

Рецензия

на электронную лекцию «Выбор оптимального круглого/кольцевого поперечного сечения стальных стержней работающих на кручение» для дополнительного изучения отдельных тем учебной дисциплины «Техническая механика» преподавателя специальных дисциплин **Чемезова Д.А.**

Электронная лекция «Выбор оптимального круглого/кольцевого поперечного сечения стальных стержней работающих на кручение» для дополнительного изучения отдельных тем учебной дисциплины «Техническая механика» предназначена для использования в среднем профессиональном образовании по специальности 151901 «Технология машиностроения». Лекция представляет собой материалы научно-исследовательского характера полностью соответствующие ФГОС по специальности.

Лекция содержит следующие разделы: введение, материалы и методы исследования, результаты и их обсуждение, заключение, библиографический список и вопросы для самостоятельного контроля изученного материала.

Каждый раздел лекции сопровождается понятной для студентов информацией, в которой описывается актуальность проводимого исследования, последовательность выполнения экспериментов, даются рекомендации по возможному использованию полученных результатов на практике.

Представленные лекции позволяют организовать индивидуальную и групповую научно-исследовательскую работу в различных условиях обучения: дифференцированного, интегрированного, самостоятельного и могут использоваться для подведения промежуточных тематических итогов.

Электронная лекция полностью адаптирована к производственному процессу.

Приведенные в лекции задачи могут быть практически выполнены с помощью компьютерных программ трехмерного моделирования и инженерного анализа КОМПАС 3D, SolidWorks, Ansys Workbench.

Электронные лекции рекомендованы для распространения и внедрения передового опыта на территории РФ по специальности 151901 «Технология машиностроения».



В.Р. Чубанов

*(Технический директор -
начальник управления
ОАО «Завод «Автоприбор»*

Согласовано

« 11 марта 2016 г. »



УТВЕРЖДАЮ

Директор ГБПОУ ВО «ВИК»

« 11 марта 2016 г. »



**Электронные лекции для дополнительного изучения отдельных тем
по учебной дисциплине «Техническая механика»**

Тема: «Выбор оптимального круглого/кольцевого поперечного сечения стальных стержней работающих на кручение»

Для обучающихся специальности 151901 (Технология машиностроения)

Разработчик: Чемезов Д.А., преподаватель спец. дисциплин
ГБПОУ ВО «Владимирский индустриальный колледж»

Электронные лекции для дополнительного изучения дисциплины «Техническая механика» представляют собой материалы научно-исследовательского характера отдельных тем курса. Материалы предназначены для самостоятельного изучения студентами.

РАССМОТРЕНО:

Председатель метод. комиссии

 Т.Н.Комарова

« 10 » марта 2016 г.

Лекция 1 (2 ч)

Выбор оптимального круглого/кольцевого поперечного сечения стальных стержней работающих на кручение

План

1. Введение
2. Материалы и методы исследования
3. Результаты и их обсуждение
4. Заключение

Библиографический список

1. ГОСТ 3565-80. Металлы. Метод испытания на кручение.
2. Конечно-элементный анализ в SolidWorks Simulation [Электронный ресурс] <http://cadregion.ru/solidworks-simulation/konechno-elementnyj-analiz-v-solidworks-simulation.html>
3. Плотность энергии [Электронный ресурс] https://ru.wikipedia.org/wiki/%CF%EB%EE%F2%ED%EE%F1%F2%FC_%FD%ED%E5%F0%E3%E8%E8
4. Энергия деформации [Электронный ресурс] http://lib.sernam.ru/book_tupr.php?id=92

1. Введение

Прочностные характеристики деталей машин определяются путем испытаний образцов на изгиб, растяжение, сжатие, кручение и др. Испытания на кручение цилиндрических образцов, изготовленных из конструкционной стали, выполняются для нахождения модуля сдвига, предела пропорциональности, предела текучести, условного и истинного предела прочности, максимального остаточного сдвига и характера разрушения материала. Величины деформации и напряжения материала будут зависеть от ряда факторов, одним из которых является геометрическая форма детали в поперечном сечении. Детали, работающие на кручение, могут быть сплошными (круглого поперечного сечения) и полые (кольцевого поперечного сечения) для облегчения изделия и соответственно экономии материала. Известно, что по прочности детали с кольцевым поперечным сечением не уступают деталям с круговым поперечным сечением. Расчет напряженно-деформированного состояния материала и последующий анализ результатов, позволит выбрать оптимальное круглое/кольцевое поперечное сечение стальных стержней.

