

УДК 624.012

Составители: Ю.В. Жиров, А.Г. Колесников

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент *Е.В. Осовских*

Металлические конструкции: методические указания к лабораторным занятиям по дисциплине «Металлические конструкции (общий курс)» для студентов направления подготовки 08.05.01 Строительство уникальных зданий и сооружений зданий и сооружений / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: Ю.В. Жиров, А.Г. Колесников. Курск, 2025. - 40 с.: ил.13 , 10 табл.. - Библиогр.: с. 40.

В настоящих методических указаниях содержатся указания по выполнению лабораторных работ, направленных на изучение работы металлических конструкций и соединений конструктивных элементов при нагружении.

Методические указания предназначены для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Металлические конструкции (общий курс)» студентами специальности 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений».

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать . Формат 60x84 1/16.
Усл. печ. л. 2,33 . Уч.-изд.л. 2,11 . Тираж 100 экз. Заказ. Бесплатно.
Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50лет Октября, 94.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	5
Лабораторная работа № 1 ТАРИРОВКА ЭЛЕКТРОТЕНЗОМЕТРА	6
1. Установочные данные.....	6
2. Составные части и принцип работы электротензометра	6
3. Типы тензорезисторов, их назначение и основные характеристики ...	9
4. Сущность метода	10
5. Методика испытания.....	12
6. Вопросы для подготовки к защите	13
Лабораторная работа № 2 ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СВАРНОГО И БОЛТОВОГО СОЕДИНЕНИЙ	14
1. Установочные данные.....	14
2. Конструкция стыка и способ нагружения	15
3. Теоретическое определение напряжений во фланговых швах	15
4. Экспериментальное определение касательных напряжений в сварных швах.....	17
5. Испытание болтового соединения.....	18
6. Методика испытания.....	21
7. Обработка результатов испытания.....	21
8. Вопросы для подготовки к защите	23
Лабораторная работа № 3 ПОПЕРЕЧНЫЙ ИЗГИБ ТОНКОСТЕННОЙ СТАЛЬНОЙ БАЛКИ.....	24
1. Установочные данные.....	24
2. Конструкция опытной балки и характеристика испытательной установки.....	25
3. Выбор расчетных сечений и контрольных точек	26
4. Вычисление прогиба	27
5. Экспериментальное определение напряжений в контрольных точках	28
6. Методика испытания.....	29
7. Обработка результатов измерений	31

8. Вопросы для подготовки к защите	31
Лабораторная работа № 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФАСОНОК НА УСИЛИЯ В СТЕРЖНЯХ ФЕРМЫ	33
1. Установочные данные.....	33
2. Конструкция фермы и характеристика испытательной установки ..	33
3. Теоретическое определение усилий в стержнях фермы	34
4. Определение усилий по фибровым деформациям.....	36
5. Методика испытания.....	37
6. Обработка результатов испытания.....	38
7. Вопросы для подготовки к защите	38
Библиографический список.....	40

ВВЕДЕНИЕ

По дисциплине «Металлические конструкции (общий курс)» студенты выполняют цикл лабораторных работ в объеме, предусмотренном учебным планом и программой.

Цель работ - углубленное изучение напряженно-деформированного состояния элементов некоторых металлических конструкций путем сопоставления и научного анализа результатов теоретических расчетов с данными опыта. В процессе подготовки и проведения лабораторных работ студенты знакомятся с постановкой задач исследования, методами экспериментального решения этих задач.

Личное участие каждого студента в экспериментальной и теоретической части исследований является обязательным.

Материалы лабораторных работ представляются в виде индивидуальных отчетов, которые подлежат защите.

К работе с испытательными машинами и приборами в лаборатории студенты допускаются после инструктажа по технике безопасности.

Настоящие методические указания используются студентами при подготовке к выполнению соответствующих лабораторных работ и их защите.

Лабораторная работа № 1

ТАРИРОВКА ЭЛЕКТРОТЕНЗОМЕТРА

1 Установочные данные

Цель работы - определить фактическую цену деления шкалы автоматического измерителя деформаций (АИД) в комплексе с конкретным типом тензорезисторов.

Задачи испытания:

1. Изучить принцип действия электротензометрического комплекса.
2. Ознакомиться с основными типами тензорезисторов и их назначением.
3. Ознакомиться с элементами испытательной установки, назначением балки равного сопротивления (БРС), рычажных тензометров (ТР), испытываемых тензодатчиков.
4. Вычислить теоретические значения деформаций крайних фибр в (БРС).
5. Произвести пять циклов нагружения БРС с записью отчетов по ТР и шкале АИДа в рабочую тетрадь.
6. Определить цену деления шкалы АИД и вычислить поправочный коэффициент к номинальному значению, равному 10^{-5} относительных единиц.

Техническое обеспечение:

1. Балка равного сопротивления с наклеенными тензорезисторами и комплектом штатных грузов.
2. Тензометры рычажные системы Гугенбергера с удлинительными базами $B = 50$ мм - 2 комплекта.
3. Тензометрический комплекс, включающий АИД-4, коммутатор, стабилизатор, кабель с разъемами.
4. Комплект учебных плакатов. Рабочие тетради.

2 Составные части и принцип работы электротензометра

Электротензометр - это единый комплекс электрических приборов, с помощью которого производится дистанционное измерение фибровых деформаций материала конструкции в заданной точке.

В его состав входят тензорезисторы (датчики сигнала деформации), наклеенные на деформируемые волокна исследуемой конструк-

ции, автоматический измеритель деформаций АИД, коммутатор для поочередного включения тензорезисторов в цепь, источник электропитания и соединительные провода.

Тензометрическая система работает по схеме уравновешенного электрического моста Уинстона. Основными элементами этой системы являются четыре резистора, образующие плечи замкнутого контура. В диагональ контура включен усилитель сигнала с автоматической балансировкой и шкалой со стрелками (рис. 1.1 и 1.2).

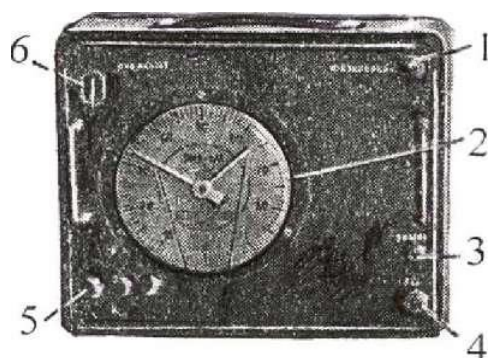


Рисунок 1.1 - Автоматический измеритель деформаций АИД - 4 и коммутатор-переключатель шестиканальный: 1 - балансировка по фазе; 2 - шкала со стрелками; 3 - клеммы заземления; 4 - выключатель питания; 5 - клеммы для подключения проводов: А - от активных тензодатчиков, К - от компенсационного, О-общий; 6 - индикатор настройки

Если мост уравновешен, то в диагональной цепи ток отсутствует. Это имеет место при следующем соотношении сопротивлений резисторов: R_a, R_2, R_k, R_1 .

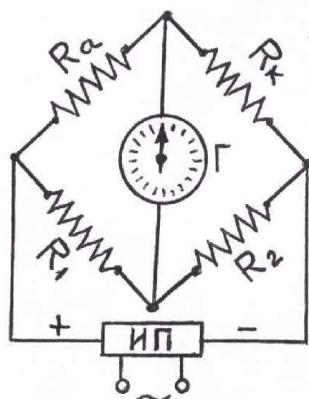


Рисунок 1.2 - Схема электрического моста Уинстона: R_a – тензорезистор активный; R_k – тензорезистор компенсационный (температурный); Γ – гальванометр самобалансирующийся; R_1 и R_2 – балластные резисторы

Тензорезистор R_a , называемый активным, наклеен на деформируемые волокна в заданной точке и испытывает такие же деформации. При этом изменяется величина его омического сопротивления R_a на величину ΔR_a , в результате чего в диагональной цепи возникает ток, который приводит в действие самобалансирующуюся систему АИДа. Изменение отчетов по шкале является мерой деформации тензорезистора и соответствующих волокон.

Компенсационный тензорезистор R_k , называемый еще температурным, уравнивает плечи моста от влияния температурных деформаций. Он наклеивается на заведомо недеформируемые волокна конструкции или отдельную деталь с таким же, как у конструкции, коэффициентом температурного расширения.

Количество активных тензорезисторов, наклеиваемых на конструкцию, не ограничивается, однако, практически назначается в пределах разумной необходимости. Тензорезисторы R_a и R_k образуют внешний полумост, а $R1$ и $R2$, называемые балластными, являются штатными деталями АИДа и образуют внутренний полумост.

На рис. 1.3 показана схема подключения группы тензодатчиков к АИДу через коммутатор, причем на схеме в цепь с помощью тумблера включен тензодатчик №3, остальные отключены. Попытка включить в цепь одновременно два или более активных датчиков или отключить все приводит к полному дисбалансу моста, о чем прибор сигнализирует характерным шумом.

