. Нагрузки заданы в виде случайных широкополосных процессов ускорения, действующего на узлы подвески [5].

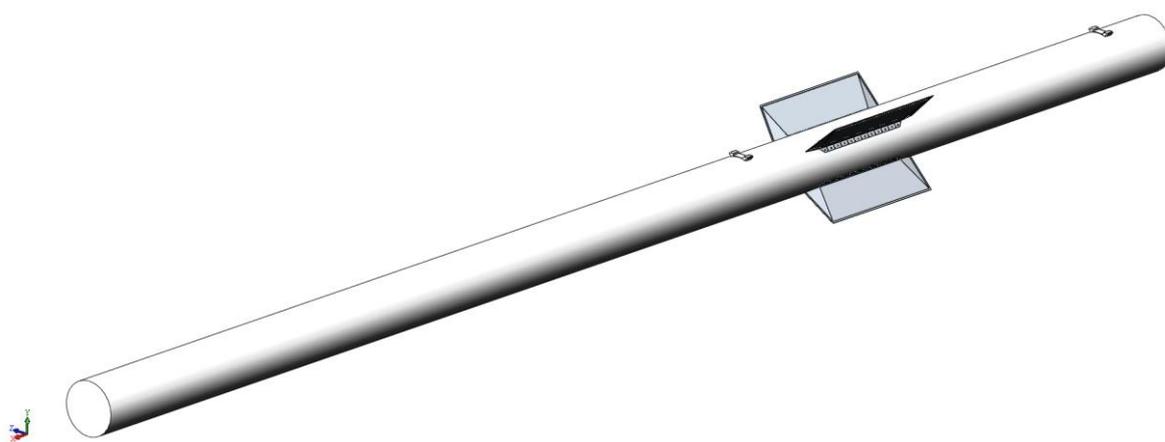


Рис. 1. Геометрическая модель изделия

Результаты разработки методики численного моделирования динамического и напряженно-деформированного состояний конструкции при действии эксплуатаци-

онного нагружения с учетом нерегулярностей (наличия сварных соединений и односторонних контактов), конструктивных особенностей узлов подвески изложены в статье [6]. Модели описывают пространственное движение конструкции и составляющие ее пространственного локального деформирования в зонах нерегулярностей.

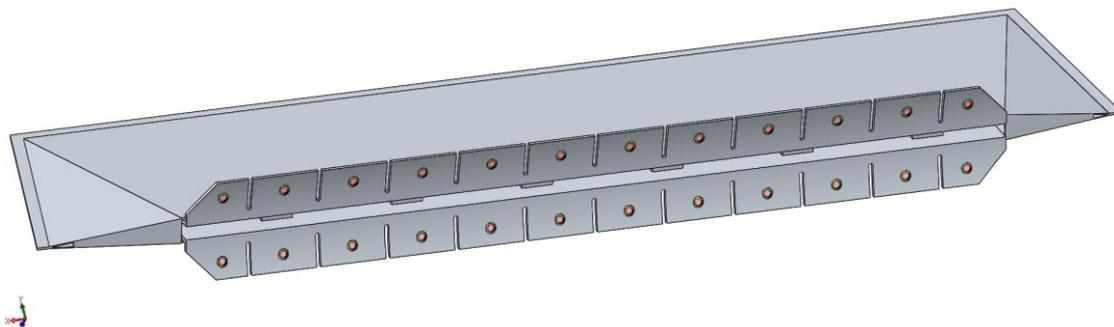


Рис. 2. Геометрическая модель плоскости

Для получения корректных и достоверных результатов НДС в зонах сварных соединений, а так же для оценки усталостной долговечности, разработанная ранее расчетная модель требует уточнения в зонах точечных сварных соединений.

Исходными данными являются геометрические характеристики конструкции и сварных соединений, условия ее закрепления и распределение массы, механические характеристики материалов, как в конструкции в целом, так и локально в зонах сварных соединений, а так же спектральные характеристики случайных процессов ускорения в узлах подвески.

Формирование численных моделей

Реализация приближенных расчетных методов при учете относительно большого числа форм колебаний, что необходимо при рассмотрении конструкции

изделия как нерегулярной оболочки с присоединенными узлами подвески, а так же содержащей точечные сварные соединения является весьма трудоемкой и сложной задачей. Для моделирования динамического НДС изделия в данной работе используется универсальная система твердотельного моделирования и конечно-элементного расчета сложных конструкций SolidWorks. Конечно-элементная модель (КЭМ) конструкции в системе SolidWorks строится в режиме диалога с использованием функционального меню [7, 8].

В качестве глобальной системы координат принята прямоугольная правосторонняя система координат. Начало координат расположено в центре окружности задней части конструкции. Ось X совпадает с продольной осью изделия и направлена по полету, ось Y направлена вверх.

Задний по полету узел подвески имеет жесткое закрепление по всем направлениям, а передний может смещаться только по направлению продольной оси конструкции.

При моделировании обеспечивается соответствие между КЭМ и реальной конструкцией изделия по следующим параметрам: по условиям закрепления, по геометрии, общей массе, положению центра масс и по величине момента массы относительно осей X и Z . При разработке расчётной модели наиболее подробно воспроизводятся жесткостные и массовые характеристики тех частей конструкции, через которые передаются динамические нагрузки и которые оказывают основное влияние на ее динамическое состояние. Демпфирующие свойства конструкции задаются модальным демпфированием. Модальное демпфирование определено в

качестве коэффициента критического демпфирования C_{cr} для каждой моды. Критическое демпфирование C_{cr} является наименьшей величиной демпфирования, при которой система возвращается в положение равновесия без колебаний.

КЭМ формируется с использованием конечных элементов типа SOLID (твердотельный объемный элемент) и SHELL (оболочечный элемент) второго порядка. Для построения конечно-элементной модели (КЭМ) оболочки изделия использованы элементы SHELL, для построения плоскостей и узлов подвески – элементы SOLID.

При моделировании воспроизводились характеристики сварного соединения, соответствующие условиям проведенных экспериментальных исследований [9].

Значения механических характеристик материала в зоне сварных точек далее корректировались по данным измерений микротвердости по диаметральному сечению сварных точек. Для этого использовалось соотношение для связи между пределом текучести $\sigma_{0,2}$ и твердостью на пределе текучести $H_{0,2}$ [10]:

$$\sigma_{0,2} = c \cdot H_{0,2}. \quad (1)$$

Здесь c - коэффициент пропорциональности, учитывающий переход от напряженного состояния на пределе текучести при растяжении к схеме напряженного состояния при вдавливании стального сферического индентора для измерения твердости [11]. При определении твердости на пределе текучести шар диаметром D вдавливают в поверхность испытуемого образца изделия нагрузкой P_1 таким образом, чтобы измеренный диаметр отпечатка был меньше $0,09D$ не более, чем на 5%, с выдержкой под нагрузкой в течение 1 с. После снятия нагрузки P_1

измеряют диаметр отпечатка, который должен измеряться в двух взаимно перпендикулярных направлениях и определяться, как среднее арифметическое результатов двух измерений. Производят последующее вдавливание нагрузкой P_2 так, чтобы измеренный диаметр отпечатка d превышал величину $0,09D$ не более, чем на 5%. По значениям P_1 и P_2 методом интерполяции определяют нагрузку на пределе текучести $P_{0,2}$. Твердость на пределе текучести $H_{0,2}$ в МПа определяют по таблицам 1 и 2 ГОСТ 22762-77 [11] или вычисляют по формуле:

$$H_{0,2} = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} = 156,9 \frac{P_{0,2}}{D^2}.$$

В связи с тем, что отношение упругой деформации к остаточной деформации в лунке с повышением предела прочности увеличивается, то абсолютное значение коэффициента c зависит от прочностных характеристик материала [12]. Так, для относительно мягких металлов ($\sigma_{0,2} < 78,5 - 500$ МПа) коэффициент $c < 0,333$, тогда как для более твердых металлов ($\sigma_{0,2} > 500 - 3825$ МПа) $c > 0,333$. Наиболее существенное увеличение коэффициента c наблюдается у металлов с пределом текучести больше 700 МПа [10].

