

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Казанский государственный аграрный университет»

Институт механизации и технического сервиса

Кафедра общепрофессиональных дисциплин

СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ (Часть 4)

Лабораторный практикум для выполнения лабораторных и
самостоятельных работ для студентов очной и
заочной формы обучения по направлениям подготовки:

35.03.06 - «Агроинженерия»,
23.03.03 - «Эксплуатация транспортно -
технологических машин и комплексов»,
20.03.01 «Техносферная безопасность»,
23.05.01 – «Наземные транспортно-технологические средства»



Казань, 2018

УДК 808.2

ББК 141.2-7

Составители: Пикмуллин Г.В., Мустафин А.А.

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор кафедры «Эксплуатация и ремонт машин» Казанского ГАУ Адигамов Н.Р.

Кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической механики и сопротивления материалов КНИТУ Сидорин С.Г.

Лабораторный практикум для выполнения лабораторных и самостоятельных работ по сопротивлению материалов (часть 4) обсуждены и рекомендованы к печати на заседании кафедры общинженерных дисциплин Казанского ГАУ (протокол №7 от 09.01.2018г.) и заседании методической комиссии Института механизации и технического сервиса Казанского государственного аграрного университета (протокол №5 от 18.01.2018г.).

Пикмуллин Г.В. Лабораторный практикум для выполнения лаб. и самост. работ по сопротивлению материалов (часть 4) / Г.В. Пикмуллин, А.А Мустафин. - Казань: Изд-во Казанского ГАУ, 2018. - 36 с.

Лабораторный практикум предназначены для выполнения лабораторных и самостоятельных работ по дисциплине «Сопротивление материалов» и способствуют формированию общепрофессиональных и профессиональных компетенций для направлений подготовки: 35.03.06 «Агроинженерия», 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», 20.03.01 «Техносферная безопасность» и 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства».

УДК 808.2

ББК 141.2-7

©Казанский государственный аграрный университет, 2018г.

Введение

Основная цель лабораторных работ по сопротивлению материалов - изучение механических свойств материалов и экспериментальная проверка теоретических положений.

Для выполнения лабораторных работ студент должен предварительно ознакомиться с постановкой испытаний, устройством машин, приборов, порядком выполнения работ.

Должны быть выявлены цель и ожидаемые результаты лабораторной работы. Все наблюдения, записи и подсчёты вносятся в журнал в процессе выполнения лабораторной работы. Отчёт о выполненной работе должен быть закончен в лаборатории.

Самостоятельная работа студентов (домашние задания, рефераты, расчетно-графические работы и др.) должна обеспечить выработку навыков самостоятельного творческого подхода к решению технологических задач, дополнительную проработку основных положений дисциплины, приобретение навыков работы с научно-технической литературой.

Знания и навыки, полученные при изучении данного курса «Сопротивление материалов», широко применяются студентами при изучении других дисциплин на следующих курсах.

По окончании лабораторных работ проводится зачёт.

Настоящее методическое руководство разработано на основе многолетнего опыта кафедры «Общеинженерные дисциплины» Казанского ГАУ.

Лабораторная работа 15

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ ПРИ ИЗГИБЕ

Цель работы. Ознакомление с методикой определения ударной вязкости материалов. Оценка ударной вязкости различных материалов.

Теоретическая часть.

Большинство деталей сельскохозяйственной техники при эксплуатации подвергаются действию ударных нагрузок, когда ускорения движущихся масс мгновенно достигают очень больших величин. Ударное приложение нагрузки может привести к хрупкому разрушению такой сталь, которая при статическом приложении нагрузки разрушается вязко.

Мерой способности материала сопротивляться ударным нагрузкам принимается отношение работы W , затраченной на разрушение образца изгибающим ударом в месте удара, к площади поперечного сечения образца A . Эту характеристику называют ударной вязкостью материала:

$$КСИ = W/A. \quad (1)$$

Размерность ударной вязкости кГм/см^2 , Нм/м^2 , Дж/м^2 .

Кроме ударных испытаний на изгиб или ударной пробы можно производить ударные испытания на разрыв. Однако этот вид испытаний распространен мало ввиду большей сложности его осуществления.

Ударная проба хорошо выявляет свойства материалов при ударных нагрузках, обнаруживая склонность металлов к хрупкому разрушению, а также пороки, которые не выявляются при статических испытаниях.

Чем выше удельная ударная вязкость материала, тем лучше он сопротивляется ударным нагрузкам.

Государственным стандартом для испытания на удар установлена стандартная форма образцов, ослабленных надрезом (рисунок 1).

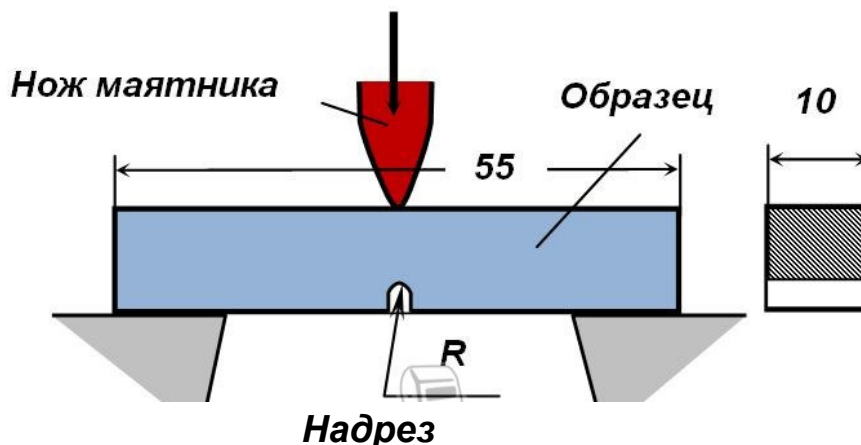


Рисунок 1 - Образец для испытания на удар

Надрез в образцах из пластического материала делают для того, чтобы лучше выявить склонность его к хрупкому разрушению при изгибающем ударе. У дна надреза из-за концентраций напряжений (резкого изменения площади поперечного сечения) возникает объемное напряженное состояние с положительными главными напряжениями. Эти напряжения затрудняют деформацию (пластическую) в материале образца и облегчают разрушение.