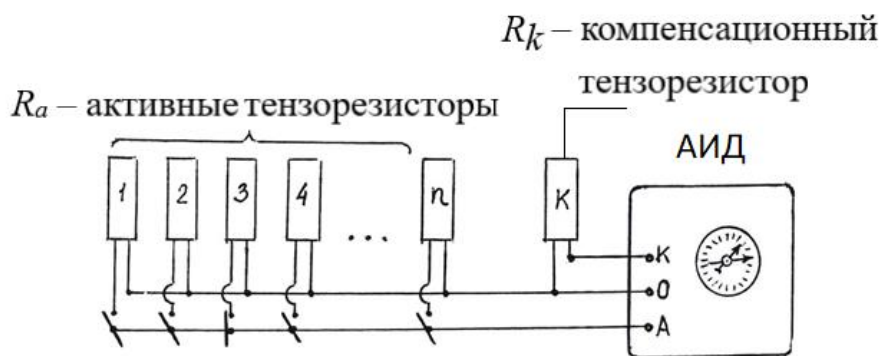


Рисунок 1.3 - Схема подключения группы тензорезисторов к АИДу

Электротензометрический метод измерения деформации используется при выполнении всех лабораторных работ по металлическим конструкциям.

3 Типы тензорезисторов, их назначение и основные характеристики

Основным рабочим элементом тензорезистора является плоскопараллельная спираль или решетка из высокоомной очень тонкой проволоки или фольги, проклеенной между двумя слоями подложек из специальной конденсаторной бумаги или пленки (рис.1.4).

Проволочные тензорезисторы изготавливают на специальных намоточных станках, а фольговые – фотолитографическим способом. Концы спиралей или решеток снабжены медными контактными выпусками.

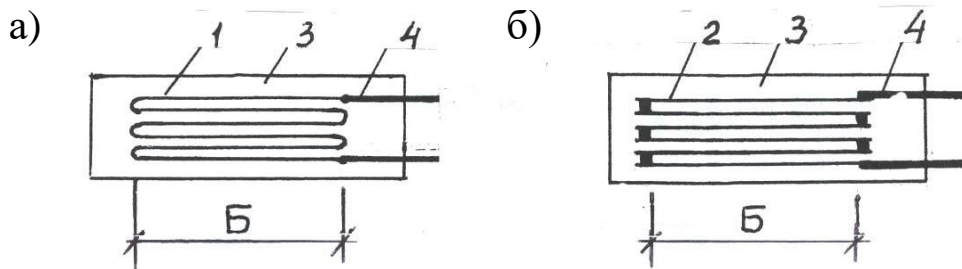


Рисунок 1.4 - Проводниковые тензорезисторы: а – проволочный петлевой; б – фольговый беспетлевой; 1 – проволочная спираль; 2 – фольговая решетка; 3 – основа (подложка); 4 – контактные выпуски; Б – база тензорезистора

Основными техническими характеристиками тензорезисторов являются следующие:

- база Б – длина мерного участка между концами петель спирали или решетки (см. рис. 1.4);
- сопротивление R в омах;
- тензочувствительность S – безразмерная величина, характеризующая степень способности разных тензорезисторов к изменению сопротивления при одинаковой деформации базы, выражается отношением $S = \Delta \varepsilon_R / \Delta \varepsilon_B$, где $\Delta \varepsilon_R = \Delta R / R$; $\Delta \varepsilon_B = \Delta B / B$;
- предельная величина измеряемой деформации ε .

Наибольшее применение при статических испытаниях получили тензорезисторы с базой $B = 5 \div 50$ мм; $S = 1,8 \div 2,2$; $R = 100 \div 200$ Ом; $\varepsilon = 30 \cdot 10^{-5} \div 300 \cdot 10^{-5}$.

Тензорезисторы изготавливают на предприятиях точного приборостроения. Они поставляются в упаковках, на которых указаны гарантированные заводом значения основных технических характеристик данной партии изделий.

При испытаниях металлических конструкций обычно используют тензорезисторы с базой 10 или 20 мм.

Тензочувствительность всех тензорезисторов, используемых в опыте, должна быть одинаковой. Это связано с тем, что масштаб шкалы автоматических измерителей деформаций зависит от их тензочувствительности. Номинальное значение одного деления шкалы соответствует $1 \cdot 10^{-5}$ относительных единиц деформации активного тензодатчика. Поскольку для каждой конкретной подборки тензочувствительность датчиков может быть иная, то и цена деления шкалы – масштаб шкалы будет иным. С целью сохранения постоянной цены деления АИДа, равной $1 \cdot 10^{-5}$, при использовании тензорезисторов определенной тензочувствительности производят регулировку масштаба шкалы с помощью специальных винтов, расположенных внутри корпуса прибора.

Часто один и тот же АИД приходится использовать для разных электротензометрических систем, которые отличаются тензочувствительностью датчиков. В этом случае постоянные регулировки становятся обременительными и их заменяют введением поправочного масштабного коэффициента на цену деления шкалы, считая ее равной $K_M \cdot 10^{-5}$.

Численное значение K_M определяют экспериментально с использованием тарировочных балок и образцовых механических тензометров. В данной лабораторной работе для этой цели используется тарировочная балка равного сопротивления и рычажные механические тензометры Гунгенберга.

4. Сущность метода

Главным свойством балок равного сопротивления является наличие рабочего участка, в пределах которого, при данной нагрузке фибровые деформации во всех точках остаются постоянными. Это свойство связано с ее геометрией. В плане балка имеет клинообразную форму, а высота сечения h сохраняется одинаковой по всей длине (рис. 5).

Балки изготавливают из низколегированной стали с последующим термоупрочнением.

Теоретически величина деформаций крайних волокон такой балки, при действии сосредоточенной силы P на конец консоли, выражается формулой:

$$\varepsilon_T = 6 Pl / E \cdot B \cdot h^2, \quad (1.1)$$

где E – модуль упругости стали.

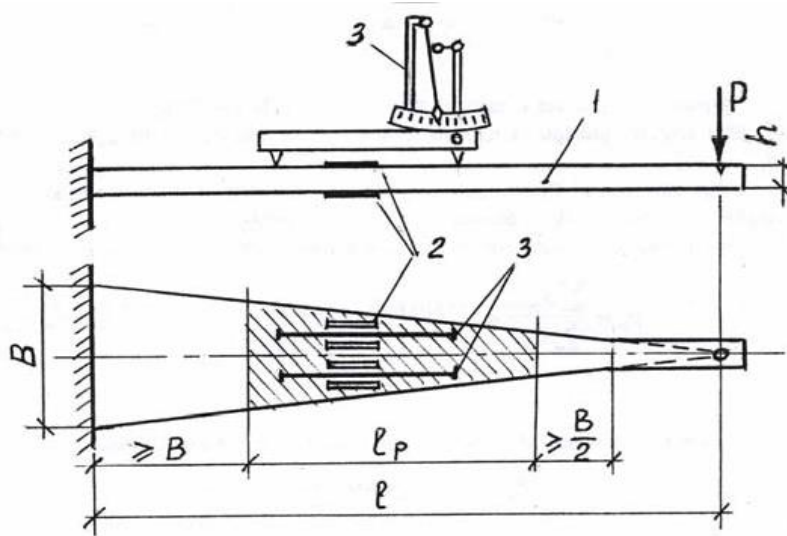


Рисунок 1.5 - Схема опытной установки: 1 – балка равного сопротивления; 2 – тензорезисторы; 3 – рычажные тензометры; l_p – длина рабочего участка

Для экспериментального определения тех же деформаций на поверхности рабочего участка установлены механические тензометры Гунгенбергера и наклеены тарируемые тензорезисторы, включенные в электротензометрическую цепь.

По данным механической тензометрии деформации вычисляют по формуле:

$$\varepsilon_M = \Delta T_{\text{ср}} \cdot C/B. \quad (1.2)$$

где $\Delta T_{\text{ср}} = 0,5 \cdot (\Delta T_1 + \Delta T_2)$ – среднее значение величины приращения отчетов по двум тензометрам; C – цена деления шкалы; B – база тензометра.

При $C = 0,001$ мм и $B = 100$ мм получаем

$$\varepsilon_M = \Delta T_{\text{ср}} \cdot 10^{-5}. \quad (1.3)$$

Электротензометрическим методом деформации вычисляют по формуле

$$\varepsilon_{\Delta} = \Delta n_{\text{ср}} \cdot K_M \cdot 10^{-5}, \quad (1.4)$$

где $\Delta n_{\text{ср}}$ – средняя величина приращения отчетов по шкале АИДа для всех тарируемых тензорезисторов.

Из условия $\varepsilon_{\Delta} = \varepsilon_M$ находят масштабный коэффициент (см. таблицу):

$$K_M = \Delta T_{\text{ср}} / \Delta n_{\text{ср}}. \quad (1.5)$$

5. Методика испытания

На рабочий участок БРС наклеивают несколько тарируемых тензорезисторов и подключают через коммутатор к АИДу.

Параллельно тензорезисторам устанавливают два рычажных тензометра Гугенбергера с удлинителями базы $B = 100$ мм.