В геометрической модели в местах точечных сварных соединений вырезались отверстия, которые далее заполнялись тремя цилиндрическими телами различных диаметров (рис. 3). Характеристики материалов этих тел устанавливаются в соответствии с распределением твердости по сварной точке [13] (рис. 4).

По данному распределению твердости по Викерсу (HV) были определены величины коэффициентов K_1 , K_2 , K_3 пересчета твердости на пределе текучести для переходной зоны, для зоны термического влияния и для зоны ядра сварной точ-

ки соответственно. Коэффициенты пересчета определялись как отношение осредненных значений твердости на кривой в каждой зоне сварной точки к значению твердости основного материала.

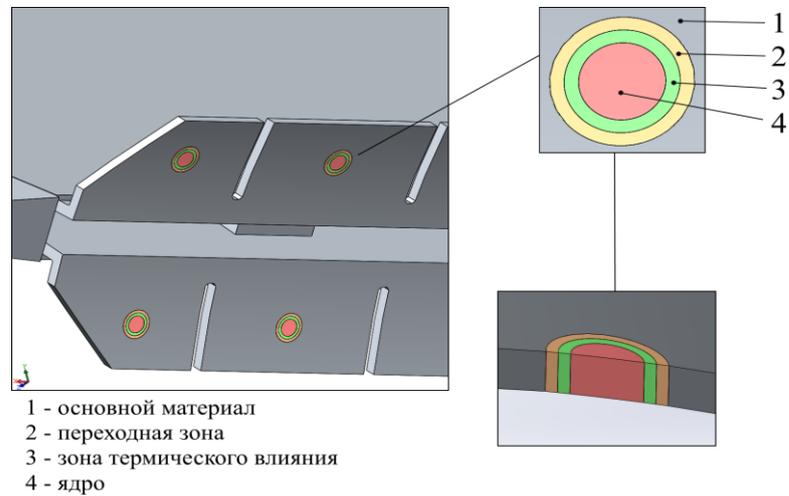


Рис. 3. Геометрическая модель сварной точки на плоскости

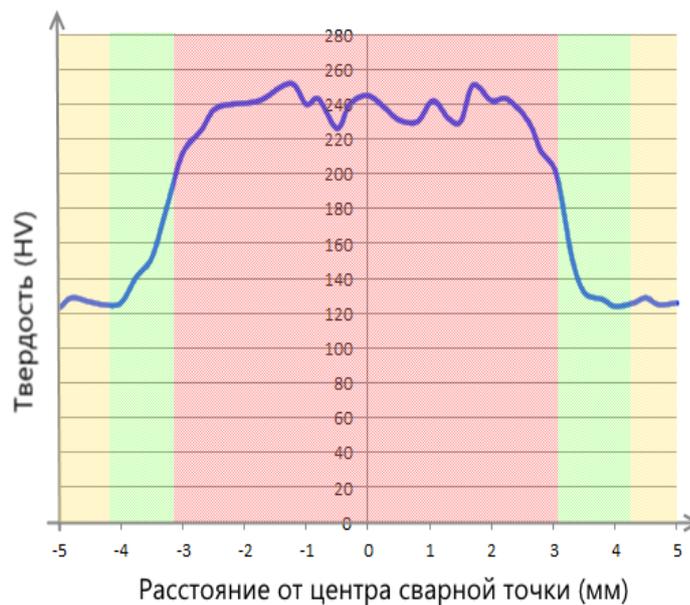


Рис. 4. Распределение твердости по сварной точке

Для рассматриваемой жаропрочной стали коэффициенты пересчета равны: $K_1 = 1,052$, $K_2 = 1,184$, $K_3 = 1,951$. Далее с использованием этих коэффициентов и эмпирической формуле по ГОСТ 22762-77 [11] пересчитывалась твердость материала на пределе текучести в различных зонах точечного сварного соединения:

$$H_{02_{1,2,3}} = H_{02} \cdot K_{1,2,3} . \quad (2)$$

Здесь $H_{02_{1,2,3}}$ величины твердости на пределе текучести для каждой зоны, $K_{1,2,3}$ - соответствующие коэффициенты пересчета.

По формулам (1) и (2) получен приведенный предел текучести материала в соответствующих зонах точечного сварного соединения (коэффициент пропорциональности принимался равным $c = 0.374$).

Построенные сварные точки на плоскостях соединялись контактным условием «связанные» с оболочкой, при котором компоненты не будут иметь взаимных относительных перемещений. Каждая из сварных точек содержит до 420 элементов SOLID второго порядка (до 350 элементов в объеме и до 70 элементов на поверхности контакта). Подробный вид КЭМ сварных точек представлен на (рис. 5).

При создании конечно-элементной модели (КЭМ) были использованы параметры КЭ сетки, представленные в таблице 1.

Дополнительно рассматривалась разбивка КЭ сетки элементами с максимальным размером 30 мм и минимальным 6 мм для подтверждения корректности моделирования. Модель имела 452143 узла и 247226 элементов. Относительное различие максимальных уровней напряжений, полученных при вычислениях для двух вариантов разбивки, не превышает 2%. Далее расчетные исследования проводились для параметров разбивки, приведенных в таблице 1. КЭМ конструкции изделия, построенная с использованием КЭ SOLID и SHELL и с автоматически генерируемой сеткой узлов показана на рис. 6.