Испытание образцов с надрезом имеет большое практическое значение, так как большинство деталей машин, работающих при ударной нагрузке, имеют концентраторы напряжений – отверстия, шпоночные канавки, галтели, выточки и другие.

Разрушения образцов производят на маятниковых копрах.

Маятниковые копры для испытания на изгибающий удар

Маятниковые копры различаются по мощности (запасу энергии маятника) и по конструкции.

Маятниковый копер МК-5, принцип работы которого показан на рисунке 2 состоит из чугунной станины 3 и двух вертикальных стоек. В верхней части этих стоек с помощью шарикового подшипника оси подвешен на стальном стержне тяжелый диск 1. В диске имеется вырез, в котором закреплен стальной закаленный нож 2.

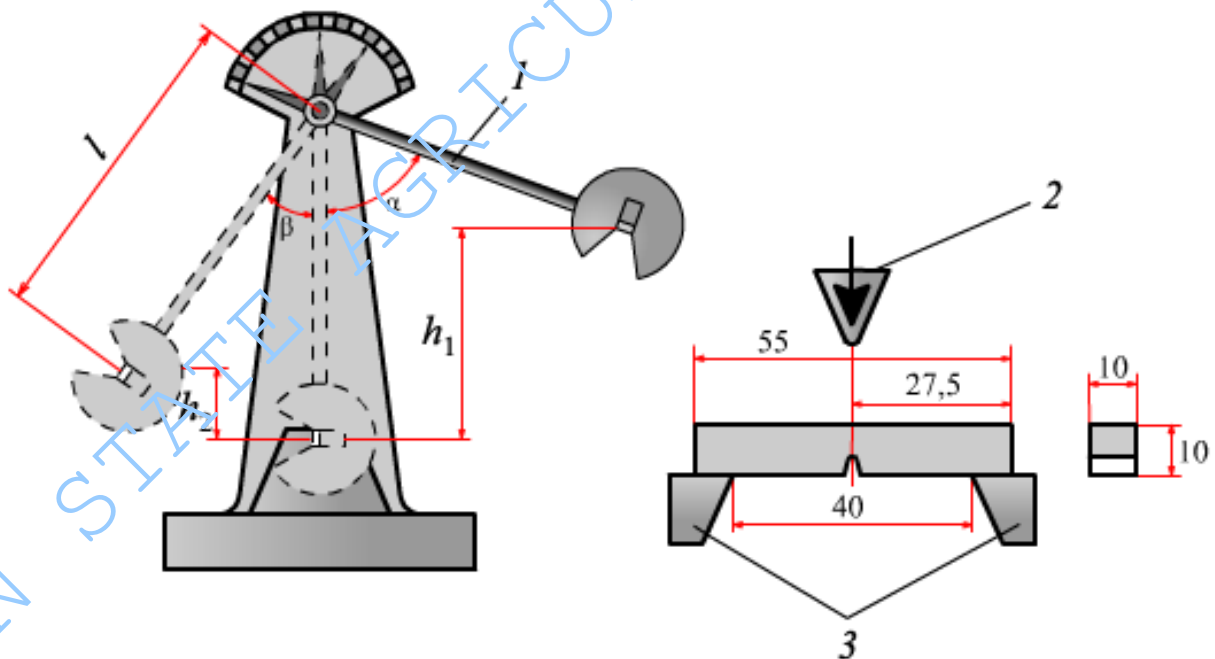


Рисунок 2 - Схема маятникового копра МК-5

Нож служит бойком при испытании. Перед испытанием маятник поднимают на определенную высоту h_1 и удерживают его в этом положении защелкой. В зависимости от того, на каком зубце стопорного механизма будет зафиксирован диск с маятником, можно получить различный запас

потенциальной энергии копра: 50, 40, 30 и 20 Н м (5, 4, 3, 2 кГм). Исходное отклонение маятника α выбирается в соответствии с ожидаемой величиной энергии на разрушение образца. Испытуемый образец устанавливают на две стальные закаленные опоры 3 у основания стоек. Величина пролета между опорами может меняться от 4 до 16 см.

При освобождении защелки маятник падает. При этом он разрушает образец и отклоняется в другую сторону за счет избыточного запаса энергии на угол β . После подъема на высоту h_2 маятник опускается вниз и начинает качаться.

Работа, затраченная на разрушение образца, равна разности потенциальной энергии маятника до и после удара:

$$W = Q(h_1 - h_2), \quad (2)$$

где Q - вес маятника; h_1 - высота подъема центра тяжести маятника до удара; h_2 - высота взлета центра тяжести маятника после разрушения образца.

Из рисунка 3 видно, что

$$h_2 = R - R \cos \alpha = R(1 - \cos \alpha); \quad (3)$$

$$h_1 = R - R \cos \beta = R(1 - \cos \beta), \quad (4)$$

где R - расстояние от оси вала, на котором подвешен маятник, до его центра тяжести.

$$\text{Тогда} \quad W = QR (\cos \beta - \cos \alpha). \quad (5)$$

Для определения углов подъема α и взлета β маятника на его подвижную ось 1 насажена концентрично с осью вращения контрольная стрелка 2 (рисунок 3). Стрелка удерживается на оси маятника трением, и перемещается по шкале 3 с делениями в градусах. Числовые значения на шкале возрастают сверху вниз. Перед испытанием при вертикальном положении маятника стрелку устанавливают в нулевое положение, отводя ее к упору 4. При подъеме маятника в исходное положение углов подъема и взлета маятника стрелка поворачивается на угол α по шкале. После удара маятник достигает наибольшего отклонения на угол β . Стрелка в этот момент остается неподвижной, так как она прижимается к упору 4, и после приведения маятника в отвесное положение укажет на шкале величину угла β .

