

## ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРА СВЯЗЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ УСТАНОВКИ ИМПУЛЬСНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА ЕЕ ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ

В статье на основе анализа результатов, с одной стороны, инструментального измерения характеристик статического деформированного состояния экспериментальной установки, с другой стороны, ряда модельных расчетов НДС, выполненных для той же установки как без учета упругой деформируемости связей конструктивных элементов, так и со специально подобранными величинами жесткости связей, сделаны выводы о существенности и характере влияния узлов соединений на деформированное состояние установок импульсного деформирования.

Экспериментальная установка представляла собой упрощенный вариант типовой установки, отличающийся отсутствием проставки, подъемника, амортизаторов и средней плиты. Упрощение конструкции делало более точным и менее трудоемким измерение и анализ деформированного состояния. В состав экспериментальной установки входили (рис.1): четыре колонны переменного сечения ( $d=70$  мм) длиной  $L=1150$  мм, квадратная в плане верхняя плита ( $1160 \times 1160$  мм) толщиной  $h=50$  мм с энергоузлом в центре массой  $m=80$  кг и такого же в плане размера нижняя плита толщиной  $H=165$  мм.

Измерялись перемещения колонн (точки  $A_1, A_2, A_3, A_4$ ) и перемещения верхней плиты (точки  $B_1, B_2, B_3, B_4$  и  $C$ ). Статическое нагружение производилось с помощью домкрата, расположенного в центре плиты в точке  $C$  силой  $F=31.8$  кН.

Из общего объема измеренных перемещений для дальнейшего обсуждения существенны: максимальное вертикальное перемещение точки  $C=1.5$  мм, горизонтальные перемещения колонн в точках  $A_i=0.035$  мм ( $i=1, 2, 3, 4$ ), а также особый характер движения верхней плиты в своей плоскости (вращение со смещением центра вращения), показанный на рис. 2б.

С помощью разработанной конечно-элементной методики /1/ и программного обеспечения /2/ выполнен расчет деформированного состояния модели описанной выше конструкции в предположении абсолютной жесткости связей колонн и плит. Нижняя плита в этом и следующем расчетах также полагается абсолютно жесткой.

Полученное решение симметрично относительно горизонтальных осей материальной симметрии, максимальное вертикальное перемещение в точке  $C$  равно  $0.38$  мм и значительно меньше наблюдаемого в эксперименте, перемещения колонн в точках  $A_i$  равны  $0.041$  мм (сравнимы с экспериментальными), вращательное движение верхней плиты не наблюдалось. Несоответствие расчетных и экспериментальных значений превосходило суммарную погрешность расчета и эксперимента ( $0.002$  мм и соответственно  $0.01$  мм). Такого рода "идеальная" модель конструкции непригодна для расчетов НДС, поскольку не отражает характерных особенностей реальных НДС.

Расчеты НДС "идеальной" модели, а также альтернативной "неидеальной" проведены на ЭВМ с центральным процессором (ЦП) типа i386 на тактовой частоте  $40$  МГц в течение  $11$  мин. каждый. В расчетах использованы  $354$  конечных элемента и  $1815$  узловых степеней свободы.

В качестве причины несоответствия деформированных состояний реальной установки и "идеальной" модели ее предположена податливость соединений верхней плиты и колонн под нагрузкой. В работе /2/ показано, что величины и характер перемещений модели с неидеальными (упругоподатливыми) связями зависят от величин интегральных жесткостей упомянутых связей, поэтому была выполнена серия расчетов НДС конструкции по такой "неидеальной" модели. Необходимые для расчета значения интегральных жесткостей были определены подбором в следующем порядке: сначала жесткость на продольное растяжение



жесткости на изгиб (с контролем величины прогиба колонн), наконец - уточненные значения жесткостей на изгиб (с контролем величин перемещений верхней плиты в своей