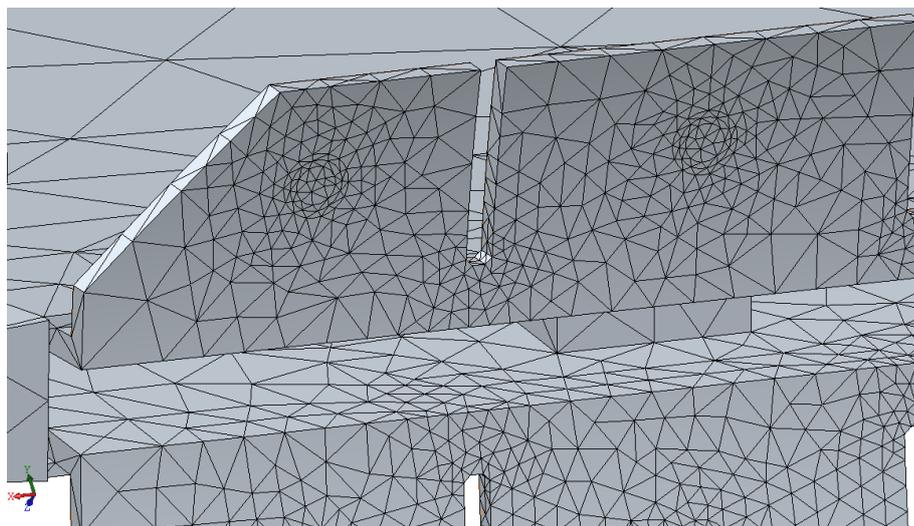


Рис. 5. Конечно-элементная модель сварных точек на плоскости

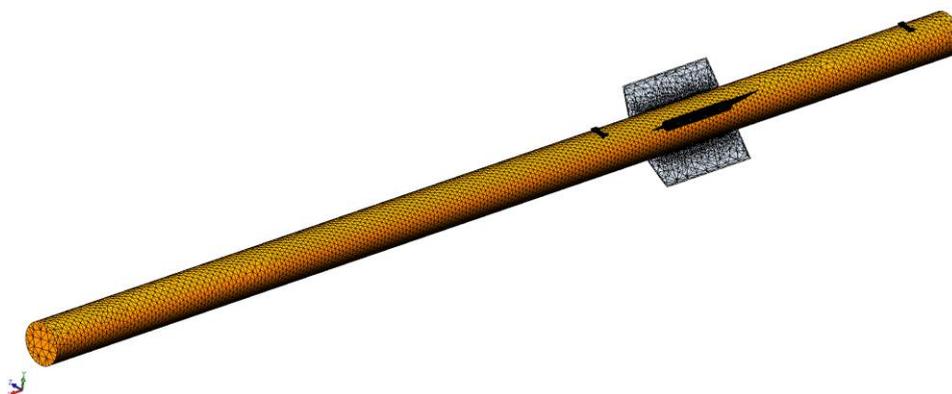


Рис. 6. Конечно-элементная модель конструкции изделия

На первом этапе расчета производится определение собственных форм и частот колебаний конструкции в диапазоне частот до 140 Гц, в котором задано кинематическое воздействие. Значения частот, соответствующих собственным формам приведены в таблице 2. Колебания конструкции сочетают формы характерные как для оболочки, так и балочные формы, при которых контур оболочки не деформируется. Две низшие частоты соответствуют преимущественно балочным изгибным формам колебаний. Более высоким частотам соответствует сочетание оболочечных и балочных форм изгиба и кручения [6].

Таблица 1

Тип сетки	Комбинированная сетка
Макс. размер элемента	50 мм
Мин. размер элемента	10 мм
Всего узлов	352974
Всего элементов	187593
Размер элементов точек сварки	1мм

Таблица 2

№	Частота, Гц	№	Частота, Гц	№	Частота, Гц	№	Частота, Гц	№	Частота, Гц
1	5.94	5	39.79	9	81.03	13	118	17	129.04
2	5.97	6	42.16	10	102.47	14	118.26	18	129.59
3	11.47	7	68.28	11	102.68	15	119.15	19	135.50
4	36.51	8	77.48	12	112.46	16	124.17	20	136.61

Результаты численного анализа

Динамический расчет конструкции выполняется с применением алгоритмов модального анализа для случайных процессов. В этом типе анализа используется разложение вектора узловых перемещений в ряд по собственным формам и последующее решение системы.

Расчеты выполнены для случая нагружения, при котором колебания конструкции вызываются кинематическим возбуждением в узлах подвески в форме стационарного случайного процесса ускорения с заданной спектральной плотностью.

Рассматривается модель процесса ускорения, соответствующая реальному эксплуатационному нагружению в диапазоне частот (0 – 140) Гц (рис. 7). Вероятностными характеристиками напряженного состояния конструкции, которые определялись в результате численного моделирования, являются среднеквадратические значения, спектральные плотности и дисперсии эквивалентных напряжений.

Результаты вычислений среднеквадратических значений (СКЗ) эквивалентных напряжений в узлах показаны на рис. 8-12. На рис.8 представлено распределение СКЗ эквивалентных напряжений в конструкции. Наиболее нагруженными местами конструкции являются зоны узлов подвески изделия. Максимальные значения среднеквадратических напряжений в узлах КЭМ конструкции наблюдаются в районе переднего узла подвески и составляют около 215 МПа.

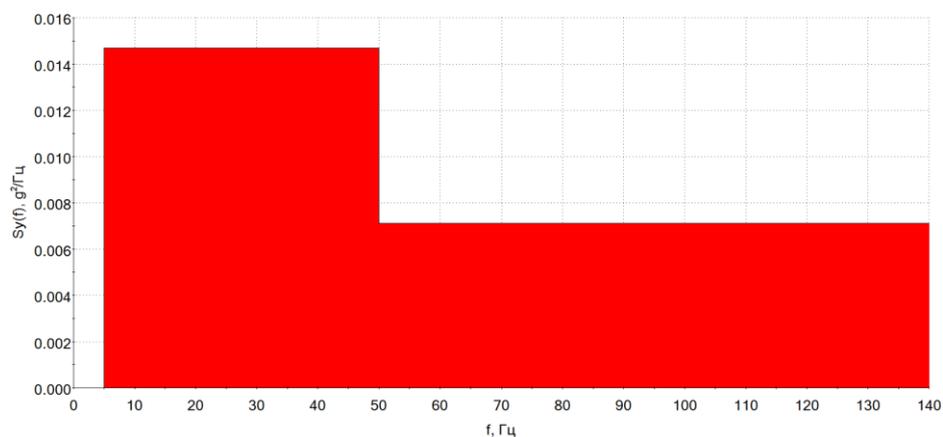


Рис. 7. Спектральная плотность ускорения

Распределение эквивалентных напряжений в сварных швах плоскостей проиллюстрировано на рис. 9. Получено, что СКЗ напряжений в сварных точках не превышают 168 МПа. На рис. 10 показаны СКЗ эквивалентных напряжений в узлах КЭМ для наиболее нагруженной сварной точки на плоскости с указанием номеров

узлов и значений напряжений в них. На рис. 11 показаны СКЗ напряжений в узлах по сечению крайней сварной точки.