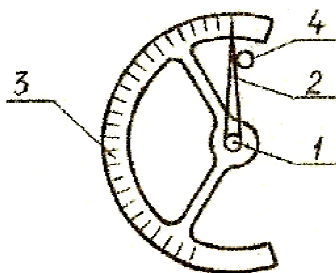


Рисунок 3 - Схема приспособления для замера

Маятниковый копер МК-30 мощностью 300 Н·м (30 кГ·м) имеет несколько иное устройство. Схема копра показана на рисунке 4.

Наиболее существенное отличие заключается в устройстве приспособления для измерения энергии, затраченной на разрушение образца. Устройство непосредственно показывает работу разрушения в кГ·м.

При подъеме маятника 1 палец 2 поднимет линейку 3 и вместе с ней шкалу 4 на величину, пропорциональную запасу энергии маятника перед падением.

При падении маятник разрушает образец 5 и, проходя через вертикальное положение, поднимает линейку 6 с указателем 7 на высоту, пропорциональную оставшейся энергии маятника после разрушения образца. Благодаря трению указатель после отхода маятника остается в наивысшем положении и на шкале отмечает величину работы, затраченной на разрушение образца.

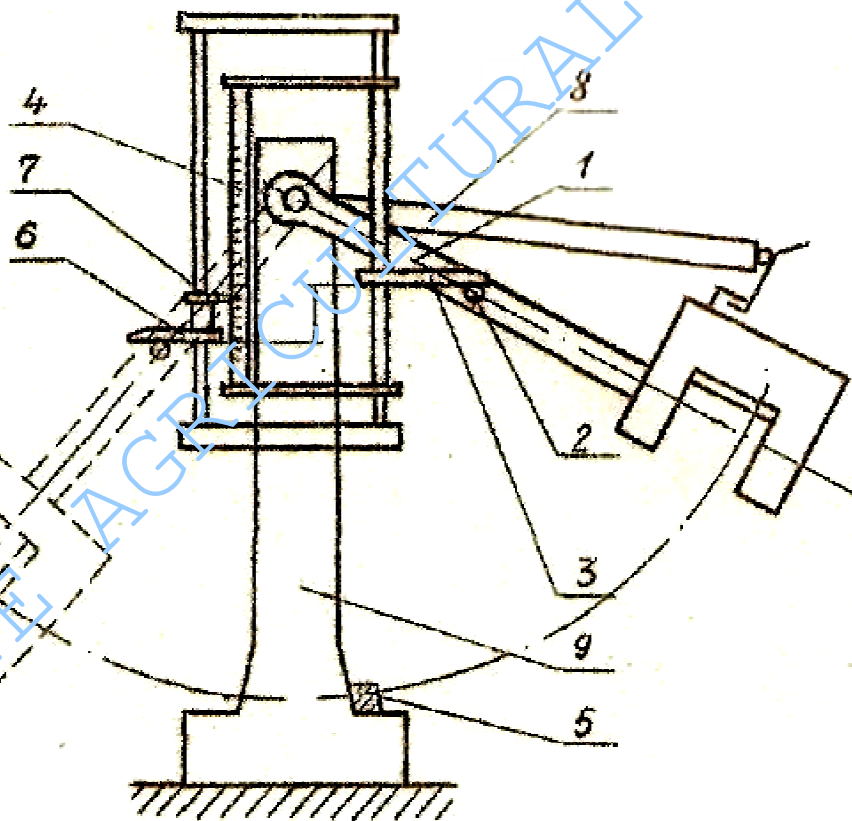


Рисунок 4 - Схема маятникового копра МК-30

Положение маятника до удара фиксируется с помощью рамки 8, которая может устанавливаться на любой высоте с помощью собачки храпового колеса, смонтированного у колонн 9. Маятник при подъеме удерживается защелкой рамы. Защелка связана шнурком рукояткой, укрепленной сбоку копра.

Маятниковый копер МК-30 имеет веревочный тормоз для предотвращения раскачивания маятника после удара.

Постановка работы. Перед испытанием образцов на маятниковом копре МК-5 стрелку подводят до упора при отвесном (вертикальном) положении маятника. Затем образец кладут на опоры так, чтобы удар падающего маятника происходил по сечению образца с противоположной, стороны надреза. Для этого маятник осторожно подводят к образцу, положенному на опоры, и устанавливают образец так, чтобы надрез находился на одной линии с острием ножа. Далее маятник копра поднимают на угол α и закрепляют защелкой.

Опускают защелку. Маятник, падая, производит удар по образцу. После остановки маятника отсчитывают угол взлета β маятника после удара.

При испытании образцов на маятниковом копре МК-30 поднимают раму. Затем поднимают маятник, закрепляют его к раме защелкой и запирают предохранительным диском. Высоту подъема маятника, то есть величину задаваемой энергии копра, регулируют в зависимости от размеров и материала образца. Задаваться большой энергией удара по сравнению с необходимой для разрушения образца не рекомендуется, так как в этом случае понижается точность результатов.

Далее опускают, измерительный прибор вниз до соприкосновения пальца 2 на маятнике (рисунок 4) с линейкой 3, также указатель 7 до соприкосновения с линейкой 6. Открывают предохранительный диск на раме. Становятся сбоку у копра и посредством веревки освобождают защелку. Маятник падает, разрушает образец. По показанию указателя отсчитывают по шкале работу, затраченную на разрушение образца.

По известным величинам углов подъема α и взлета β по приведенной выше формуле вычисляют работу, затраченную на разрушение образца при испытании на маятниковом копре МК-5.