2. Материалы и методы исследования

Испытаниям на кручение подвергались пять цилиндрических образцов наружными диаметрами 50 мм, которые одним свободным концом были заделаны в стену. Первый испытуемый образец имел круглое поперечное сечение, остальные – кольцевые поперечные сечения с различными внутренними диаметрами. Образцы

изготавливались из одного материала – конструкционной стали Ст3сп (*DIN S235J2G3*) имеющей следующие физико-механические свойства: плотность – 7800 кг/м³; предел текучести – $2,35 \times 10^8$ Н/м²; предел прочности при растяжении – $3,6 \times 10^8$ Н/м²; модуль упругости – $2,1 \times 10^{11}$ Н/м²; коэффициент Пуассона – 0,28; модуль сдвига – $7,9 \times 10^{10}$ Н/м²; коэффициент теплового расширения – $1,1 \times 10^{-5}$ К⁻¹. Объемные свойства образцов представлены в табл. 1.

Таблица 1
Объемные свойства образцов.

№ образца	Масса, кг	Объем, м ³
1	7,657	0,00098
2	7,351	0,00094
3	6,432	0,00082
4	4,9	0,00062
5	2,756	0,00035

К образцам был приложен вращающий момент величиной 250 Н × м. Графическое изображение постановки исследования представлено на рис. 1.

Испытания осуществлялись способом имитационного нагружения твердотельных объемных моделей образцов в компьютерной программе SolidWorks. Решение выполнялось адаптивным методом (*h* – метод) с целевой точностью 98 %.

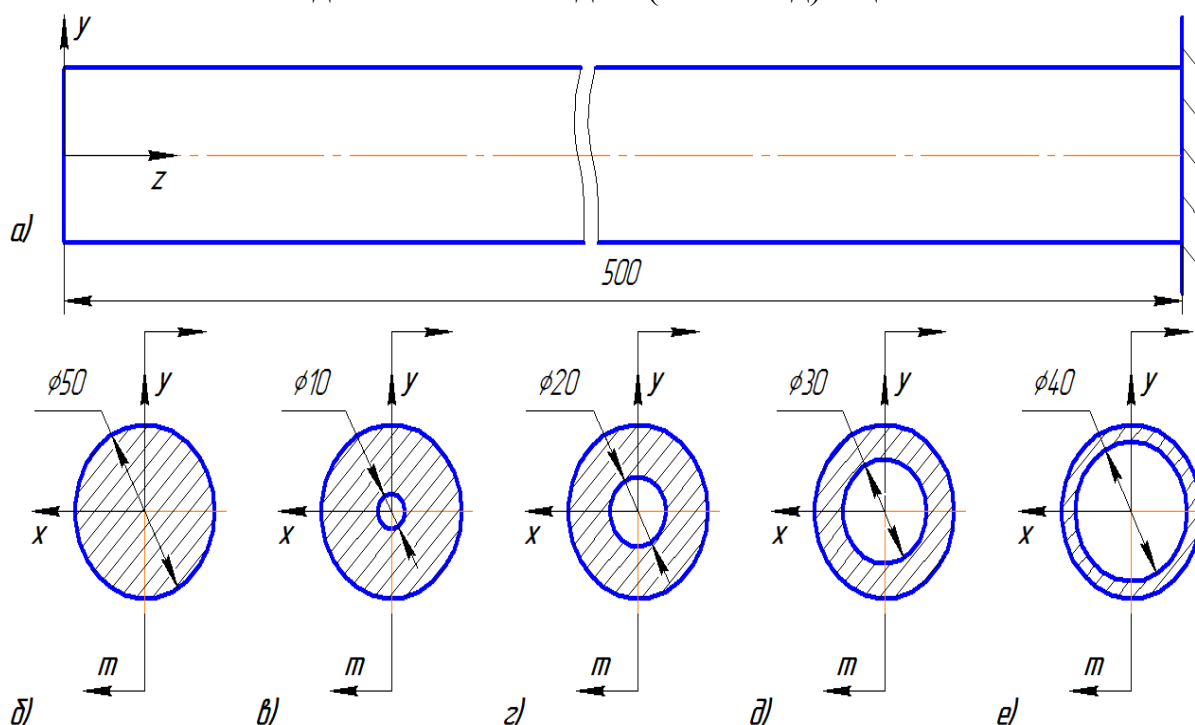


Рисунок 1 – Постановка исследования: а – главный вид круглого стержня имеющего жесткую заделку с одного конца; б – геометрическая форма и размер образца 1 в поперечном сечении; в – геометрическая форма и размер образца 2 в поперечном сечении; г – геометрическая форма и размер образца 3 в поперечном сечении; д – геометрическая форма и размер образца 4 в поперечном сечении; е – геометрическая форма и размер образца 5 в поперечном сечении. *m* – наружный вращающий момент равный 250 Н × м.