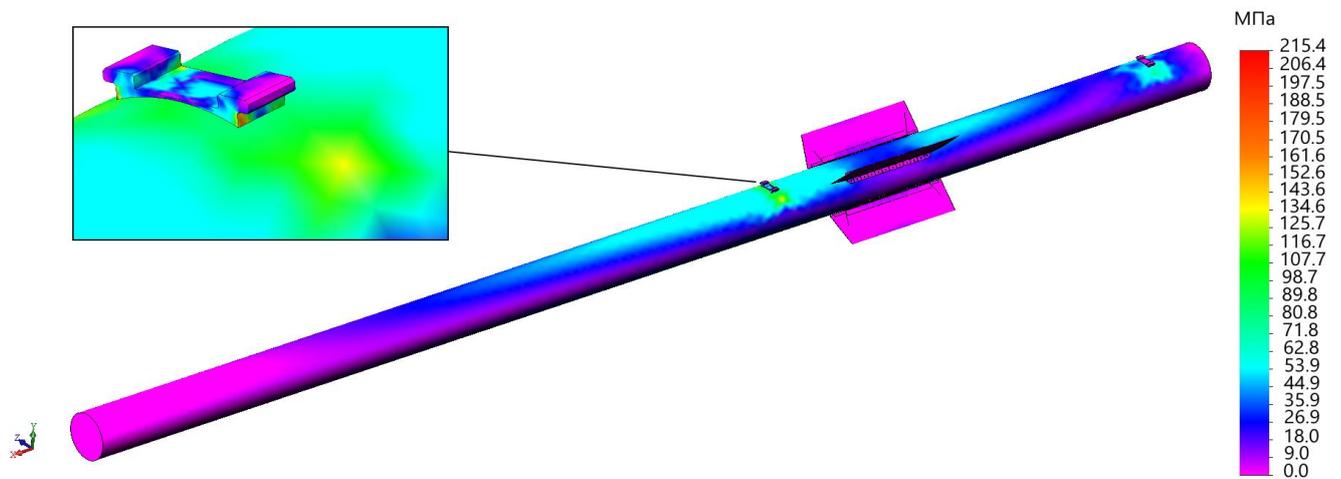


Рис. 8. Распределение СКЗ напряжений в конструкции

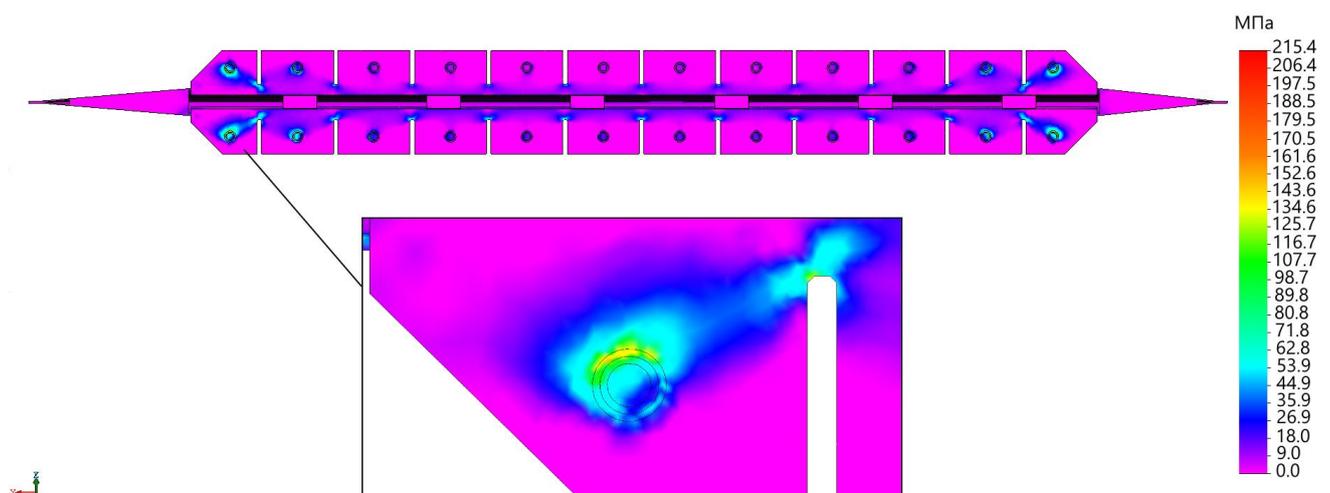


Рис. 9. Распределение СКЗ напряжений по сварному шву

График распределения СКЗ эквивалентных напряжений по наиболее нагруженной точке сварного шва приведен на рис. 12.

Исходя из результатов, приведенных на рис. 8-12 можно сделать вывод, что наибольшие значения СКЗ напряжений наблюдаются в переходной зоне контакта точечного сварного соединения, то есть практически по внешнему краю сварной

точки (рис. 3). Это соответствует данным публикаций [14, 15, 16], в которых на основании экспериментов показано, что разрушение в сварной точке, чаще всего происходит именно по краю сварной точки или с вырывом более тонкого материала по сварной точке, как показано на рис. 13.