Вычисляют площади изломов образцов. Определяют значения удельных ударных вязкостей материалов испытанных образцов на копрах МК-5 и МК-30 по приведенной выше формуле.

На основании экспериментов делают вывод: какой из испытанных материалов обладает большей ударной вязкостью.

Контрольные вопросы

1. Какая цель лабораторной работы?
2. Какое явление называют ударом?
3. Что понимается под ударной вязкостью материалов?

4. В каких единицах измеряется удельная ударная вязкость?
5. Что выявляется при ударной пробе материалов?
6. Для чего делают надрез в образцах для ударной пробы?
7. Расскажите устройство и работу маятниковых копров МК-5 и МК-30.
8. Как определяется работа, затраченная на разрушение образцов?

Содержание работы:

Лабораторная работа № 15

Дата « ____ » _____ 20 ____ г.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ ПРИ ИЗГИБЕ

Цель работы: Ознакомление с методикой определения ударной вязкости материалов. Оценка ударной вязкости различных материалов.

Оборудование: Маятниковые копры МК-5 и МК-30, стальные и деревянные образцы.

Содержание работы: определить удельную вязкость для различных материалов на МК-5 и МК-30.

Схема маятникового копра МК-5 Эскизы образцов с указанием размеров

1. Исходные характеристики образцов

№ п/п	Материал	Размеры образцов			Площадь излома	Расчетная длина между опорами
		Длина	Сторона квадрата	Ширина излома		
		l	a	b	A_0	l
		$м$	$м$	$м$	$м^2$	$м$

2. Экспериментальные данные

№ п/п	Материал	Угол подъема маятника	Угол вылета	Работа деформации на излом W	Относительная вязкость $a = \frac{W}{A_0}$
		α	β^0	H_m	$H_m / \text{м}^2$
Маятниковый копер МК-30					
Маятниковый копер МК-5					

3. Результаты испытаний:

Вывод

Исполнитель _____

Руководитель _____

Лабораторная работа 16

ДЕФОРМАЦИЯ БАЛКИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СВОБОДНОГО ПАДАЮЩЕГО (УДАР) ГРУЗА

Цель работы. Определение опытным путем величины прогиба балки при статическом и динамическом действии нагрузок и сравнение их с теоретическими значениями.

Теоретическая часть. Явление удара получается в том случае, когда скорость рассматриваемой части конструкции изменяется в очень короткий период времени.

При ударном нагружении, как и при других динамических нагрузках, напряжения и перемещения в упругой системе равны статическим, умноженным на коэффициент K_d , называемый динамическим коэффициентом:

$$\sigma_d = \sigma_{ст} \cdot K_d, \quad (1)$$

$$\Delta_d = \Delta_{ст} \cdot K_d. \quad (2)$$

Динамический коэффициент при ударе с учетом массы упругой системы балки и массы грузополучателя, лежащего на упругой системе в месте удара, определяется по формуле:

$$K_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{\Delta_{ст}(1 + \frac{Q}{F} + \alpha \frac{Q_6}{F})}} \quad (3)$$

где h - высота, с которой падает груз, весом F ; $\Delta_{ст}$ - статический прогиб балки под действием силы F в ударяемом сечении; Q - вес грузополучателя; Q_6 - вес упругой системы (ударяемого тела); α - коэффициент приведения массы, при изгибающем ударе по середине балки, лежащей на двух опорах, $\alpha=17/35$.

Испытательная установка. В этой работе применяется установка для исследования действия ударной нагрузки на балки типа СМ21М. Установка (рисунок 5) состоит из: исследуемого образца - балки 1, шарнирно-подвижной и шарнирно-неподвижной опор, пульта управления 2, штанги 3 с электромагнитом 4 и микрометрическим винтом 5.

Исследуемая балка изготовлена из пружинной стали 65Г и имеет прямоугольное сечение $3 \times 40 \text{ мм}^2$.

Электромагнит предназначен для удержания падающего груза 6 на требуемой высоте над исследуемой балкой.

Электромагнит установлен в кронштейне 7, который имеет возможность перемещаться вдоль штанги с отсчетом величины перемещения по шкале. Кронштейн с электромагнитом фиксируется при помощи стопорного винта. При обесточивании электромагнита шарик падает на грузоприемник (стакан) 8, установленный на балку. Внутренняя поверхность стакана выполнена конусно, что обеспечивает заклинивание упавшего шарика.

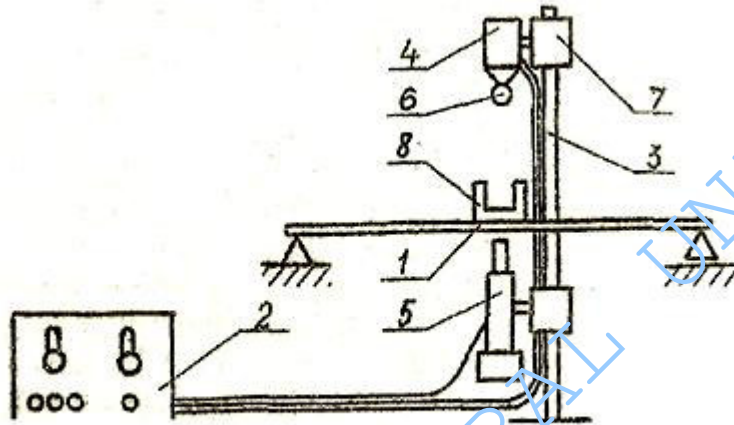


Рисунок 5 - Схема установки для исследования действия ударной нагрузки

Величина статического и динамического прогибов определяется с помощью микрометрического винта по моменту контакта торца винта с балкой. При прогибе балки, большем или равном зазору между балкой и торцом винта, загорается лампочка "контакт" на пульте управления. Если же прогиб балки меньше зазора, то лампочка не загорается.