На первом этапе испытания проверяют стабильность работы механических тензометров. Для этого производят пробное нагружения БРС силой P , вычисляют ε_T по формуле (1.1) и ε_M по формуле (1.3), расхождение между ними не должно превышать точности прибора $0,5 \cdot 10^{-5}$.

Результаты тарировки тензорезисторов

Тип тензорезистора – проволочный. Тензочувствительность $S=2,09$. База $B = 10$ мм. Сопротивление $R = 100 \pm 0,1$ Ом.

Таблица 1.1 – Результаты тарировки тензорезисторов

№ цикла	№ тензо-датч.	Отчеты по АИДу				Отчеты по тензометрам				$K_M = \frac{\Delta T_{cp}}{\Delta n_{cp}}$
		n_0	n_p	Δn	Δn_{cp}	T_0	T_p	ΔT	ΔT_{cp}	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1									
	2									
	3									
	4									
и. т.д.										
5	1									
	2									
	3									
	4									

Величину силы P назначают такой, чтобы приращение отчетов по шкале тензометров не превышало диапазона шкалы, т.е. 0,05 мм.

Поскольку рычажные тензометры служат в качестве эталонов деформаций, то они должны быть предварительно поверены на универсальной калибровочной машине Аистова.

После проверки правильности сборки электротензометрической цепи АИД включают в питающую сеть и дают прогреться в течение не

менее 30 мин, затем настраивают оптический индикатор фазовой балансировки и производят пять циклов рабочего нагружения. Стрелки рычажных тензометров устанавливают на ноль и записывают нулевые отчеты по АИДу для тарируемых тензорезисторов. Затем к БРС осторожно подвешивают груз P и снова снимают отчеты по всем приборам.

6. Вопросы для подготовки к защите

1. Объясните принцип электротензометрического метода определения фибровых деформаций. Каково назначение резисторов активных, компенсационного, балластных?
2. Назовите и покажите основные элементы электротензометрической системы. Каково их назначение?
3. Перечислите основные технические характеристики тензорезисторов. Почему в каждом опыте необходимо использовать тензорезисторы с одинаковыми характеристиками?
4. Каким свойством обладают балки равного сопротивления, с чем это связано?
5. Что измеряют с помощью АИДа? Чему равно номинальное значение цены деления шкалы АИДа, в каких единицах оно выражается?
6. Что влияет на изменение цены деления шкалы АИДа, как ее регулируют?
7. В чем сущность корректировки цены деления АИДа с помощью масштабного коэффициента K_M ?
8. Какую функцию при тарировке тензорезисторов выполняют рычажные тензометры Гугенбергера? Почему они должны быть предварительно поверены на калибровочной машине Аистова?
9. Как вычисляют масштабный коэффициент K_M , где его используют?
10. Можно ли использовать найденное значение K_M для тензорезисторов с другими техническими характеристиками?

Лабораторная работа № 2 ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СВАРНОГО И БОЛТОВОГО СОЕДИНЕНИЙ

1. Установочные данные

Исследование проводится на модели стыка двух пластин с накладками, совмещающей два вида соединений – сварное и болтовое. Оба соединения испытываются одинаковой испытательной нагрузкой в одинаковых условиях.

Цель работы – установить экспериментально закономерности распределения усилий по длине фланговых сварных швов и в болтовом соединении в упругой стадии работы.

Задачи испытания:

1. Ознакомиться с конструкцией модели сварного и болтового соединений, опытной установкой и схемой нагружения.
2. Вычислить теоретически и построить эпюру касательных напряжений по длине сварных швов от заданной нагрузки.
3. Ознакомиться с методикой экспериментального определения касательных напряжений в сварных швах и усилий в болтовом соединении.
4. Произвести нагружение модели заданной опытной нагрузкой, произвести измерения деформаций в исследуемых точках и сечениях электротензометрическим методом.
5. Вычислить по измеренным деформациям экспериментальные значения напряжений и усилий, построить их эпюры.
6. Произвести анализ полученных результатов, сопоставить с теоретическими данными, сделать выводы отдельно по сварному и по болтовому соединениям.

Техническое обеспечение:

1. Исследуемая модель стыка.
2. Тензометрическая система, включающая, коммутатор, стабилизатор и три кабеля с круглыми разъемами.
3. Нагрузочное устройство, включающее гидродомкрат ДГ-25, и насосную станцию с образцовым манометром.
4. Рабочие тетради, учебные плакаты.

2. Конструкция стыка и способ нагружения

Конструкция стыка показана на рис.2.1. Стык состоит из двух стальных полос, соединенных двумя накладками. Прикрепление накладок к одной из полос выполнено с помощью четырех угловых фланговых сварных швов, а к другой – шестью болтами, повышенной точности, расположенными симметрично в три ряда по два болта в каждом ряду.

Испытания проводятся на специальном силовом стенде. Стык на стенде располагается вертикально между подвижной и неподвижной траверсами и присоединяется к ним шарнирно цилиндрическими шпонками, пропущенными сквозь отверстия.

Растягивающее усилие создается гидравлическим домкратом ДГ-25, установленным между станиной и подвижной траверсой. Гидродомкрат должен быть установлен так, чтобы его силовая ось и геометрическая ось исследуемого стыка совпадали, а распределение усилий в сечениях было по возможности равномерным.

Величину испытательной нагрузки, как и в предыдущей лабораторной работе, контролируют по показаниям образцового манометра и тарифовочной таблице.

3. Теоретическое определение напряжений во фланговых швах

Фланговыми называются сварные швы, ориентированные параллельно линии действия усилия в соединяемых элементах (см. рис.2.1).

Если произвести испытание стыка до разрушения по сварке, то можно убедиться, что оно происходит в форме среза по плоскости, проходящей вдоль шва. Это свидетельствует о том, что напряженное состояние фланговых швов определяется деформациями, близкими к чистому сдвигу.

Теоретическое исследование и опыт показывают, что касательные напряжения распределяются неравномерно по длине фланговых швов. Наиболее напряженными являются участки, расположенные в начале и в конце соединения, а к середине шва напряжение уменьшается в несколько раз. Концентрация напряжений по концам сварных швов оказывает неблагоприятное воздействие на их работу, вызывает пластические деформации металла, образование трещин.

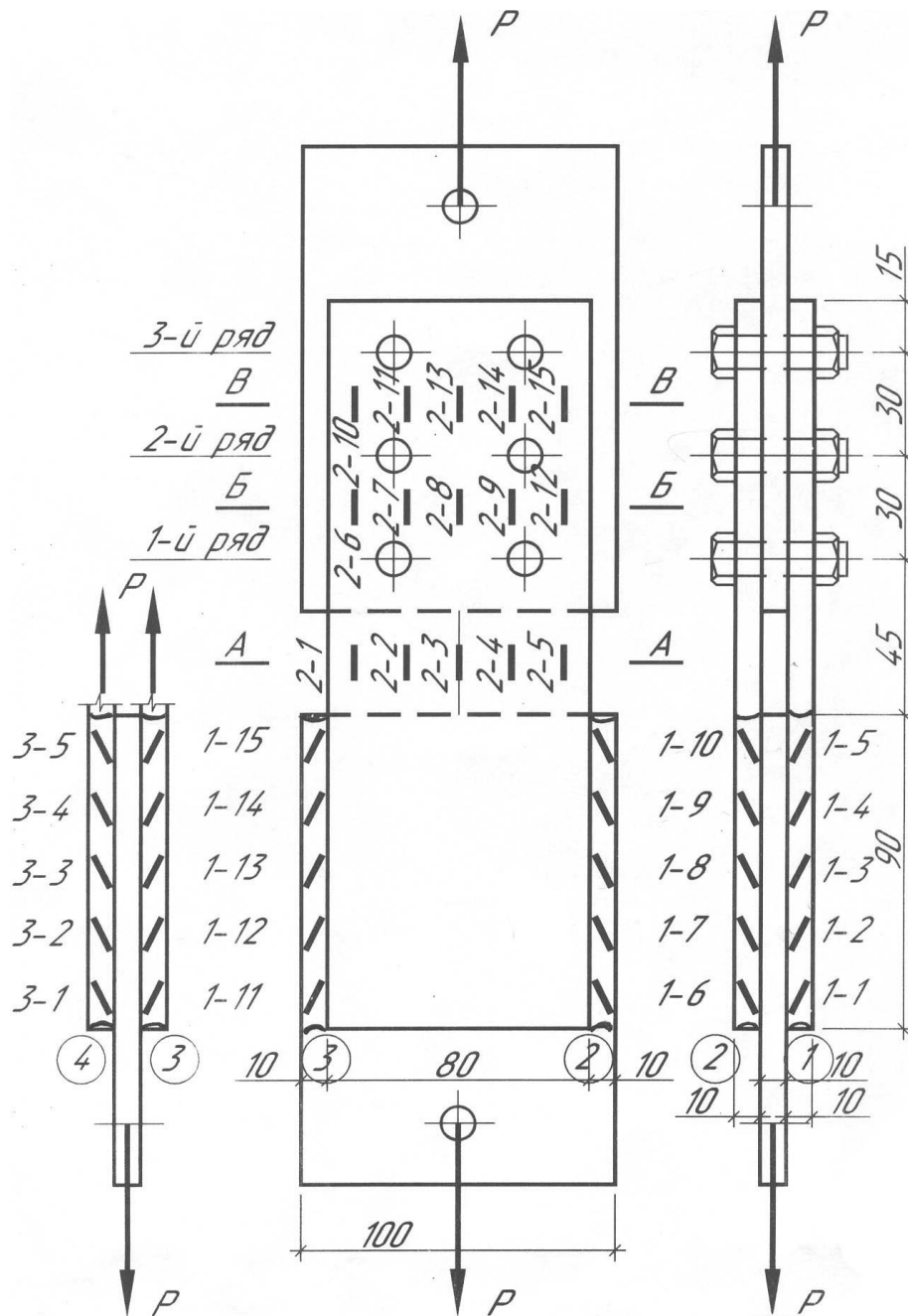


Рисунок 2.1 - Конструкция стыка и схема размещения тензорезисторов

Теоретически величину касательных напряжений в сечении шва, отстоящем на расстоянии X от начала соединения, можно определить по формуле