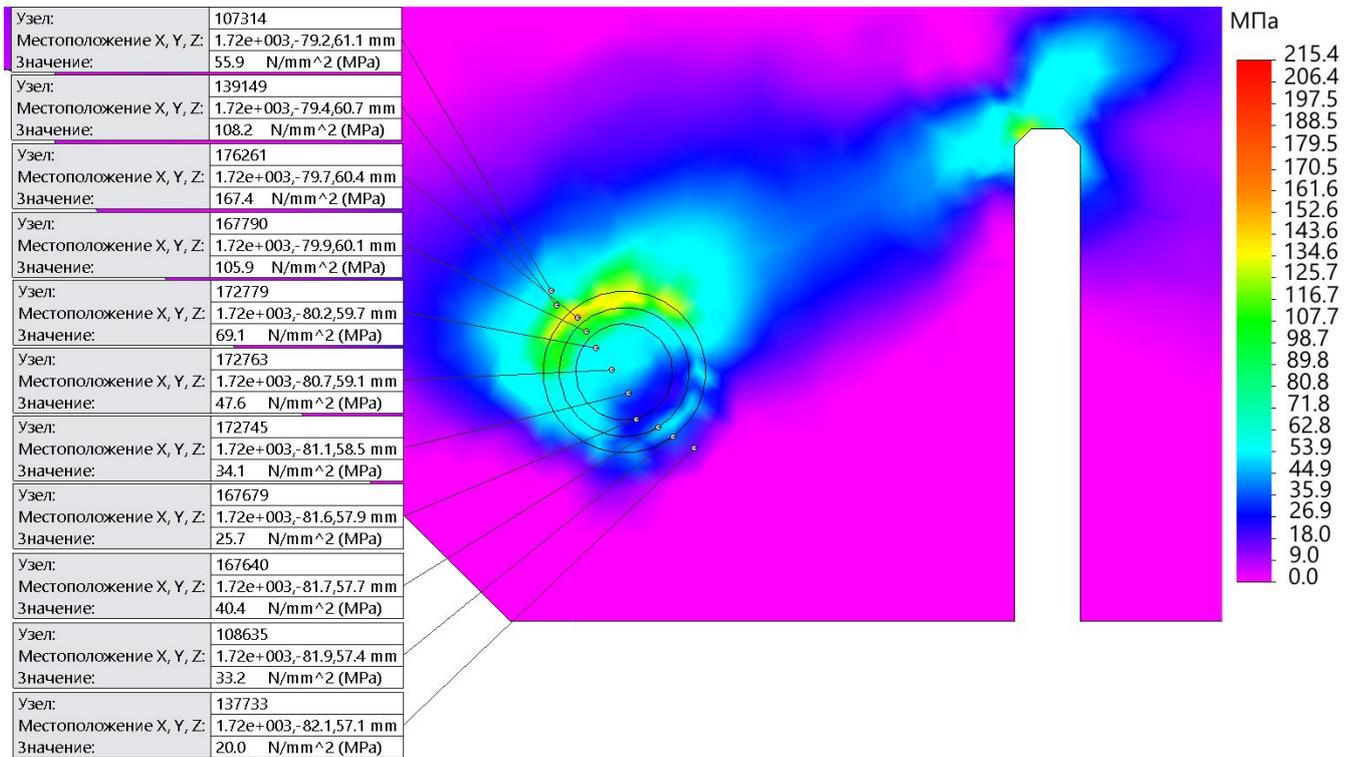


Рис. 10. Распределение СКЗ напряжений в сварной точке

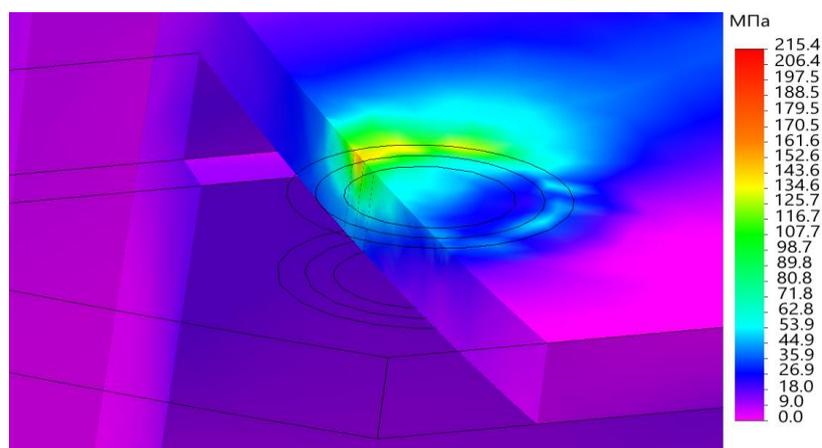


Рис. 11. Распределение СКЗ напряжений по сварной точке. Поперечное сечение по сварной точке плоскостью нормальной к поверхности элементов



Рис. 12. Распределение СКЗ напряжений по крайней сварной точке с указанием зон материалов (по рис. 3)

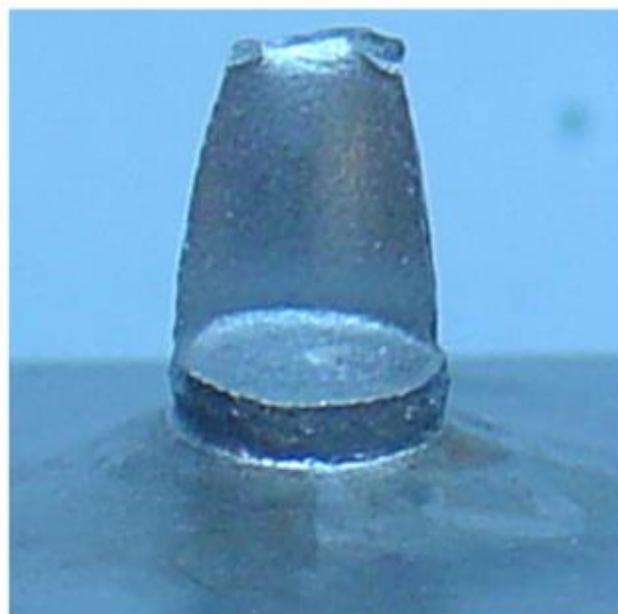
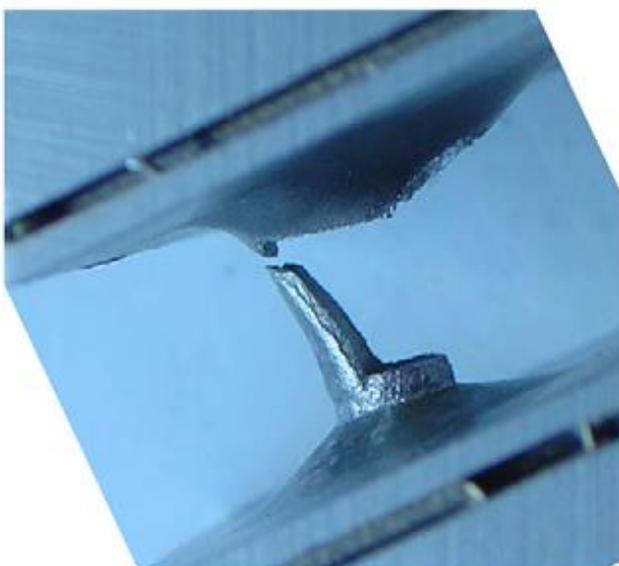


Рис. 13. Пример вырыва сварной точки из более тонкого металла

Спектральная плотность эквивалентных напряжений $S_{\sigma}(f)$, для наиболее нагруженного узла в крайней сварной точке (узел 176261), показана в полулогарифмическом масштабе на рис. 14 и в линейном масштабе - на рис. 15.

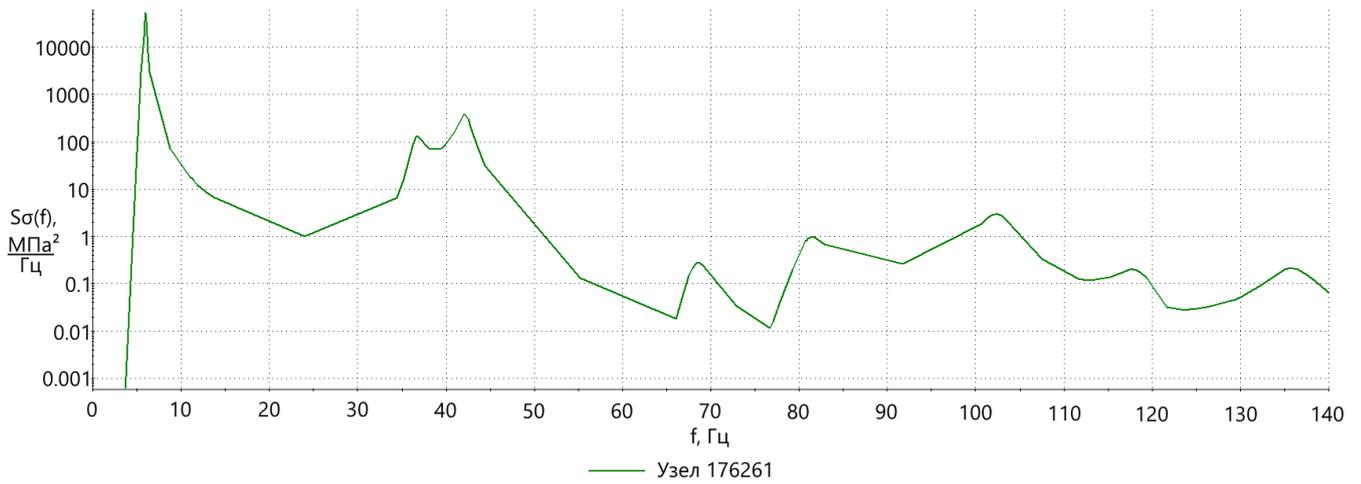


Рис. 14. Спектральная плотность напряжений в узле 176261 (полулогарифмический масштаб)

Распределение дисперсии напряжений $D_{\sigma}(f)$ по частотному диапазону в наиболее нагруженной сварной точке проиллюстрировано на рис. 16. По зависимостям рис. 14-16 видно, что процесс напряжений является узкополосным. Из рис. 14-16 видно, что основной вклад в дисперсию напряжения вносят ее составляющие, соответствующие трем нижним собственным формам.