Пульт управления выполнен в виде отдельного блока и смонтирован на основании установки. На лицевой панели пульта управления расположены следующие органы управления и сигнализации:

- 1) тумблер "220В" предназначен для включения электропитания пульта;
- 2) лампочка "СЕТЬ" сигнализирует о включении установки;
- 3) лампа "КОНТАКТ" служит для сигнализации момента контакта балки с микрометрическим винтом;
- 4) тумблер "ЭЛЕКТРОМАГНИТ-ЗАПИСЬ" служит для подачи питания на обмотку электромагнита (положение «ЭЛЕКТРОМАГНИТ»), а также для обесточивания электромагнита; (положение "ЗАПИСЬ");
- 5) кнопка "СБРОС" предназначена для возврата схемы в исходное положение перед производством следующего опыта.

Постановка работы. По известным размерам двухопорной балки - ширине b , высоте h поперечного сечения и длине пролета l - определяют

статический прогиб под действием силы, равной весу падающего груза - шарика и приложенной по середине пролета, по известной формуле:

$$\Delta_{\text{ст}} = \frac{Fl^3}{48EI}, \quad (4)$$

где $E = 200$ ГПа - модуль Юнга материала

$$I = \frac{bh^3}{12} - \text{момент инерции сечения.}$$

Далее по приведенным выше формулам вычисляют расчетные значения динамического коэффициента в соответствии с заданной преподавателем высотой h падения груза и динамического прогиба.

После вычисления теоретических значений статического и динамического прогибов определяют экспериментальные значения этих прогибов. Для этого устанавливают стакан весом 10Н (1кг) на балку посередине пролета. Подключают установку в сеть. Устанавливают микрометрический винт в нулевое положение по моменту касания винта с балкой и, соответственно, загорания лампочки "КОНТАКТ". Устанавливают зазор между балкой и микрометрическим винтом, большей величины теоретически определенного статического прогиба, нажимают на кнопку "СБРОС". Нагружают балку шариком, кладя его в стакан, и, подводя микрометрический винт к балке до касания, то есть загорания лампочки "КОНТАКТ", определяют статический прогиб.

Для определения динамического прогиба включают тумблер "ЭЛЕКТРОМАГНИТ" и подвешивают шарик к электромагниту. Устанавливают расстояние между шариком внутренней поверхностью стакана, равным высоте падения груза, а зазор между микрометрическим винтом и балкой, равным величине теоретического прогиба балки. Выключают тумблер "ЭЛЕКТРОМАГНИТ", шарик падает на балку и балка прогибается. В зависимости от загорания или не загорания лампочки «КОНТАКТ» увеличивают или уменьшают зазор между микрометрическим винтом и балкой и повторяют опыт. Опыт заканчивают тогда, когда при значениях зазора, отличающихся на $0,01$ мм (одно деление микрометрического винта), лампочка "КОНТАКТ" либо загорается, либо не загорается. После проведения каждого опыта лампочку "КОНТАКТ" выключают нажатием кнопки "СБРОС".

По величинам опытно определенных значений динамического и статического прогибов определяют опытное значение динамического коэффициента, как частное между этими прогибами.

Полученные теоретическим и опытным путем значения статического, динамического прогибов и динамического коэффициента заносят в таблицу 3.

Таблица 3 - Результаты испытаний

№ п/п	Высота падения груза h	Теоретические значения			Опытные значения		
		$\Delta_{ст}$	$\Delta_{д}$	$K_{д}$	$\Delta_{ст}$	$\Delta_{д}$	$K_{д}$
	m						

Сопоставляя опытное и теоретическое значения динамического коэффициента, нужно сделать вывод о справедливости формул теории удара. Расхождение между теоретическими и опытными значениями динамического коэффициента тем больше, чем больше высота падения груза. Это объясняется тем, что при теоретическом определении динамического коэффициента предполагают, что вся кинетическая энергия ударяющего груза целиком переходит в потенциальную энергию деформаций балки при изгибе. Это предположение неточно. Часть кинетической энергии ударяющего груза будет рассеяна, причем это рассеяние будет тем больше, чем выше высота падения груза.

Контрольные вопросы

1. Какое явление называется ударом?
2. Что называется динамическим коэффициентом при ударе?
3. Какова зависимость динамического коэффициента от жесткости балки?
4. Как определяют величину прогиба на опытной установке?
5. Объясните особенности динамического нагружения по сравнению со статическим.
6. Как определяются напряжения при ударе?
7. Чему равен динамический коэффициент при ударе?
8. Что понимают под внезапным приложением нагрузки?
9. Сформулируйте условие прочности при динамическом нагружении.

Содержание работы:

Лабораторная работа № 16

Дата «___» _____ 20 ____ г.

**ДЕФОРМАЦИЯ БАЛКИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СВОБОДНО
ПАДАЮЩЕГО ГРУЗА (УДАР)**

Цель работы. Определение опытным путем величины прогиба балки при статическом и динамическом действии нагрузок и сравнение их с теоретическими значениями.

Оборудование - установка для исследования действия ударной нагрузки на балки типа СМ21М

Содержание работы: по заданным параметрам определить прогиб балки при ударе и сравнить его с теоретическим прогибом.