$$\tau(x) = \frac{N}{2\beta_f \cdot k_f} \cdot \Phi(x), \quad (2.1)$$

где N – равнодействующая растягивающего усилия в одной накладке, равная $P/2$; k_f и β_f – высота катета и коэффициент глубины провара шва; $\Phi(x)$;

– теоретическая функция распределения касательных напряжений по длине флангового шва, с помощью гиперболических функций:

$$\Phi(x) = a \left[\frac{ch(ax) + \varphi \cdot ch a(l-x)}{(1+\varphi)sh(al)} \right]. \quad (2.2)$$

$$a = \sqrt{2 \frac{G \cdot (2F_1 + F_2)}{E \cdot F_1 \cdot F_2}}. \quad (2.3)$$

E и G – модули упругости свариваемых деталей, причем $G \approx 0,4 E$; F_1 и F_2 – площади сечения накладки и стыкуемой полосы; φ – отношение площадей, вычисляемое по формуле:

$$\varphi = \frac{F_2}{2F_1}. \quad (2.4)$$

Численные значения $\Phi(x)$ в контрольных точках сварных швов, соответствующие заданным параметрам опытного стыка, приведены в табл. 2.1.

Касательные напряжения $\tau(x)$ можно выразить, как произведение среднего значения напряжения в шве τ_{cp} на коэффициент концентрации $k(x)$:

$$\Phi(x) = \tau_{cp} \times k(x), \quad (2.5)$$

при этом

$$\tau_{cp} = \frac{N}{2 \cdot l \cdot \beta_f \cdot k_f}. \quad (2.6)$$

$$k(x) = l \cdot \Phi(x).$$

Таблица 2.1 - Численные значения $\Phi(x)$ и $k(x)$ в контрольных точках сварных швов

x , см	0	1	2.75	4.5	6.25	8	9
$\Phi(x)$	0.203	0.125	0.058	0.05	0.086	0.193	0.318
$k(x)$	1.823	1.126	0.526	0.451	0.773	1.737	2.861

4. Экспериментальное определение касательных напряжений в сварных швах

В основе методики экспериментального определения касательных напряжений, как и в теоретических исследованиях, лежит гипотеза о деформации сечений сварного шва, близких к чистому сдвигу. Как известно из курса сопротивления материалов, на площадках чистого

сдвига действуют только касательные напряжения τ , а нормальные отсутствуют, $\sigma = 0$. Известно также, что главные площадки, на которых действуют только главные напряжения, наклонены под углом 45° к площадкам чистого сдвига, а сами главные напряжения численно равны касательным, т.е

$$\pm\tau_i = \pm\sigma^{гл}. \quad (2.8)$$

Таким образом, экспериментальным путем величину касательных напряжений в заданной трещке углового шва τ_i можно определить по величине главных напряжений в той же точке $\sigma^{2л}$. Сами же главные напряжения могут быть определены электротензометрическим методом по измеренным главным деформациям $\varepsilon^{2л}$:

$$\tau_i = \sigma^{2л} = E_w \cdot \varepsilon_i / (1 + \mu) = E_w \cdot \Delta n_i \cdot \varepsilon / (1 + \mu), \quad (2.9)$$

где E_w – модуль упругости металла шва; Δn_i – приращение отсчетов по АИДу для i -го тензорезистора; ε – цена деления шкалы АИДа.

На каждый из четырех сварных швов наклеены по пять тензорезисторов (см. рис.2.1). Оси всех тензорезисторов ориентированы по направлению главных растягивающих напряжений, под углом 45° к площадкам чистого сдвига.

Нумерация тензорезисторов соответствует их подключению к коммутатору.

При испытаниях стыка все тензорезисторы будут работать на растяжение, приращение отсчетов по каждому из них будут положительными.

5. Испытание болтового соединения

Болтовое соединение испытывается одновременно со сварным. При работе соединения в упругой стадии растягивающее усилие, передаваемое через болты, распределяется между ними неравномерно, крайние ряды болтов напряжены больше, чем средние. Можно сказать, что в болтовых и заклепочных соединениях имеет место явление, сходное с концентрацией напряжений, которое наблюдается в сварных фланговых швах. Чем больше количество рядов болтов или заклепок в соединении, тем неравномернее происходит распределение усилий между ними.

Величину усилия, передаваемого каждым рядом болтов, можно установить по величине скачков по эпюре продольных сил в накладках. В опыте продольные силы между рядами болтов определяют по деформациям, измеренным электротензометрическим методом. С этой целью в трех поперечных сечениях накладки наклеены тензорезисторы по пять

штук в каждом ряду. Оси их ориентированы вдоль растянутых волокон. В сечении А-А действует усилие в накладке, приходящее к болтовому стыку. В сечении Б-Б величина его уменьшается на величину усилия, воспринимаемого болтами 1-го ряда, в сечении В-В – 2-го ряда, остаток воспринимают болты 3-го ряда. Величину продольной силы в каждом сечении вычисляют по формуле:

$$N_i = \sigma_i^{cp} \cdot F_1 = E \cdot \bar{\varepsilon} \cdot \Delta n_i^{cp} \cdot F_1. \quad (2.10)$$

где $E=21 \cdot 10^5$ кгс/см² – модуль упругости стали накладок; ε и F_1 – см. формулы (3) и (9); Δn_i^{cp} – средние значения приращений отсчетов по АИДу на ступень нагрузки, вычисленные по показаниям стабильно работающих тензорезисторов в i -ом сечении, недостоверные отсчеты из расчетов исключаются.

Коэффициенты распределения усилий между рядами болтов вычисляют по формуле

$$k_i = \Delta N_i / N_A, \quad (2.11)$$

где N_A – полное усилие в накладке, передаваемое через болтовой стык; N_i – скачок на эпюре продольных сил, построенной по результатам опыта.

Примерный характер эпюры продольных сил в болтовом соединении показан на рис.2.2.

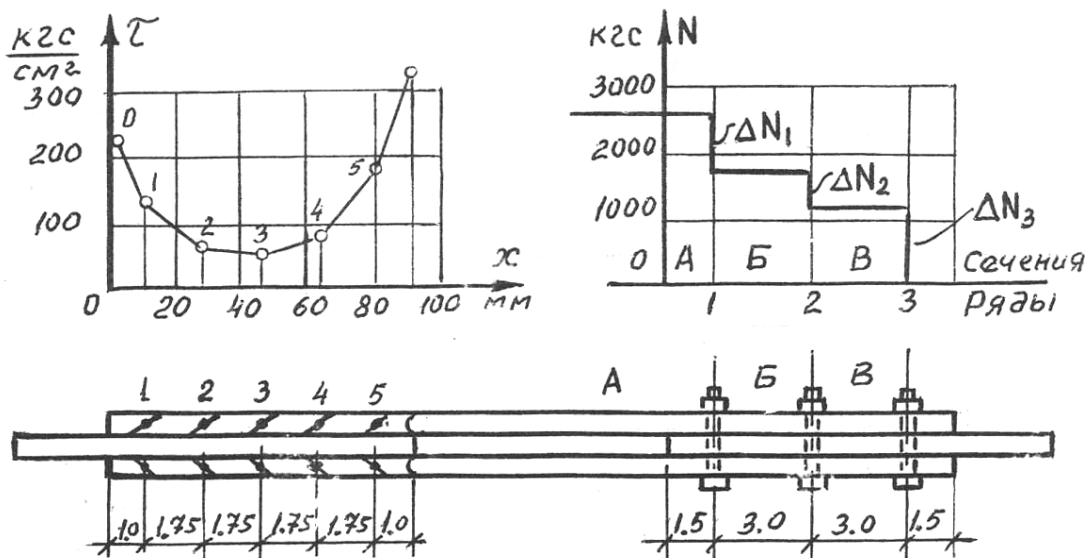


Рисунок 2.2 – Распределение усилий в сварном и болтовом соединениях

Таблица 2.2 - Данные тензометрии стыка

Обозначения и номера			Отсчёты по АИДу			
св. швов и сеч. накладки	контрол. точки в св. швах	тензодат. по схеме рис. 2.1	n_0 при $P_0=...$ кгс	n_1 при $P=...$ кгс	$\Delta n = n_1 - n_0$	данные для табл. 2.3 и табл. 2.4
1	2	3	4	5	6	7
Тензометрия сварных швов						$\tau_i^{оп} = \sigma_i^{гл}$
1	1	1-1				
	2	1-2				
	3	1-3				
	4	1-4				
	5	1-5				
2	1	1-6				
	2	1-7				
	3	1-8				
	4	1-9				
	5	1-10				
3	1	1-11				
	2	1-12				
	3	1-13				
	4	1-14				
	5	1-15				
4	1	3-1				
	2	3-2				
	3	3-3				
	4	3-4				
	5	3-5				
Тензометрия болтового соединения						$\Delta n_{ср}$ в сеч. накладки
А-А		2-1				
		2-2				
		2-3				
		2-4				
		2-5				
Б-Б		2-6				
		2-7				
		2-8				
		2-9				
		2-12				
В-В		2-10				
		2-11				
		2-13				
		2-14				
		2-15				