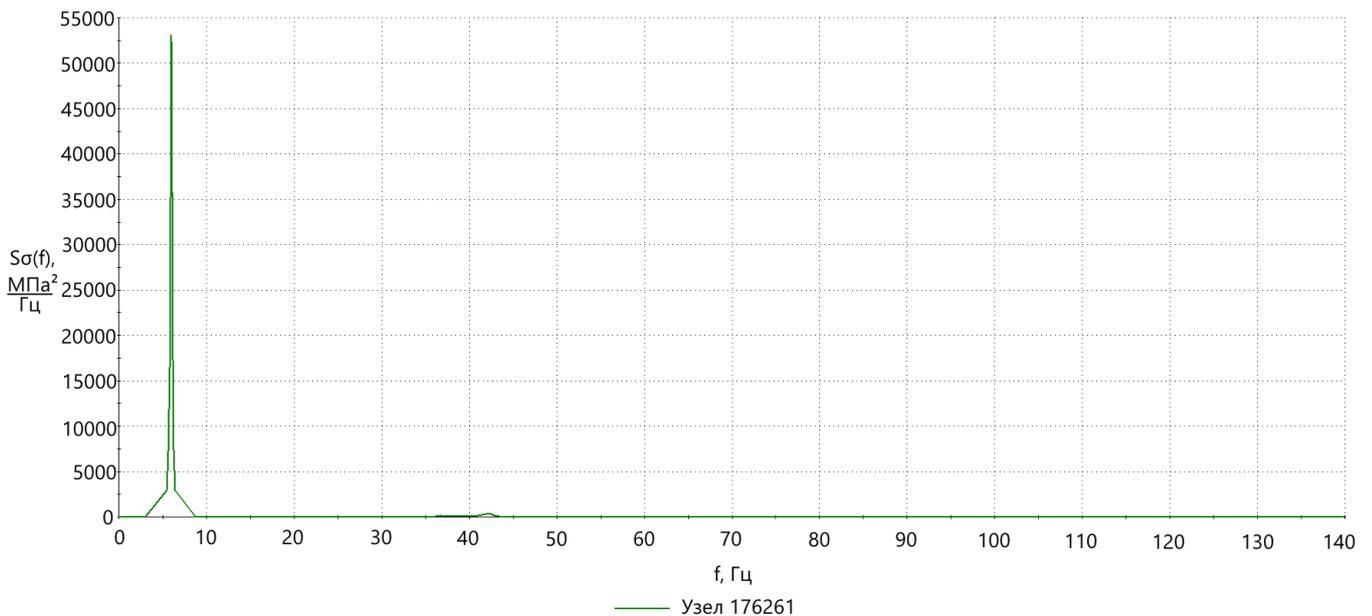


Рис. 15. Спектральная плотность напряжений в узле 176261 (линейный масштаб)

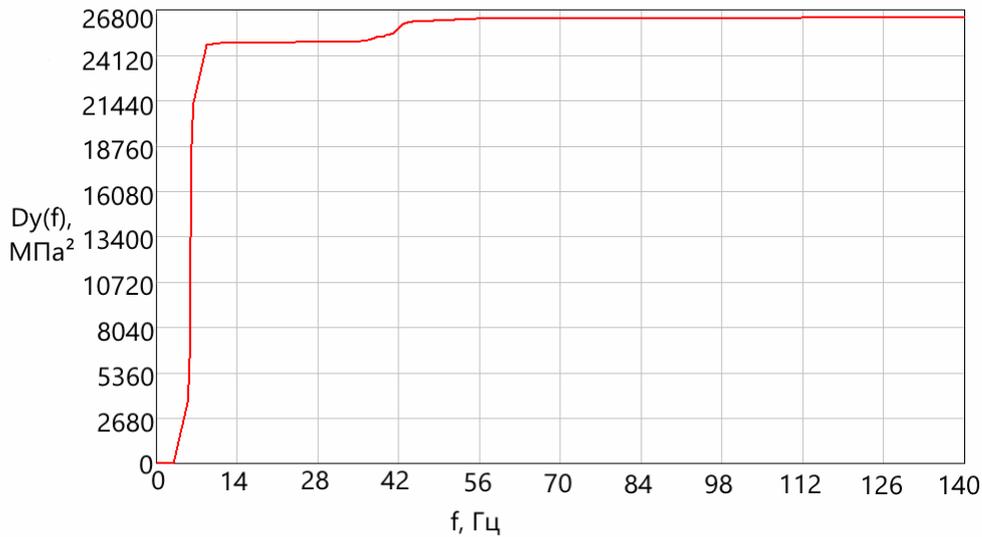


Рис. 16. Дисперсия напряжений в узле 176261

Моделирование реализации случайного процесса

Построение временной реализации процесса напряжений $\sigma(t)$ необходимо для оценки долговечности конструкции. Исходными данными для получения реализации $\sigma(t)$ является спектральная плотность напряжений. Для каждого значения аргумента (времени) t , процесс $\sigma(t)$ моделируется разложением вида [17]:

$$\sigma(t) = \sum_0^N [S_{\sigma}(\omega_j) \Delta\omega_j]^{\frac{1}{2}} \cos(\omega_j' t + \alpha_j), \quad (3)$$

где $\delta\omega_j$ – значения частот на графике спектральной плотности напряжений (рис. 14), $S_{\sigma}(\omega_j)$ – соответствующие им значения спектральной плотности, $\omega_j' = (\omega_j + \delta\omega_j)$, $\delta\omega_j$ – случайные флуктуации частоты, определяемые как взаимно независимые случайные величины, равномерно распределенные в интервале $[-\Delta\omega/2, \Delta\omega/2]$ с плотностью вероятности $1/\Delta\omega$; α_j – независимые случайные величины, равномерно распределенные в интервале $[0, 2\pi]$.

При увеличении количества слагаемых N распределение значений реализаций, полученных по алгоритму (3) приближается к нормальному распределению [17].

Для построения временной реализации процесса напряжений $\sigma(t)$ на графике спектральной плотности напряжений (рис. 15) выделяются две области, охватывающие пики спектральной плотности, которые вносят основной вклад в суммарную дисперсию напряжений. Область 1 имеет границы [5.4; 13.6] Гц, область 2 - [24; 44.4] Гц. В границах выделенных областей с шагом по частоте $\Delta\omega_j$ определяются значения ω_j и соответствующие им значения $S_\sigma(\omega_j)$. Шаг $\Delta\omega_j$ переменный, значения аргументов ω_j сгущаются вблизи максимумов спектральной плотности. Для первого слагаемого суммы (3) $\Delta\omega_1 = \omega_2 - \omega_1$. Для последующих слагаемых $\Delta\omega_j = (\omega_j - \omega_{j-1})/2 + (\omega_{j+1} - \omega_j)/2$.

Для формирования алгоритма моделирования реализации использовался программный комплекс MatLab. Алгоритм составлен в соответствии с формулой (3). Значения частоты ω_j и соответствующие значения спектральной $S_\sigma(\omega_j)$ спектральной плотности вводятся с графика спектральной плотности напряжений (рис. 15). Задаются временной интервал, а также временной интервал T и шаг дискретизации по времени Δt . Временной интервал T задан равным 20 с, шаг по времени для области 1 принят $\Delta t = 0.02$ с, для области 2 - $\Delta t = 0.01$ с. Полученные с помощью формулы (3) временные реализации процессов напряжений $\sigma(t)$ для областей 1 и 2 представлены на рис. 17. Синим цветом показана составляющая для пика в области 1, красным – для пика в области 2.