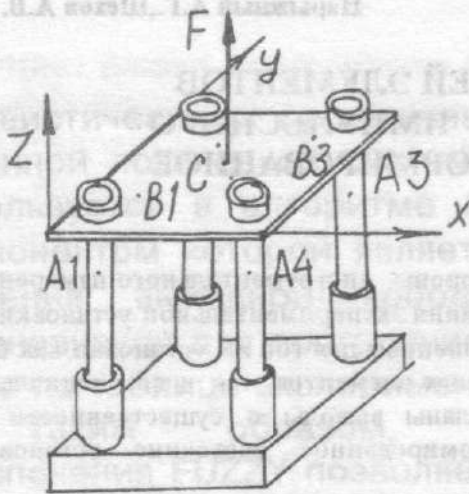


Рис.1

плоскости). В качестве модели соединения использован стержень, характеризуемый набором параметров:  $l$  - длина,  $S$  - площадь поперечного сечения,  $E$  и  $\nu$  - модуль упругости первого рода и коэффициент Пуассона,  $J_x$  и  $J_y$  - главные осевые моменты инерции сечения. Матрица жесткости связи определяется следующим образом

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix}; \quad [K_{11}] = \begin{bmatrix} ES/l & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 12EJ_x/l & 0 & 0 & 6EJ_x/l \\ 0 & 0 & 12EJ_y/l & -6EJ_y/l & 0 \\ 0 & 0 & -6EJ_y/l & 4EJ_y/l & 0 \\ 0 & 6EJ_x/l & 0 & 0 & 4EJ_x/l \end{bmatrix}; \\
 [K_{12}] = \begin{bmatrix} -ES/l & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -12EJ_x/l & 0 & 0 & 6EJ_x/l \\ 0 & 0 & -12EJ_y/l & -6EJ_y/l & 0 \\ 0 & 0 & 6EJ_y/l & 2EJ_y/l & 0 \\ 0 & -6EJ_x/l & 0 & 0 & 2EJ_x/l \end{bmatrix}; \quad [K_{21}] = [K_{12}]^T; \\
 [K_{22}] = \begin{bmatrix} ES/l & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 12EJ_x/l & 0 & 0 & -6EJ_x/l \\ 0 & 0 & 12EJ_y/l & 6EJ_y/l & 0 \\ 0 & 0 & 6EJ_y/l & 4EJ_y/l & 0 \\ 0 & -6EJ_x/l & 0 & 0 & 4EJ_x/l \end{bmatrix}$$

Такой порядок обеспечил подбор значений жесткостей за одну итерацию, на каждом этапе ранее подобранные значения не нуждались в изменениях.

Повторный расчет НДС модели установки со специально подобранными величинами жесткостей связей (соответствующих значениям параметров  $l=9$  мм,  $S=2,46 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>,  $E=2,1 \cdot 10^7$  Па,  $J_x=4,83 \cdot 10^{-7}$  м<sup>4</sup>,  $J_y=4,83 \cdot 10^{-7}$  м<sup>4</sup>) по разработанной методике дал следующие результаты. Максимальные перемещения верхней плиты в точке С равны 1,44 мм. Перемещения плиты из плоскости показаны на рис.2 а. Наблюдалось вращение верхней плиты в своей плоскости, распределение перемещений показано на рис.2 б.

Сравнительный анализ результатов экспериментального измерения и расчетов характеристик деформированного состояния по различным ("идеальной" и "неидеальной") моделям позволил сформулировать следующие выводы.

Модель с идеальными связями не отражает названных выше особенностей НДС конструкции. Одинаковость элементов конструкции (колонн), симметрия конструкции и нагрузки обуславливают симметрию НДС, которая не наблюдается в эксперименте.

Связи конструктивных элементов вносят специфические особенности в НДС конструкций установок при эксплуатации в статике и, следовательно, в динамике. Податливость связей вполне объясняет особенности НДС в эксперименте, при этом



наибольшее влияние на деформирование реальной конструкции оказывают податливость в осевом направлении на растяжение и в поперечном направлении на изгиб.