6 Методика испытания

После проверки правильности сборки тензометрических цепей АИД через стабилизатор напряжения включают в питающую электрическую цепь и дают прогреться в течение не менее 30 мин. Проверяют настройку фазовой балансировки прибора по оптическому индикатору.

Гидродомкрат устанавливают строго по оси испытываемого стыка, чтобы сечения накладок растягивались с одинаковыми усилиями. Для этого с помощью гидродомкрата растягивают стык с определенной силой P и с помощью тензодатчиков, расположенных в сечении А-А, находят усилия в каждой накладке, которое должно быть равно $0,5 P$. Если обнаруживается существенное различие, то улучшают центровку домкрата и опыт повторяют.

Во время работы с электротензометрической системой все агрегаты, создающие помехи в сети (электросварка, электромоторы в цехе), должны быть отключены.

Начальные отсчеты по шкале АИДа снимают при нагрузке $P_0 = 500 \dots 1000$ кгс и записывают в рабочую тетрадь (табл.2.2). Затем нагрузку увеличивают на ΔP и снова записывают отсчеты n_1 . Обычно отсчеты по АИДу снимают по всем тензорезисторам последовательно. Однако для уменьшения риска искажения отсчетов от случайных сбоев рекомендуется испытание сварных швов и болтового соединения производить отдельно, поэтапно.

7 Обработка результатов испытания

Сварные швы. На основании тензометрических измерений (см. табл.2.2) по формуле (2.10) вычисляют величины касательных напряжений в контрольных точках сварных швов τ_i .

Для каждой пары смежных швов в одноименных точках находят среднее значение τ^{cp} и заносят результат в табл.2.3, затем вычисляют в тех же точках среднее из четырех значений и записывают в графу 8 табл.2.3.

Таблица 2.3 - Касательные напряжения (кгс/см²)
в сварных швах при $\Delta P = \dots$ кгс

Номер контр. точки i	X_i , см, по рис.2.1	Теоретические <i>теор</i>			Из опыта $\tau_{оп}$			$\frac{\tau_{теор}}{\tau_{оп}}$
		$\tau_{ср}$ по ф.(6)	$k(x)$ по табл. 2.1	τ_i по ф.(5)	среднее в швах номер			
					1 и 2	3 и 4	во всех	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0		1,823					
1	1		1,126					
2	2,75		0,526					
3	4,5		0,451					
4	6,25		0,773					
5	8		1,737					
6	9		2,861					

Болтовое соединение. По данным электротензометрии вычисляют среднее значение приращения отсчетов $\Delta n_{ср}$ в каждом сечении и записывают в графе 7 табл.2.2. Если обнаруживаются тензометры, работа которых вызывает сомнение, то их показания при вычислении средних значений исключают. Результаты вычислений переносят в графу 2 табл. 2.4, затем вычисляют усилия в i -м сечении накладке и изменения усилий между сечениями N_i , которое численно характеризует усилие в болтах j -го ряда N_j .

Таблица 2.4 - Вычисление усилий в болтах

Сечение по накладке и болтам, рис.2.2	Приращ. от- счетов $\Delta n^{ср}$ в сеч. наклад. (из табл.2.2)	Усилия, кгс		Коэфф. распреде- ления $k_j = N_j/N_A$
		в сечен. накладки N_i по ф.(10)	в бол- тах j -го ряда N_j	
А-А			-	-
1-1	-	-		
Б-Б			-	-
2-2	-	-		
В-В			-	-
3-3	-	-		

В графе 5 табл.4 вычисляют коэффициенты распределения усилия между рядами болтов.

По данным табл. 4 строят график усилий в накладке и в рядах болтов, (см. рис.2.2).

Результаты испытаний необходимо проанализировать, сформулировать выводы и привести их в отчете.

8 Вопросы для подготовки к защите

1. Какие напряжения возникают во фланговых швах при растяжении стыка с накладками? Какой вид напряженного состояния испытывает материал таких швов?
2. Как изменяется величина напряжений в различных точках фланговых сварных швов? Как это влияет на прочность сварных швов?
3. Что отражает коэффициент концентрации напряжений в сварном шве, как он определяется теоретически?
4. В чем состоит опасность концентрации напряжений в сварных швах, каким путем ее уменьшают?
5. Какова связь между главными и касательными напряжениями при чистом сдвиге?
6. Почему тензодатчики наклеены в контрольных точках сварного шва под углом 45° к оси шва?
7. Как по данным тензометрии определяют нормальные и касательные напряжения в контрольных точках?
8. Как распределяются усилия, передаваемые через накладки, между рядами болтов в стыке?
9. Как определяют опытным путем доли усилия, воспринимаемого каждым рядом болтов?
10. Какова закономерность распределения усилия между болтами, выявленная экспериментально? Обнаруживаются ли сходные закономерности распределения усилий в сварном и болтовом соединениях?

Лабораторная работа № 3

ПОПЕРЕЧНЫЙ ИЗГИБ ТОНКОСТЕННОЙ СТАЛЬНОЙ БАЛКИ

1 Установочные данные

Цель работы – проверить экспериментально теоретические значения напряжений и деформаций в характерных точках двутавровой балки при поперечном изгибе.

Задачи испытания:

1. Ознакомиться с конструкцией балки, схемой опирания, нагружения и приборами для измерения перемещений и деформаций.
2. Построить эпюры изгибающих моментов и поперечных сил в соответствии с расчетной схемой балки, выявить опасные сечения и вид напряженного состояния в характерных точках этих сечений.
3. Вычислить теоретические значения главных напряжений в намеченных точках балки от заданной нагрузки и прогиб посередине пролета.
4. Ознакомиться с методикой нагружения балки, измерения перемещений и деформаций.
5. Произвести нагружение балки опытной нагрузкой, измерить деформации и перемещения с занесением в журнал наблюдений.
6. По данным измерений вычислить опытные значения главных напряжений в тех же точках и прогиб балки посередине пролета.
7. Сопоставить результаты расчета с опытом, сделать выводы по каждому из исследуемых параметров в отдельности.

Техническое обеспечение:

1. Исследуемая двутавровая балка, оснащенная тензодатчиками.
2. Нагрузочное устройство с гидравлическим домкратом ДГ-25, насосной станцией, распределительной траверсой и тягами.
3. Тензометрический комплекс, включающий АИД-1М, коммутатор, стабилизатор и кабель с круглыми разъемами.
4. Индикатор ИЧ-10 с ценой деления 0,01мм, установленный на подвесной системе.
5. Рабочие тетради, учебные плакаты.

2 Конструкция опытной балки и характеристика испытательной установки

Объектом испытания является стальная балка двутаврового прокатного профиля (рис.3.1). С помощью торцовых ребер балка шарнирно

Стенка балки в местах приложения нагрузки снабжена ребрами жесткости. Ось домкрата равноудалена от опор балки, нагрузка прикладывается симметрично. Величину испытательной нагрузки контролируют по показаниям образцового манометра и тарифовочной таблице.

Для измерения фибровых деформаций в контрольных точках балки используют электротензометрический комплекс. Прогиб балки посередине измеряют индикатором ИЧ-10 с ценой деления 0,01мм. Индикатор установлен на подвесной системе, которая шарнирно крепится к опорным ребрам балки на уровне нейтральной оси, благодаря чему отпадает необходимость при измерении прогиба вносить поправку на осадку опор.

3 Выбор расчетных сечений и контрольных точек

На рис.3.2 показана расчетная схема балки, эпюры изгибающих моментов и поперечных сил. По характеру эпюр видно, что в среднем отсеке балки, между сосредоточенными силами, имеет место чистый изгиб под действием изгибающего момента M_{max} , а в крайних отсеках – поперечный изгиб под действием изгибающего момента, изменяющегося в пределах от 0 до M_{max} при постоянной поперечной силе, равной Q_{max} .