Схема установки для исследования действия ударной нагрузки

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ

1. Исходные характеристики балки и прибора

№ п/п	Материал	Размеры балки			Данные прибора		
		толщина a	ширина b	длина l	α	Вес падающе- го груза F_1	Вес стакана F_2
		m	m	m		H	H

2. Экспериментальные данные

№ п/п	Высота падения груза h	Теоретические значения			Опытные значения		
		$\Delta_{ст}$	$\Delta_{д}$	$K_{д}$	$\Delta_{ст}$	$\Delta_{д}$	$K_{доп}$
	m	m		m	m		m

3. Теоретические расчеты динамического прогиба балки и сравнение его с опытным динамическим прогибом:

Теоретическое значение статического прогиба балки от действия груза:

$$\Delta_{ст} = \frac{Fl^3}{48EI} = \dots\dots\dots = \dots\dots\dots \text{см.}$$

Теоретическое значение динамического коэффициента с учетом массы балки:

$$K_{д} = 1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{\Delta_{ст}(1 + \frac{Q}{F} + \alpha \frac{Q_0}{F})}} = \dots\dots\dots = \dots\dots\dots$$

Расхождение между теоретическим и опытным значениями динамического коэффициента.

$$K_{д} - K_{доп} / K_{д} \cdot 100\% = \dots\dots\dots = \dots\dots\dots \%$$

ВЫВОДЫ

Исполнитель _____ Руководитель _____

Лабораторная работа № 17

Дата «___» _____ 20 ____ г.

УСТОЙЧИВОСТЬ СЖАТЫХ СТЕРЖНЕЙ

Цель работы заключается в изучении явления потери устойчивости прямолинейной формы упругого равновесия сжатого стержня и в опытной проверке формулы для определения величины критической силы и сравнение экспериментальных данных с теоретическими.

Оборудование: испытательный стенд, динамометр.

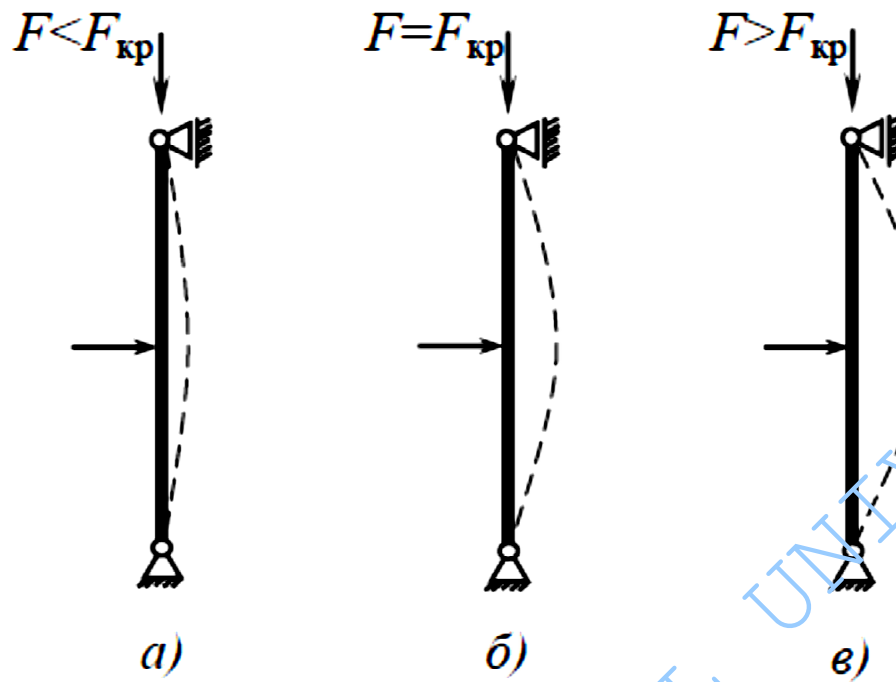
Теоретическая часть

В деформированном теле равновесие между внешними нагрузками и внутренними силами упругости может быть устойчивым и неустойчивым.

Между этими двумя состояниями равновесия находится переходное состояние, называемое критическим. При критическом состоянии деформированное тело находится в безразличном равновесии: оно может сохранять первоначальную форму равновесия, но может и потерять ее от самого незначительного воздействия и перейти к другой форме равновесия.

Как известно, потерей устойчивости деформации называется явление, при котором постепенный количественный рост силовых факторов приводит к внезапному, скачкообразному, качественному изменению вида деформации.

Стержень, центрально сжатый силой F , сохраняет свою первоначально прямолинейную форму. При попытках отклонить его в сторону, например, путем приложения кратковременно действующей небольшой горизонтальной силы он будет после ряда колебаний возвращаться к прямолинейной форме, как только будет удалена добавочная сила, вызвавшая отклонение, то есть прямолинейная форма упругого равновесия стержня устойчива (рисунок 6).



а – устойчивое положение равновесия;
 б – неустойчивое положение равновесия стержня;
 в – потеря устойчивости стержня

Рисунок 6 - Центральнo сжатый стержень.

При постепенном увеличении силы F стержень будет все медленнее возвращаться к первоначальному положению при проверках его устойчивости. Наконец, можно довести силу F до такой величины, при которой стержень после небольшого отклонения его в сторону не выпрямится, а останется искривленным.

При некотором значении силы F , называемом критическим, прямолинейная форма перестает быть устойчивой формой равновесия сжатого стержня (см. рисунок 6, б). Даже при небольшом превышении сжимающей силой F ее критического значения прямолинейная форма стержня делается неустойчивой. Стержень теряет устойчивость, выпучивается, что равносильно его разрушению (рисунок 6, в). Практически можно считать, что критическая сила $F_{кр}$ эквивалентна нагрузке, «разрушающей» сжатый стержень, выводящей его и связанную с ним конструкцию из условий нормальной работы.

Для обеспечения определенного запаса устойчивости необходимо, чтобы выполнялось условие:

$$F \leq [F], \quad (1)$$

где F – действующая нагрузка;

$[F]$ – допускаемая нагрузка, которая при коэффициенте запаса устойчивости n_y равна

$$[F]_{\text{кр}} = F_{\text{кр}} / n_y. \quad (2)$$

Наименьшая сила, при которой деформация сжатия становится неустойчивой, называется критической силой, и вычисляется по формуле, полученной Эйлером.