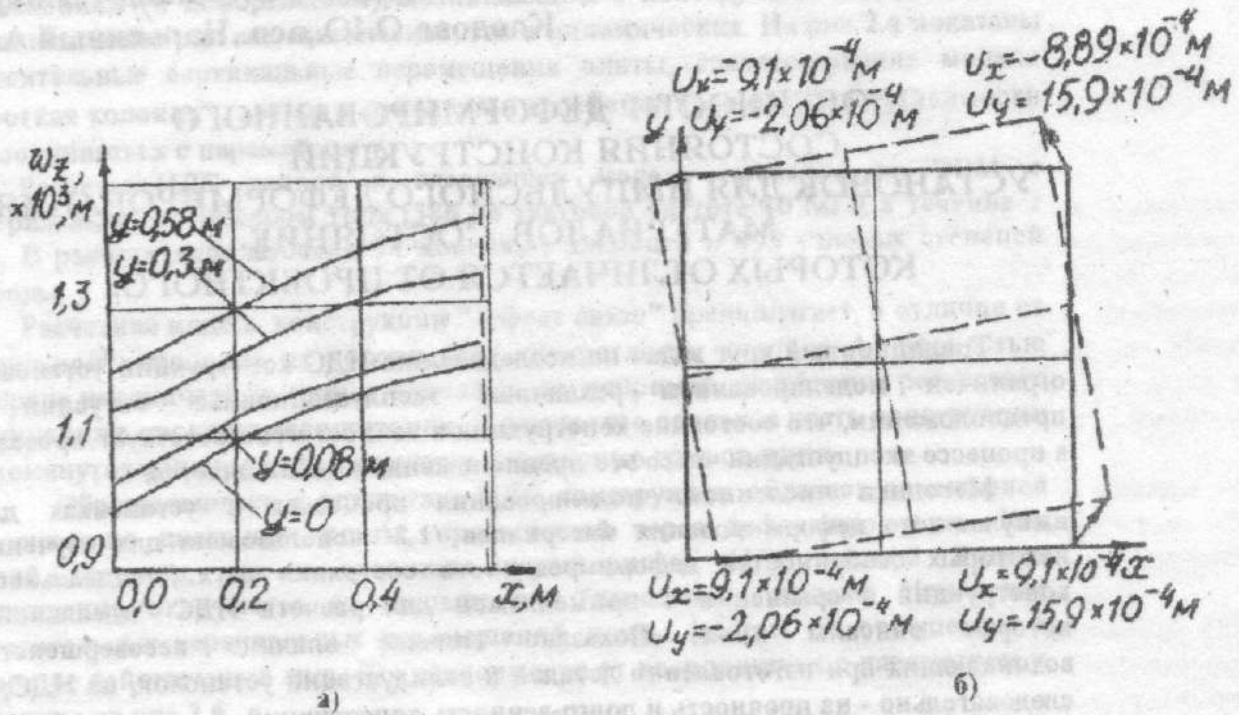


Рис.2

Вращение плиты связано с несимметричным изгибом колонны из-за анизотропии жесткости связей на изгиб и вызывает в конструкции самоуравновешенную систему внутренних сил типа бимоментов, которые обуславливают поле дополнительных напряжений и усугубляют проблему прочности и долговечности подобных конструкций.

В динамике возможны иные, кроме упругоподатливого, механизмы реакции узлов связи на скорости и ускорения перемещений связываемых элементов конструкции, например, типа сухого трения, вязкоупругий, инерционный. Актуален в связи с этим вопрос о круге существенных механизмов взаимодействия элементов в связях и выборе соответствующих математических моделей связей в динамике.

Интегральные характеристики жесткости связей можно определить путем подбора по результатам инструментальных измерений деформированного состояния. Актуальна разработка экспериментально-расчетной процедуры определения характеристик узлов связи и решения вопроса единственности такого определения в статике и в динамике.

Проектирование установок для импульсного деформирования должно проводиться с учетом особого влияния характеристик связей на их НДС, состояние узлов связи должно быть регламентировано проектом. При эксплуатации установок следует контролировать соответствие параметров состояния узлов связей конструктивных элементов проектным значениям.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кривцов В.С. Методика исследования технологических параметров и прочности установок импульсного деформирования. Proceedings second international conference "New leading-edge technologies in machine building", Rybachie, september 18-22, 1993, с. 309-310.
2. Кладова О.Ю. Численная методика определения НДС установок для импульсного деформирования металлов. См. настоящий сборник.
3. Расчеты машинностроительных конструкций методом конечных элементов. Справочник. Под общей редакцией В.И. Мяченкова. -М.: Машиностроение, 1989.