Конструктивный расчет по предельным состояниям производят, как правило, в таких поперечных сечениях и расчетных точках, где возникают наибольшие нормальные, касательные и главные напряжения.

В исследуемой балке наибольшие нормальные напряжения будут там, где $M=M_{max}$, т.е. в крайних волокнах полок двутавра в пределах среднего отсека:

$$\sigma_{max} = \pm M_{max} / W_z. \quad (3.1)$$

Наибольшие касательные напряжения, как известно из курса сопротивления материалов, действуют на уровне нейтрального слоя в сечении, где $Q=Q_{max}$. В исследуемой балке это имеет место в приопорных отсеках в любой точке, расположенной на оси балки.

Величина их равна

$$\tau_{max} = Q_{max} \cdot S_z^{omc} / I_z \cdot t_{cm}. \quad (3.2)$$

где S_z^{omc} ; I_z и t_{cm} – геометрические параметры балки, приведенные на рис.3.3.

Наибольшие главные напряжения в стенках двутавровых балок возникают в местах сопряжения ее с полками, т.е. в крайних нижних и верхних точках. В сочетании с главными сжимающими напряжениями,

действующими на уровне нейтральной слоя, они могут стать причиной потери устойчивости тонкой стенки.

Наиболее вероятным местом потери устойчивости стенки является середина приопорных отсеков, т.е. сечение $x = 0,5a$. Согласно рис.3.2, в этом сечении $M=0,5M_{max}$ и $Q=Q_{max}$.

Главные напряжения определим в трех точках стенки: на уровне оси балки, в крайней нижней и крайней верхней точках.

На уровне оси балки в точке O имеет место чистый сдвиг, а следовательно:

$$\sigma^{2l} = \pm \tau_{max}. \quad (3.3)$$

В крайних нижней H_1 и верхней B_1 точках стенки главные напряжения вычисляются по формуле

$$\sigma_{1,2}^{гл} = \frac{\sigma}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau^2}, \quad (3.4)$$

где σ и τ – нормальные и касательные напряжения в рассматриваемых точках, вычисляемые по формулам:

$$\sigma = \sigma(y) = M \cdot y / I_z; \quad (3.5)$$

$$\tau = \tau(y) = Q \cdot S^{omc} / I_z \cdot t_{cm}, \quad (3.6)$$

где $y = y_{H1}$ – ордината точки H_1 ; $S^{omc} = S^{H1}$ – статический момент отсеченной части поперечного сечения, расположенной ниже H_1 (см. рис.3.3).

По вычисленным значениям необходимо построить теоретические эпюры главных напряжений, а затем сравнить их с опытными.

4 Вычисление прогиба

При поперечном изгибе коротких тонкостенных балок прогиб следует вычислять по формуле

$$f = f_M + f_Q, \quad (3.7)$$

где f_M – составляющая прогиба, вызванная только чистым изгибом при нагрузке, приложенной по схеме показанной на рис.3.2.

Величина его вычисляется по формуле

$$f_m = \frac{P \cdot a^3}{48 \cdot EI_z} = \left[3 \left(\frac{l}{a} \right)^2 - 4 \right], \quad (3.8)$$

где f_Q – составляющая прогиба, вызванная только сдвигом под действием поперечной силы, равная

$$f_Q = \frac{P \cdot a \cdot (1 + \mu)}{EF}. \quad (3.9)$$

где $\mu = 0,3$ – коэффициент Пуассона для стали.

5 Экспериментальное определение напряжений в контрольных точках

Главные напряжения вычисляют через главные деформации, полученные экспериментально. Измерение деформаций производят электротензометрическим методом. С этой целью в контрольных точках наклеены тензорезисторы, включенные через коммутатор в электротензометрическую цепь.

Схема размещения тензорезисторов показана на рис.3. Количество тензорезисторов и их ориентация в каждой контрольной точке приняты из следующих соображений.

В среднем отсеке, где имеет место чистый изгиб, главные деформации испытывают все продольные волокна, поэтому в контрольных точках H и B тензорезисторы ориентированы вдоль оси балки. Всего в сечении установлено восемь тензодатчиков по четыре в каждой контрольной точке.

Напряжения вычисляют по средним значениям измеренных деформаций

$$\sigma^{on} = E \cdot \varepsilon_{cp}^{on}. \quad (3.10)$$

В сечении $x = 0,5 \cdot a$, посередине первого отсека, в точке O тензорезисторы ориентированы под углом 45° к оси балки, что совпадает с направлением главных деформаций при чистом сдвиге. Величину главных напряжений в этой точке, численно равных касательным напряжениям, вычисляют по формуле

$$\sigma_0^{гл} = \tau_0^{on} = \pm E \cdot |\varepsilon_0^{on}|_{cp} / (1 + \mu) \quad (3.11)$$

где $|\varepsilon_0^{on}|_{cp}$ - среднее из абсолютных величин деформаций, измеренных в точке O по четырем тензодатчикам, $\mu = 0,3$ – коэффициент Пуассона.

В нижней H_1 и верхней B_1 точках стенки, как следует из формулы (4), главные напряжения численно равны и зеркально симметричны, поэтому для их вычисления достаточно определить главные деформации в любой из контрольных точек H_1 или B_1 . В данном опыте деформации измеряются только в точке H_1 .

Так как направление главных деформаций в точке H_1 заранее неизвестно, то измерить их прямым путем с помощью тензодатчиков невозможно, поэтому их вычисляют косвенным путем. Для этого в точке H_1 с каждой стороны стенки наклеено по три тензорезистора, образующих розетки. Оси их направлены так, как показано на рис.3.3. Измерив,

средние деформации в направлении каждой пары тензодатчиков, вычисляют главные деформации в данной точке по формуле

$$\varepsilon_{1,2}^{on} = \frac{(\varepsilon_0 + \varepsilon_{90})}{2} \pm \left(\frac{1}{2}\right) \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{45})^2 + (\varepsilon_{45} - \varepsilon_{90})^2}. \quad (3.12)$$

Где ε_0 , ε_{45} , ε_{90} – средние значения измеренных деформаций в указанном направлении, подставляют в формулу со своими знаками.

Зная $\varepsilon_1^{оп}$ и $\varepsilon_2^{оп}$ вычисляют главные напряжения в данной точке:

$$\sigma_1^{on} = \frac{E}{1-\mu^2} \cdot (\varepsilon_1^{on} + \mu \cdot \varepsilon_2^{on}). \quad (3.13)$$

$$\sigma_2^{on} = \frac{E}{1-\mu^2} \cdot (\varepsilon_2^{on} + \mu \cdot \varepsilon_1^{on}). \quad (3.14)$$

Эпюры теоретических и опытных значений главных напряжений для сравнения совмещают на одном чертеже.

6 Методика испытания

К испытанию приступают после проверки работоспособности нагрузочного устройства и измерительных систем.

Начальные рабочие отсчеты по прогибомеру f_0 и по шкале АИДа n_0 , как и в предыдущих работах, снимают при начальной нагрузке $P = 500-1000$ кгс и записывают в рабочую тетрадь (табл.3.1 и 3.2). Затем нагрузку увеличивают на ΔP , снова снимают отсчеты по всем приборам, вычисляют приращения отсчетов, деформации \square_1 и прогиб балки посередине пролета. Величину $P_1 = P_0 + \Delta P$ следует назначать исходя из мощности используемого домкрата, но с учетом того, чтобы наибольшие напряжения в балке σ_{max} не превышали 0,7 от предела текучести стали $\sigma_y = 2400$ кгс/см².

Таблица 3.1- Прогиб посередине пролета балки

Нагрузка P , кгс	Отсчеты по прогибомеру ЦД=0,01мм		Прогиб, мм		
	n	Δn	из опыта f_{on}	по расчету f_m	f_m / f_{on} , %
$P_0 =$					
$P_1 =$					

Таблица 3.2 - Данные тензометрии, вычисление деформаций

Контрольные точки, рис.3	Номера тензодатчиков по рис.3	Отсчеты по АИДу				Деформ.: 10^{-5}	
		n_0 при P_0 тс	n_1 при P_1 тс	$\Delta n = n_1 - n_2$	Δn_{cp} для группы тензодатчиков	измер.	главные
						$\varepsilon_{cp} = K \cdot \Delta n_{cp}$	$\varepsilon_1, \varepsilon_2$
1	2	3	4	5	6	7	8
Сечение $x = 0,5 \cdot l$							
H	1					$\varepsilon_H =$	$\varepsilon = \varepsilon_H$
	2						
	3						
	4						
B	5					$\varepsilon_B =$	$\varepsilon = \varepsilon_B$
	6						
	7						
	8						
Сечение $0,5 \cdot a$							
O	9					$\varepsilon_2 =$	$ \varepsilon_o^{on} _{cp} =$
	10						
	11					$\varepsilon_1 =$	
	12						
H_1	13					$\varepsilon_0 =$	$\varepsilon_1 =$
	14						
	15					$\varepsilon_{45} =$	
	16						
	17					$\varepsilon_{90} =$	
	18						

7 Обработка результатов измерений

Теоретические и опытные значения величин главных напряжений в контрольных точках, а также прогиба балки посередине пролета вычисляются в рабочих тетрадах, результаты расчета представляют в табличной форме (см. табл.3). По результатам испытаний и расчета необходимо сделать выводы.