Теоретическая формула для определения критической силы (формула Эйлера) имеет вид

$$F_{\text{кр}} = \pi^2 EI_{\min} / (\mu l)^2 \quad (3)$$

где E – модуль продольной упругости материала стержня;

J_{\min} – минимальный осевой момент инерции поперечного сечения стержня;

μ – коэффициент, зависящий от способа закрепления концов стержня;

l – фактическая длина стержня.

Формулой Эйлера можно пользоваться только в случае, если справедлив закон Гука, то есть пока критическое напряжение $\sigma_{\text{кр}}$ возникшее в стержне при действии критической силы, не превышает предела пропорциональности:

$$\sigma_{\text{кр}} = \frac{F_{\text{кр}}}{A} \leq \sigma_{\text{пц}} \quad (4)$$

или

$$\sigma_{\text{кр}} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \leq \sigma_{\text{пц}}$$

где A – площадь поперечного сечения стержня;

$\lambda = \mu l / i_{\min}$ – гибкость стержня.

Условие (4) позволяет определить предельную гибкость стержня

$$\lambda_{\text{пред}} \geq \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\sigma_{\text{пц}}}}. \quad (5)$$

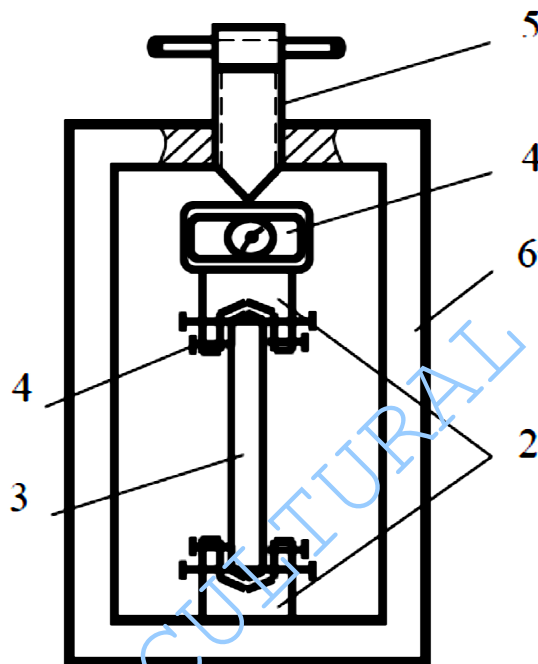
Здесь $\sigma_{\text{пц}}$ – предел пропорциональности материала стержня.

Формулу Эйлера для определения критической силы $F_{\text{кр}}$ можно использовать при условии $\lambda \geq \lambda_{\text{пред}}$.

При значениях гибкости $\lambda \leq \lambda_{\text{пред}}$ значение критического напряжения может быть вычислено согласно опытным данным по эмпирической формуле $\sigma_{\text{кр}} = a - b\lambda$. Значения постоянных коэффициентов a , b приведены в справочниках по сопротивлению материалов. Например, для стали Ст. 3 при $40 \leq \lambda \leq 100$: $a = 310$ МПа, $b = 1,14$ МПа.

Экспериментальная часть

Для испытаний на устойчивость используется стальной стержень с прямоугольным поперечным сечением ($b = 25$ мм, $h = 3,5$ мм). При расчетах принимаются следующие механические характеристики стали: $\sigma_{тл} = 200$ МПа, $E = 2 \cdot 10^5$ МПа. Схема установки для нагружения стержня представлена на рисунке 6.



1 – станина; 2 – приспособление для закрепления стержня;
3 – стержень; 4 – заземляющие болты; 5 – нажимной винт; 6 – динамометр
Рисунок 6 - Схема установки для нагружения стержня

Нагружение стержня производят при помощи нажимного винта 5, действующее усилие фиксируют динамометром 6. Приспособление для закрепления стержня позволяет осуществлять шарнирное закрепление и жесткое заземление как одного, так и обоих концов стержня. Стержень после замера вставляют в приспособление, где и осуществляют тот или иной способ закрепления его концов, при этом тщательно выверяют его вертикальное положение с помощью отвеса.

Значения нагрузки определяются по показаниям динамометра (таблицу 1). Результаты опыта заносят в таблицу 2.

Следует иметь в виду, что при проведении опыта не всегда удается избежать некоторых, казалось бы, маловажных обстоятельств (переменность сечения по длине стержня, недостаточная совершенность осуществления закрепления концов стержня, некоторая первоначальная кривизна и т.п.), влияющих на результаты испытаний. Но при тщательном проведении опыта расхождение не бывает большим, не превышает 10 %.

Контрольные вопросы

1. При каких условиях происходит потеря устойчивости стержней?
2. Каков вид формулы Эйлера для определения критической силы?
3. Каково влияние способов опорного закрепления на величину критической силы и гибкости сжатого стержня?
4. Выбор рационального сечения, обеспечивающего наибольшую устойчивость стержня.
5. Опишите схему установки.
6. Как экспериментально определяют критическую силу, действующую на сжатый стержень?
7. Что такое гибкость стержня?
8. Для стержней, какой гибкости справедлива формула Эйлера?
9. От какого параметра стержня зависит минимальный радиус инерции стержня в данной работе?
10. Каковы источники погрешности при проведении эксперимента?

Содержание работы:

1. Наименование и цель работы.
2. Оборудование, приборы, принадлежности.
3. Схема установки.
3. Экспериментальное и теоретическое значения критической силы.
4. Численные расчеты критических сил по формуле Эйлера при различных способах закрепления стержня.
4. Выводы.

