

Введение Одним из направлений диагностики технического состояния конструкций различного назначения, в т.ч. стержневых, ключевым звеном является поиск подходов, позволяющих определить параметры дефектного состояния. При рассмотрении простых конструкций, состоящих из стержневых элементов, применяются различные методы моделирования технического состояния. Решению этой задачи сопутствует анализ и выявление различных признаков идентификации повреждений. Краткий анализ известных подходов к решению некоторых из таких задач приведен в ряде обзоров и статей [1-5]. При моделировании стержневой конструкции с помощью упрощенных моделей возникает вопрос о степени зависимости различных параметров колебаний от формы дефекта. При этом рассматриваются дефекты, имеющие раскрытие с одной и с двух сторон стержня, располагающиеся в одном месте по длине стержня. Построение модели Задачей является определение величин параметров колебаний в зависимости от вида дефекта по величине сечения. Рассмотрен кантилевер с дефектами в виде надрезов, согласно схеме, представленной на рис. 1. Стержень имел габариты: $= 0.250 \times 0.008 \times 0.004$ (м3). Надрезы располагались в сечении, которое имело наибольшую жесткость. Ширина надрезов принималась равной $= 1$ мм. Надрезы с различными вариантами размеров с одной или с двух сторон (,), располагались в одной точке с координатой по горизонтальной оси $= 0.0625$ м (относительная величина расположения надрезов к длине стержня $= 0.25$). Рис. 1 - Схема кантилевера с расположением надрезов. Рассматривалась относительная характеристика размера надреза - величины надрезов относились к полной высоте стержня: Варианты надрезов представлены в таблице 1. Таблица 1 - Различные варианты относительных величин надрезов стержня

Общая степень надреза	Варианты надрезов
$= 0.50$	$= 0.25$; $= 0.25$ $= 0.00$; $= 0.50$ $= 0.10$; $= 0.40$ $= 0.20$; $= 0.30$ $= 0.70$ $= 0.35$; $= 0.35$ $= 0.00$; $= 0.70$ $= 0.10$; $= 0.60$ $= 0.20$; $= 0.50$

Моделирование проводилось в конечно-элементном комплексе . Рассматривалась полнотелая модель (3-х мерная) на основе применения трехмерного элемента Solid92. Предварительно был проведен анализ изменения собственных частот при различной степени размеров конечных элементов как по всему стержню, так и в окрестности надреза. При данном разбиении (на основе уменьшения размеров конечных элементов) погрешность определения собственных частот была минимальна. Разбивка модели на узлы по длине производилась кратной $1/30$ от длины стержня. По высоте и ширине стержня производилась разбивка на узлы кратной $1/3$, соответствующей грани. Рис. 2 - Пример конечно-элементной модели стержня моделирования надрезов для величины $= 0.4$, $= 0.1$ В месте моделирования надрезов конечно-элементная сетка сгущалась (рис. 2). Модель обладает механическими свойствами, эквивалентными натурной модели: модуль Юнга $= 2.1$ МПа; плотность $= 7700$ кг/м3 . Результаты конечно-элементного расчета Проведен модальный расчет колебаний стержня. Рассмотрены формы

колебаний и собственные частоты КЭ моделей кантилевера с дефектами, с местоположением в точке $x=0.25$. Принимались следующие размеры полного надреза: а) $a=0.5$; б) $a=0.7$. На рис. 3 представлены кривые форм поперечных колебаний первой моды в плоскости наибольшей жесткости (вертикальная плоскость) КЭ модели в окрестности дефекта [8]. Анализ полученных параметров резонансов показывает, что наибольшее отклонение имеет как собственные частоты, так и амплитуды колебаний для дефекта, имеющего одностороннее исполнение - при величине надреза $a=0.5$: $\Delta f = 0$, $\Delta A = 0.5$ и при величине надреза $a=0.7$: $\Delta f = 0$, $\Delta A = 0.7$. Соответственно, относительные отклонения амплитуды формы колебаний в точке расположения, на рис. 3а) и 3б) характеризуются соответствующим изломом форм колебаний и составляет - 3.27% для величины надреза $a=0.5$, а также равно -7.44% для величины надреза $a=0.7$. Относительное отклонения собственных частот первой моды колебаний стержня, составляет -6.5% для величины надреза $a=0.5$, и также равно -14.3% для величины надреза $a=0.7$. Рассчитаны резонансы первых 10-ти мод колебаний кантилевера при разных вариантах надрезов, и, соответственно, их относительные отклонения от варианта с расположением надрезов симметрично относительно горизонтальной оси стержня ($x=0.25$, $x=0.25$ и $x=0.35$, $x=0.35$). Анализ показывает, что наибольшее отклонение частот имеет вариант с расположением надрезов с $x=0.0$, $x=0.5$ и $x=0.0$, $x=0.7$ - соответственно, имитирующего односторонний надрез. Для варианта величины надреза $a=0.5$ наибольшее отклонение частот составило -3.27% и для величины надреза $a=0.7$ составило - 7.44%.

а б Рис. 3 - Кривые форм первой моды поперечных колебаний в плоскости наибольшей жесткости модели в окрестности дефекта и его соответствующих размерах: а) $a=0.5$; б) $a=0.7$

Проведен расчет напряженного состояния стержня, нагруженного на свободном конце статической силой, направленной в направлении OY, в пакете . Анализ напряженного состояния трехмерной балки с односторонним и двусторонними надрезами показывают, что в окрестности расположения дефекта в пределах двух размеров высоты балки напряженное состояние отличается от напряженного состояния области основной балки. Поврежденная область мала по сравнению ко всей длине балки. Вследствие этого предполагается, что гипотезы балочной теории Эйлера-Бернулли могут не выполняться в области локации дефекта, и необходимо учитывать данную область путем моделирования дефекта в виде отдельного эквивалентного элемента. Примером такого элемента может служить упругая пружина, обладающая изгибной жесткостью. Таким образом, при сравнении собственных частот и форм колебаний моделей стержня с надрезами различной степени, расположенных в месте $x=0.25$, были получены максимальные отклонения при анализе 10-ти собственных частот при величины надреза $a=0.5$ - - 3,27% и при $a=0.7$ - -7,44%. Сравнительный анализ форм первой моды колебаний показал, что наибольшее отклонение амплитуды колебаний данного варианта

расположения в точке надреза имеется при величинах надреза $\alpha = 0.5$ - $\alpha = 6.5\%$ и при $\alpha = 0.7$ - $\alpha = 14.3\%$, а угла излома формы колебаний при $\alpha = 0.5$: $\beta = -0.6\%$ и при $\alpha = 0.7$: $\beta = -1.64\%$. При рассмотрении различных вариантов надреза, расположенных в месте $\alpha = 0.25$, анализ показывает, что характер напряженного состояния и параметры форм колебаний отличаются лишь в окрестности местоположения дефекта. При этом резонансные частоты отличаются в малых отклонениях от среднего расположения дефекта, что может говорить о применении упрощенной балочной модели при расчете параметров колебаний. В связи с тем, что наиболее часто встречаются дефекты в виде трещин, сколов, выходящих на поверхность одной из граней конструкции, то далее будем исследовать балку с односторонним дефектом.