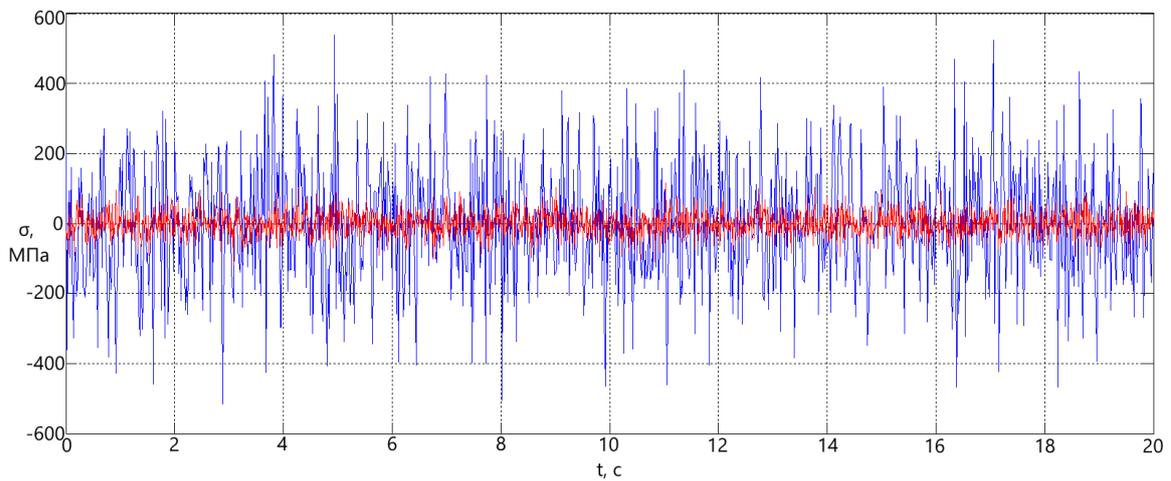


Рис. 17. Временные реализации $\sigma(t)$ для областей 1 и 2

На рис. 18 показаны составляющие временной реализации длительностью 1 с. Процессы содержат гармоники, существенно различающиеся по частоте и уровню, что соответствует характеру распределения исходной спектральной плотности.

Далее проводится суммирование составляющих процессов для двух областей. Значения $\sigma(t)$, которые были получены при моделировании первого процесса, суммируются со значениями $\sigma(t)$, для второго процесса. На рис. 19 представлена суммарная реализация процессов для двух областей, на рис. 20 показана составляющая временной реализации длительностью 1 с.

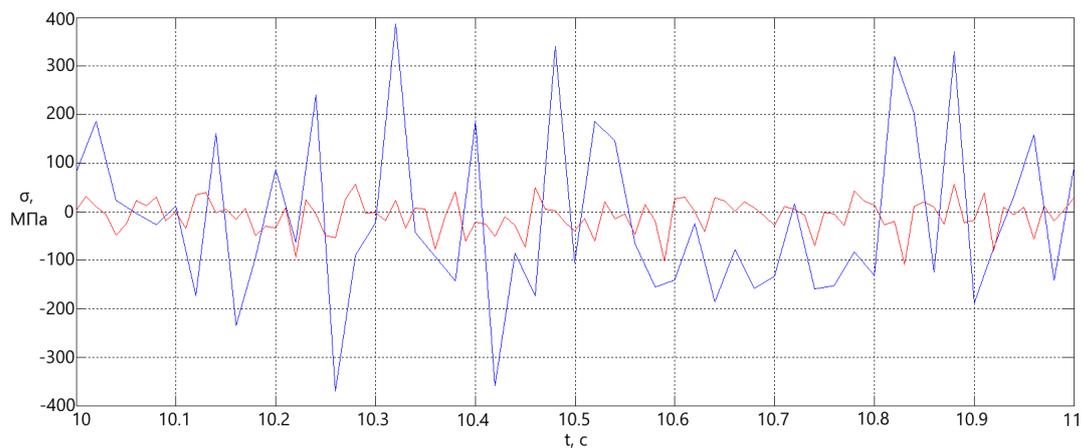


Рис. 18. Временные реализации $\sigma(t)$ длительностью 1 с

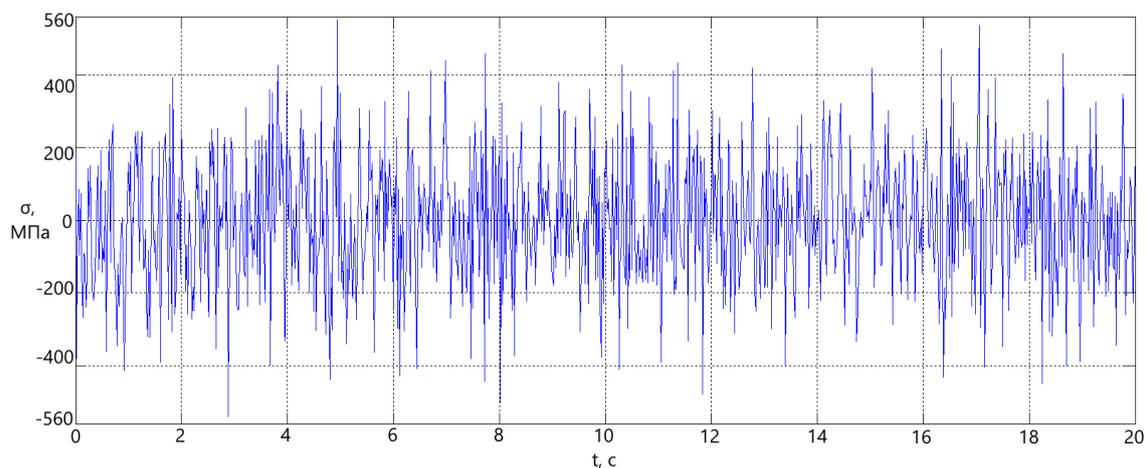


Рис. 19. Суммарная временная реализация $\sigma(t)$

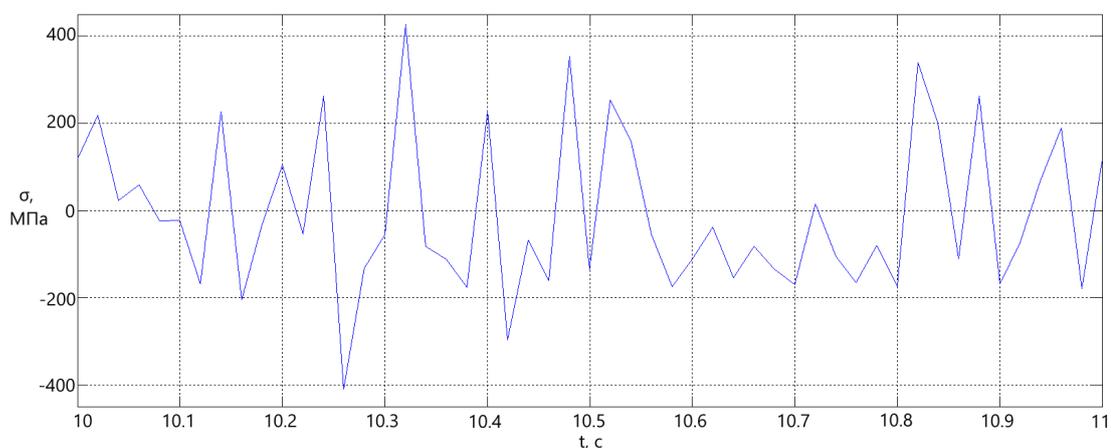


Рис. 20. Суммарная временная реализация $\sigma(t)$ длительностью 1 с.