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ

1. Исходные характеристики

Число делений динамометра	0	2	100	160	210	260	310
Действующая нагрузка, кг	0	100	200	300	400	500	600

2. Экспериментальные данные и результаты испытаний

Характеристика материала образца	Способ закрепления стержня		
	Оба конца шарнирно закреплены	Жесткое закрепление обоих концов	Смешанное закрепление
Длина стержня l , см	60	50	55
Площадь поперечного сечения образца A , см^2			
Осевой момент инерции сечения I_{min} , см^4			
Радиус инерции сечения $i_{min} = \sqrt{I_{min}/F}$			
Коэффициент приведения длины, μ			
Гибкость $\lambda = \mu l / i_{min}$			
Формула для вычисления критической силы			
Критическая сила, кН: - вычисленная - опытная			
Расхождение, %			

Расчеты критических сил по формуле Эйлера при различных способах закрепления стержня:

ВЫВОДЫ

Исполнитель _____

Руководитель _____

ЛИТЕРАТУРА

а) основная литература

1. Беляев Н.М. Лабораторные работы по сопротивлению материалов. - М., ГМТТЛ. 2002. - 286с.
2. Серазутдинов М.И. Прикладная механика: учебник / М.И.Серазутдинов, Э.Н. Островская, Н.П.Петухов, С.Г.Сидорин: под ред. М.Н. Серазутдинова – Казань, ООО Веда, 2011. – 322 с.
3. Степин П. А. Сопротивление материалов, М., «Высшая школа», 2010.
4. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. - М. Наука, 2003г- 590с.

б) дополнительная литература

5. Государственные стандарты на методы механических испытаний.
6. Синяговский И.С. Руководство к лабораторным работам по сопротивлению материалов/ И.С. Синяговский, А.Д. Двоеглазова, А.Ф. Засова, Г.Г. Баловнев - М., Высшая школа, 2001.-182с.
7. Пикмуллин Г.В. Методическое указание для выполнения лабораторных работ по сопротивлению материалов/ Г.В. Пикмуллин, А.А.Мустафин. Казань: Изд-во Казанского ГАУ, 2012. - 32 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ ЕДИНИЦАМИ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Наименование величин	Единица		Соотношение единиц
	Наименование	Обозначение	
Сила, нагрузка, вес	Ньютон	Н	1 Н, 0,1 кгс
Работа (энергия)	Джоуль	Дж	1 Дж, 0,1 кгс·м

КРАТНЫЕ И ДОЛЬНЫЕ ЕДИНИЦЫ СИ

Приставка	Обозначение	Множитель	Приставка	Обозначение	Множитель
Тера	Т	10^{12}	Деци	д	10^{-1}
Гига	Г	10^9	Санتي	с	10^{-2}
Мега	М	10^6	Милли	м	10^{-3}
Кило	К	10^3	Микро	Мк	10^{-6}
Гекто	Г	10^2	Нано	Н	10^{-9}
Дека	да	10^1	Пико	п	10^{-12}

ПРИМЕЧАНИЕ. Приставки рекомендуется выбирать таким образом, чтобы числовые значения величин находились в пределах 0,1-1000.

Ударная вязкость материала

Марка стали*	Толщина проката	Ударная вязкость, Дж/см ² , не менее				
		КСУ			КСV	
		+20 °С	−20 °С	после механического старения	+20 °С	−20 °С
СтЗпс	3,0-5,0	-	49	49	-	9,8
СтЗсп	5,1-10,0	108	49	49	34	-
СтЗГпс	10,1-26,0	98	29	29	34	-
СтЗГсп	26,1-40,0	88	-	-	-	-

* Для стали СтЗкп ударная вязкость не нормируется

Значения коэффициента приведенной длины μ
для центрально сжатых стержней

Схема закрепления концов стержня			
$\mu = 1$	$\mu = 0,7$	$\mu = 2$	$\mu = 0,5$

Значения постоянных коэффициентов a , b
формулы Ясинского $\sigma_{кр} = a - b\lambda$ и предельной гибкости $\lambda_{пред}$

Материал	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	λ_θ	$\lambda_{пред}$
	МПа				
Ст2	264	0,70	–	62	105
Ст3	310	1,14	–	61	100
Ст4	328	1,15	–	60	96
Ст5	350	1,15	–	57	92
10Г2С, 15ГС, 15ХСНД	429	1,52	–	50	83
Дюралюминий Д16Т	406	2,83	–	30	53
Дерево (сосна, ель)	40	0,203	–	–	59
Чугун	776	12	0,053	–	80

Значения коэффициента φ продольного изгиба для центрально-сжатых элементов

Гибкость λ	Сталь	Чугун	Алюминий	Железобетон	Бетон В20	Древесина (сосна, ель)
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
10	0.99	0.97	1.00	1.00	1.00	0.99
20	0.97	0.91	1.00	1.00	0.96	0.97
30	0.95	0.81	0.83	1.00	0.90	0.93
40	0.92	0.69	0.70	1.00	0.84	0.87
50	0.89	0.57	0.57	1.00	0.76	0.80
60	0.86	0.44	0.45	0.83	0.70	0.71
70	0.81	0.34	0.35	0.73	0.63	0.61
80	0.75	0.26	0.27	0.64	0.57	0.49
90	0.69	0.20	0.21	0.57	0.51	0.38
100	0.60	0.16	0.17	0.52	0.45	0.31
110	0.52	-	0.14	-	-	0.25
120	0.45	-	0.12	-	-	0.22
130	0.40	-	0.10	-	-	0.18
140	0.36	-	0.09	-	-	0.16
150	0.32	-	0.08	-	-	0.14
160	0.29	-	-	-	-	0.12
170	0.26	-	-	-	-	0.11
180	0.23	-	-	-	-	0.10
190	0.21	-	-	-	-	0.09
200	0.19	-	-	-	-	0.08
210	0.17	-	-	-	-	0.07
220	0.16	-	-	-	-	0.06

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
Лабораторная работа 15 . Определение удельной ударной вязкости при изгибе.....	4
Лабораторная работа 16. Деформация балки под действием свободно падающего груза (удар).....	11
Лабораторная работа 17. Устойчивость сжатых стержней.....	17
Литература.....	24
Приложение.....	25