Таблица 3.3 - Определение напряжений

Сечение x	Контрольные точки	Главные деформации из табл.2	Главные напряжения, кгс/см ²				
			из опыта		по расчету		сравнение
			по формулам	результат	№ формулы	$\sigma_{теор}$	$\frac{\sigma_{теор}^{гл}}{\sigma_{оп}^{гл}}$
$x=0,5 l$	H	$\varepsilon_H=$	10		3.1		
	B	$\varepsilon_B=$					
$x=0,5 a$	O	$ \varepsilon_0^{оп} _{ср}=$	11		3.2; 3.3		
	H_1	$\varepsilon_1=$ $\varepsilon_2=$	13,14		3.4		

8 Вопросы для подготовки к защите

1. Какой вид деформаций испытывает балка на каждом участке при нагружении двумя симметричными сосредоточенными силами?
2. Чем обусловлен выбор контрольных точек для определения главных напряжений?
3. Почему исследователей и расчетчиков интересует величина, в первую очередь, главных напряжений? Как это связано с их свойством?
4. Почему во всех контрольных точках тензодатчики располагают попарно симметрично относительно главной плоскости изгиба балки?
5. Почему в точках H и B все тензодатчики наклеены на крайние волокна и направлены параллельно оси балки?
6. Почему в точке O установлено по два тензодатчика и ориентированы они под углом 45° к оси балки? Как называются фибровые деформации, которые они фиксируют?

7. Почему в точке H_1 установлены розетки из трех тензодатчиков, а не из двух, как в точке O ?
8. Какой вид напряженного состояния испытывает стенка балки в точках O и H_1 ?
9. Какие деформации отражают составляющие прогиба балки посередине пролета?
10. С какой целью подвеска с прогибомером шарнирно прикреплена к опорному ребру балки на уровне оси, а не выше и не ниже? Какой эффект этим достигается?

Лабораторная работа № 4 **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФАСОНОК** **НА УСИЛИЯ В СТЕРЖНЯХ ФЕРМЫ**

1 Установочные данные

Цель работы – проверить экспериментально достоверность результатов расчета стальной фермы по упрощенной шарнирно-стержневой схеме и по уточненной – рамной с учетом действительных размеров жестких фасонок и гибкости стержней.

Задачи испытания:

1. Ознакомиться с конструкцией опытной модели треугольной фермы, схемой опирания и нагружения на стенде.
2. Определить усилия в расчетных сечениях фермы по шарнирно-стержневой и по рамной статическим схемам.
3. Ознакомиться с тензометрической схемой расположения и подключения тензодатчиков в расчетных сечениях.
4. Нагрузить ферму испытательной нагрузкой, измерить деформации в заданных сечениях электротензометрическим методом.
5. Вычислить по измеренным деформациям опытные величины усилий в тех же сечениях, сравнить их с теоретическими по каждой из расчетных схем.

Техническое обеспечение:

1. Исследуемая модель стальной треугольной фермы.
2. Тензометрический комплекс, включающий АИД-1 М, коммутатор, стабилизатор, кабель с разъемами.
3. Нагрузочное устройство, включающее гидродомкрат ДГ-25, насосную станцию с образцовым манометром и тарировочную таблицу.
4. Рабочие тетради, учебные плакаты.

2 Конструкция фермы и характеристика **испытательной установки**

Модель имеет форму замкнутого равнобедренного треугольника (рис.4.1). Каждая сторона треугольника выполнена из двух равнополочных уголков сечением 50x5, соединенных между собой прокладками. Физические оси составных стержней совмещены с геометрическими осями модели, проходят через центры узлов. Присоединение стержней к

узловым фасонкам произведено с помощью электросварки. Опорные фасонки усилены ребрами жесткости и присоединены к горизонтальным опорным пластинам.

Модель опирается на стенд шарнирно-подвижно. Нагрузка в виде сосредоточенной силы создается гидравлическим домкратом ДГ-25, приложена к верхнему узлу и направлена вертикально вниз.

По статической схеме модель является рамой с замкнутым контуром и жесткими узлами. Жесткость узлам придают фасонки совместно с приваренными к ним уголками поясов.

Свободные длины стержней в плоскости фермы равны расстоянию между фасонками, размеры их показаны на рис.4.1.

Под действием нагрузки в стержнях и узлах такой системы возникают не только продольные и поперечные силы, но и изгибающие моменты. Величины моментов, как известно, пропорциональны изгибным погонным жесткостям стержней, следовательно, дополнительные напряжения, выванные ими, также зависят от погонных (относительных) жесткостей. Опыт показывает, что при отношении высоты сечения к свободной длине, больше или равной 1:15, эти дополнительные напряжения не велики, поэтому в расчетах на прочность могут не учитываться. Система в таком случае может рассматриваться как ферма, у которой стержни в узлах соединены шарнирно, а следовательно, изгибающие моменты в них отсутствуют. В исследуемой модели это отношение в наклонно расположенных сжатых стержнях равно 1:6, а в растянутом нижнем поясе – 1:12, влияние изгибающих моментов при этом должно быть ощутимым. Требуется доказать это теоретически и проверить экспериментально.

3 Теоретическое определение усилий в стержнях фермы

1. Расчет модели как шарнирно-стержневой системы

Расчетная схема модели как фермы и усилие в стержнях от силы $\bar{P} = 1$ показаны на рис.4.2. Расчет выполнен методом вырезания узлов.

2. Расчет модели как рамы с жесткими узлами

Расчет выполнен методом конечных элементов по программе ЛИРА. Расчетная схема в КЭ и эпюры усилий от силы $\bar{P} = 1$ тс показаны на рис.4.3.

Так как испытательная нагрузка равна P , то усилия по рис.4.2 и 4.3, вычисленные от $\bar{P} = 1$ тс, следует увеличить пропорционально силе P , приняв их равными:

$$N = \bar{N} \cdot P; \quad M_x = \bar{M}_x \cdot P. \quad (4.1)$$

Нормальные напряжения в контрольных точках a и b расчетных поперечных сечений могут быть вычислены по формулам:

$$\sigma_a = \frac{N}{F} + \frac{M_x}{I_x} \cdot y_a; \quad (4.2)$$

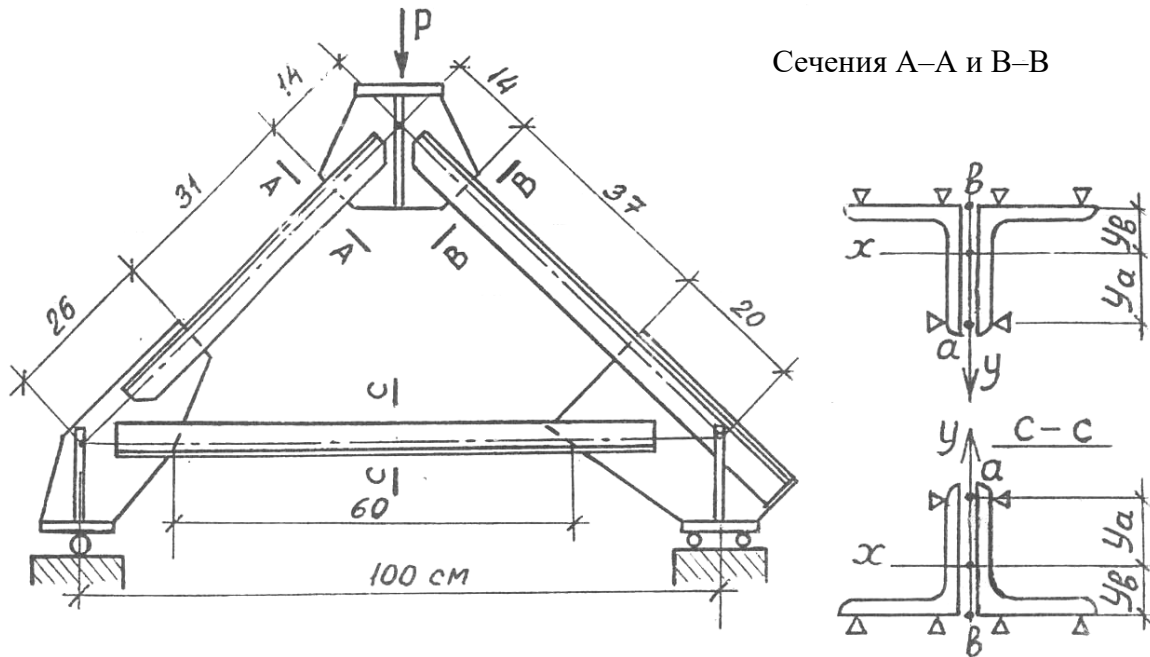


Рисунок 4.1 - Конструкция модели и схема нагружения

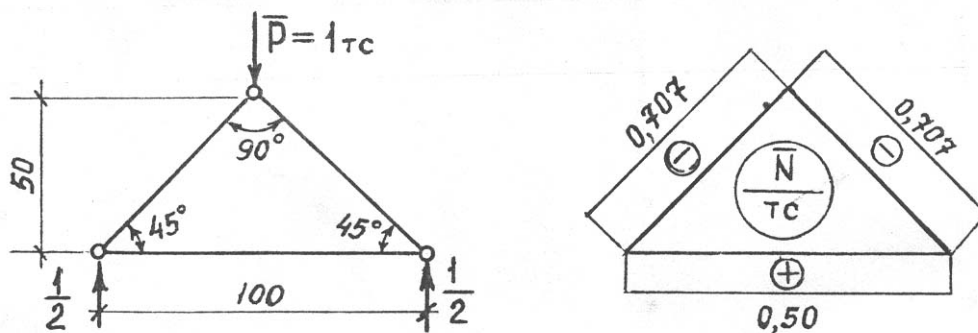


Рисунок 4.2 - Расчет по шарнирно-стержневой схеме

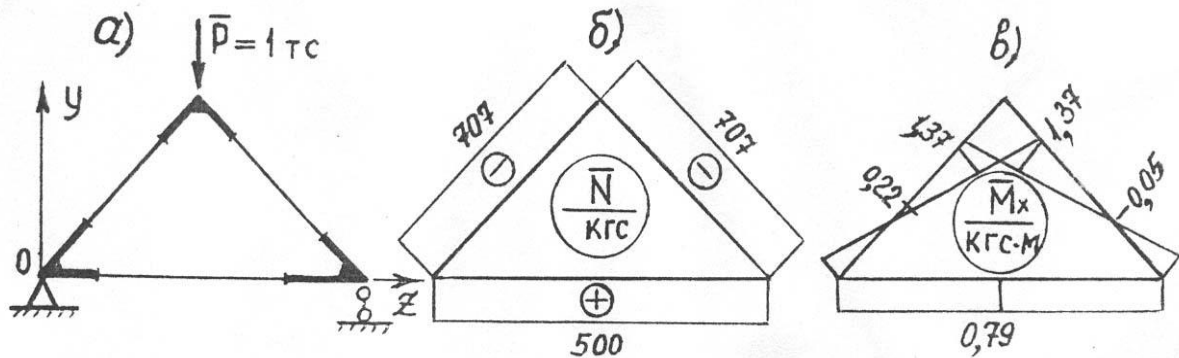


Рисунок 4.3 - Расчет по рамной схеме: а – схема в КЭ; б – эпюра продольных сил; в – эпюра изгибающих моментов

$$\sigma_b = \frac{N}{F} + \frac{M_x}{I_x} \cdot y_b; \quad (4.3)$$

где $F = 9,6 \text{ см}^2$; $I_x = 22,4 \text{ см}^4$ геометрические характеристики составного сечения из 2-х уголков 50x5; $y_a = 2,58 \text{ см}$; $y_b = 1,42 \text{ см}$ – ординаты расчетных точек (рис.4.1).

В формулах (4.2) и (4.3) сжимающие силы и напряжения следует принимать со знаком минус, а растягивающие – с плюсом.

4. Определение усилий по фибровым деформациям

На участках между фасонками все элементы модели испытывают одноосное напряженное состояние. При этом связь между напряжениями и деформациями выражается законом Гука:

$$\sigma_a = E \cdot \varepsilon_a; \quad \sigma_b = E \cdot \varepsilon_b. \quad (4.4)$$

Если из опыта известны относительные деформации ε_a в точке а и ε_b в точке b, то по формуле (4.4) можно определить опытные значения напряжений в этих точках.

Если в формулы (4.2) и (4.3) подставить выражения для σ_a и σ_b из формул (4.4), то, решив относительно N и M_x , получим:

$$N = E \cdot F \cdot \frac{y_a \cdot \varepsilon_b - y_b \cdot \varepsilon_a}{y_a - y_b}; \quad (4.5)$$

$$M_x = E \cdot I_x \cdot \frac{\varepsilon_a - \varepsilon_b}{y_a - y_b}; \quad (4.6)$$

Так как ε_a и ε_b – деформации, полученные из опыта, то и найденные усилия по формулам (4.5) и (4.6) также являются опытными, с ними следует сравнивать теоретические значения.

5 Методика испытания

После сборки тензометрического комплекса АИД включают в питающую сеть, дают прогреться в течение 30 мин, после чего проверяют работоспособность тензодатчиков во всех расчетных сечениях.

С помощью гидродомкрата к ферме прикладывают начальную нагрузку $P_0 = 500 \dots 1000$ кгс, последовательно снимают начальные отчеты n_0 по всем тензодатчикам и записывают их в рабочую тетрадь, табл.4.1. Затем нагрузку увеличивают на необходимую величину P и снова снимают отчеты n_p по всем тензодатчикам. По изменению отсчетов $\Delta n = n_p - n_0$ вычисляют приращение деформаций по каждому тензодатчику и средние значения в точках a и b каждого сечения.

Таблица 1 - Тензометрия расчетных сечений фермы

Обозначение и номера			Отсчеты по АИДу				Результат	
расчетных сечений	конт-рольных точек	тензо-дат. рис.1	n_0 при $P_0 = \dots$, кгс	n_p при $P = \dots$, кгс	$\Delta n = n_p - n_0$	Δn_{cp}	$\varepsilon_{cp} = \Delta n_{cp} \cdot 10^{-5}$	$\sigma_{cp} = 21 \cdot \Delta n_{cp}$
А-А	b	1-1						
		1-2						
		1-3						
		1-4						
	a	1-5						
		1-6						
В-В	b	1-7						
		1-8						
		1-9						
		1-10						
	a	1-11						
		1-12						
С-С	a	2-1						
		2-2						
	b	2-3						
		2-4						
		2-5						
		2-6						

6 Обработка результатов испытания

Средние напряжения в контрольных точках расчетных сечений вычислены в графе 9 табл.4.1.

По найденным средним деформациям ε_a^{cp} и σ_a^{cp} из графы 8, используя формулы (5) и (6), необходимо вычислить опытные значения усилий N_{on} и M_{on} в расчетных сечениях, результаты занести в табл.4.2. В эту же таблицу записывают теоретические значения усилий от такой же по величине нагрузки P .

Таблица 4.2 - Сравнение расчетных и опытных усилий

Сечение	Усилия N , кгс M_x , кгс·м σ , кгс/см ²	Из опыта		Из расчета по схеме			
		по формулам номер	Величина усилия	ферма		Рама	
				расчет	расчет опыт	расчет	расчет опыт
1	2	3	4	5	6	7	8
А-А	N	(5)					
	M_x	(6)					
	σ_a	(4)					
	σ_b	(4)					
В-В	N						
	M_x						
	σ_a						
	σ_b						
С-С	N						
	M_x						
	σ_a						
	σ_b						

Вычисления расчетных и опытных усилий должны быть произведены в рабочей тетради.

7 Вопросы для подготовки к защите

1. Чем отличается шарнирно-стержневая расчетная схема исследуемой модели от рамной? Как влияет выбор расчетной схемы на усилия в элементах конструкции?

2. Чем определяется свободная длина стержня в плоскости фермы? Покажите эту длину на модели или на чертеже.
3. Что такое погонная (относительная) жесткость стержня, как ее вычисляют? Как зависят усилия в стержнях фермы от погонных жесткостей?
4. При каких соотношениях размеров сечения и свободной длины возможен статический расчет конструкции по упрощенной шарнирно-стержневой схеме, при каких необходимо считать по рамной?
5. Покажите по результатам теоретических расчетов влияние расчетных схем на усилия в расчетных сечениях.
6. Поясните, как определены усилия в стержнях модели по шарнирностержневой схеме.
7. Почему в данном конкретном случае расчет по рамной схеме целесообразно выполнять МКЭ?
8. Как вычисляют усилия в расчетных сечениях по результатам испытания? Какую величину при этом измеряют экспериментально?
9. Какая из двух расчетных схем получила наилучшее экспериментальное подтверждение? Из каких фактов сделано Вами такое заключение?
10. Подтвердилось ли экспериментально влияние погонных жесткостей на распределение усилий в исследуемой стержневой системе?

Библиографический список

1. Металлические конструкции. Общий курс: Учебник для вузов/ Е.И. Беленя, В.А. Балдин и др.; Под ред. Е.И. Беленя. – М.:Стройиздат, 1986. – 560с.

2. Методы и средства испытания строительных конструкций: Учеб. пособие для вузов / Г. Я. Почтовик и др.; Под ред. Ю. А. Нилендера. – М.: Высш. школа, 1973. – 158 с.

3. Металлические конструкции. Т.1. Элементы стальных конструкций: Учеб. пособие для строит. вузов / В.В. Горев, Б.Ю. Уваров и др.; Под ред. В.В. Горева. – М.: Высшая школа, 1997. – 521 с.

4. Металлические конструкции. Конструкции зданий : учебник / под ред. В. В. Горева. - 3-е изд., стер. - М. : Высшая школа, 2004 - Т. 2. - 528 с.