Сравнение реализаций, представленных на рис. 16 и 18, показывает, что основной вклад в суммарный уровень процесса вносит первая составляющая процесса $\sigma(t)$. В соответствии с алгоритмом моделирования значения напряжений имеют распределение близкое к нормальному. По уровню напряжений можно оценить соответствие между реализацией и спектральной плотностью напряжений. Значения напряжений процесса не должны заметно превышать величину $3D_\sigma^{1/2}$, где D_σ – суммарная дисперсия процесса. Для напряжений в узле значение $3D_\sigma^{1/2} = 513 \text{ МПа}$. Мак-

симальные значения напряжений в модельном процессе составляют *400- 550 МПа* (рис. 18), что подтверждает корректность моделирования реализации.

Основные результаты и выводы

Разработаны методики численного моделирования динамического и напряженно- деформированного состояний конструкций авиационных изделий, имеющих дискретные сварные соединения, при случайном пространственном кинематическом возбуждении. Модели, разработанные с использованием твердотельных КЭ, позволяют учитывать нерегулярности конструкции (соединения, односторонние связи, конструктивные особенности узлов подвески) и оценивать характеристики составляющих ее пространственного локального деформирования в зонах нерегулярностей.

Предложена модель сварной точки, основанная на данных проведенных экспериментальных исследований, учитывающая изменение свойств исходного материала в зоне термического влияния с уточнением механических свойств материала по величине твердости в сечении сварных точек.

На основе разработанных КЭ моделей определены динамические характеристики конструкции изделия и проведены расчетные исследования напряженного состояния изделия при случайном кинематическом нагружении с заданной спектральной плотностью.

Приведенные результаты расчетов показывают, что разработанная КЭ модель авиационного изделия позволяет определять характеристики пространственных

колебаний и уровни напряжений для случая нагружения конструкции случайными кинематическими воздействиями с заданной спектральной плотностью. Выявлены зоны концентраций напряжений и определены уровни максимальных напряжений.

Получены распределения СКЗ эквивалентных напряжений по наиболее нагруженной точке сварного шва и показано, что наибольшие значения среднеквадратических значений напряжений наблюдаются в переходной зоне контакта точечного сварного соединения.

Определены спектральные плотности напряжений в наиболее напряженных сварных точках и выявлены особенности распределения дисперсии напряжений по частоте в этих точках.

На основе алгоритмов статистического моделирования построена временная реализация напряжений в наиболее нагруженной сварной точке конструкции. Построены кривые повторяемости амплитуд приведенных регулярных циклов напряжений для оценки усталостной долговечности конструкции в зонах точечных сварных соединений.

Адекватность разработанных численных моделей и работоспособность программ подтверждены физической корректностью результатов расчетов. Разработанные численные модели динамического напряженного состояния изделия могут быть использованы для оценки динамического состояния и вибрационной прочности изделий при заданных условиях эксплуатационного нагружения с учетом влияния точечных сварных соединений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-08-01243).

Библиографический список

1. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин: Справочник. 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1993. - 639 с.
2. Труфяков В.И. Усталость сварных соединений конструкций. - Киев: Наукова думка, 1973. – 216 с.
3. Hyungyil Lee, Nahmho Kim, Tae Soo Lee. Overload failure curve and fatigue behavior of spot-welded specimens. *Engineering Fracture Mechanics* 72, 2005. P. 1203–1221.
4. Rui-Jie Wang, De-Guang Shang. Low-cycle fatigue life prediction of spot welds based on hardness distribution and finite element analysis. *International Journal of Fatigue* 31, 2009. P. 508–514.
5. Зарецкий М.В., Сидоренко А.С. Динамика конструкции авиационного изделия при случайном кинематическом нагружении // Электронный журнал «Труды МАИ», 2012, выпуск №58: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=33423> (дата публикации 26.09.2012).
6. Рыбаулин А.Г., Сидоренко А.С. Напряженное состояние конструкции авиационного изделия с дискретными сварными соединениями при случайном кинематическом нагружении // Вестник Московского авиационного института. 2013. Т. 20. № 1. С. 183-193.

7. Алямовский А.А. Компьютерное моделирование в инженерной практике. - СПб.: БВХ-Петербург, 2008. - 1040 с.

8. Интерактивная справка Solidworks Premium 2014, <http://help.solidworks.com> (дата публикации 10.03.2014.)

9. Макаревский Д.И., Выshedкевич И.У., Будник Г.Д., Коротков М.О., Рыбаулин А.Г. О несущей способности сварных точек. // Материалы XIX международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А.Г. Горшкова. Т.2. – М.: ООО «ТР- Принт», 2013. С. 30-32.

10. Стоев П.И., Мощенок В.И. Определение механических свойств металлов и сплавов по твердости. // Вестник Харьковского научного университета им. Каразина. 2003. Т. 601. № 2(22). С. 106–112.

11. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости на пределе текучести вдавливанием шара. ГОСТ 22762-77. – Изд-во стандартов, 1977. - 12 с.

12. Марковец М.П. Определение механических свойств металлов по твердости. - М.: Машиностроение, 1979. - 191 с.

13. Seung-Ho Han, Dae-Gyun An, Seong-Jong Kwak, Ki-Weon Kang. Vibration fatigue analysis for multi-point spot-welded joints based on frequency response changes due to fatigue damage accumulation. International Journal of Fatigue 48, 2013, P. 170–177.

14. Орлов Б.Д., Шавырин В.Н., Новосельцев Н.А. О прочности соединений из сплава Д16АТ, выполненных точечной сваркой, 2010, <http://k-svarka.com/content/o->

prochnosti-soedinenii-iz-splava-dl6at-vypolnennykh-tochiechnoi-svarkoi, (дата обращения 13.04.2014).

15. Ning Pan, Sheri D. Sheppard. Stress intensity factors in spot welds. *Engineering Fracture Mechanics* 70, 2003 P. 671–684.

16. Bertrand Langrand, Eric Markiewicz. Strain-rate dependence in spot welds: Non-linear behaviour and failure in pure and combined modes I/II. *International Journal of Impact Engineering* 37, 2010 P. 792–805.

17. Вибрации в технике: Справочник в 6 т.. - Т. 1. Колебания линейных систем / Под ред. Болотина В.В., М.: Машиностроение, - 1978. - 352 с. - Т. 3. Колебания машин, конструкций и их элементов. / Под ред. Диментберга Ф.М. и Колесникова К.С., М.: Машиностроение, 1980. - 544 с.