3. Результаты и их обсуждение

Результаты расчета представлены в сводной табл. 2:

1) напряженное состояние материала образцов

а) напряжение Von Mises (VON) – величина напряжения, рассчитанная исходя из составляющих напряжения твердого тела;

б) нормальные напряжения по координатным осям (SX , SY , SZ) – составляющие (компоненты) напряженного состояния твердого тела в рассматриваемой точке;

в) сдвиги по координатным осям на плоскостях (THY , THZ , THZ) – составляющие (компоненты) напряженного состояния тела, определяющие совокупность напряжений, возникающих по различным осям и в различных плоскостях;

г) главные напряжения ($P1$, $P2$, $P3$) – 3 компонента нормальных напряжений определяемые в направлениях без учета касательных напряжений;

д) интенсивность напряжения (INT) – величина, определяющая касательное напряжение на элементарной площадке, одинаково наклонённой к главным осям напряжений в точке;

е) ошибка энергетической нормы (ERR) – степень точности нормы энергии напряженного материала.

2) перемещение образцов относительно начального положения

а) перемещения по координатным осям (UX , UY , UZ) – составляющие результирующего перемещения;

б) результирующее перемещение ($URES$) – векторная сумма последовательных перемещений образцов по координатным осям относительно начального положения;

в) силы реакций по координатным осям (RFX , RFY , RFZ) – силы, направленные перпендикулярно поверхности соприкосновения;

г) результирующая сила реакции ($RFRES$) – алгебраическая сумма сил реакций по координатным осям;

3) деформированное состояние материала образцов

а) нормальные деформации по координатным осям ($EPSX$, $EPSY$, $EPSZ$) – составляющие эквивалентной деформации материала. Определяются как приращение длины твёрдого тела к исходной длине в рассматриваемом направлении;

б) эквивалентная деформация ($ESTRN$) – алгебраическая сумма нормальных деформаций и сдвигов по координатным осям;

в) сдвиги по координатным осям на плоскостях ($GMXY$, $GMXZ$, $GMYZ$) – составляющие (компоненты) деформированного состояния тела, определяющие совокупность деформаций, возникающих по различным осям и в различных плоскостях;

г) плотность энергии деформации ($SEDENS$) – количество энергии на единицу объёма твердого тела;

д) суммарная энергия деформации ($ENERGY$) – суммарная работа, приходящаяся на единицу объема твердого тела;

е) деформации в главных направлениях ($E1, E2, E3$) – деформации твердого тела в трех ортогональных направлениях (главные оси деформации – максимум, минимум и минимакс);

4) нагруженное состояние испытываемых образцов

а) design insight – процентное выражение нагруженных участков образцов от общего объема стержней.

5) запас прочности материала образцов

а) по критерию максимального напряжения von Mises ($FOS1,2$) – основывается на теории Мизес-Хенки. Пластичный материал начинает повреждаться в местах, где напряжение по Мизесу становится равным предельному напряжению. В большинстве случаев, предел текучести используется в качестве предельного напряжения;

б) по критерию максимального напряжения при сдвиге (Tresca) ($FOS3,4$) – прогнозирует разрушение материала в случаях, когда абсолютный максимум напряжения сдвига достигнет нагрузки, которая вызывает повреждение материала.

Таблица 2

Максимальные значения напряжения, перемещения относительно начального положения и деформации материала образцов под нагрузкой.

Параметр, единица измерения	1 образец	2 образец	3 образец	4 образец	5 образец
Напряжение von Mises, Н/мм ²	18,064	18,068	18,509	20,638	30,19
Нормальное напряжение X, Н/мм ²	0,146	0,166	0,141	0,144	0,148
Нормальное напряжение Y, Н/мм ²	0,154	0,158	0,143	0,143	0,151
Нормальное напряжение Z, Н/мм ²	0,031	0,061	0,023	0,018	0,036
Сдвиг по Y на плоскости YZ, Н/мм ²	0,137	0,131	0,135	0,133	0,134
Сдвиг по Z на плоскости YZ, Н/мм ²	10,35	10,383	10,666	11,866	17,386
Сдвиг по Z на плоскости XZ, Н/мм ²	10,407	10,424	10,643	11,865	17,373
1-ое главное напряжение, Н/мм ²	10,43	10,434	10,691	11,91	17,43
2-ое главное напряжение, Н/мм ²	0,058	0,061	0,022	0,016	0,034
3-ее главное напряжение, Н/мм ²	-0,0002	$9,85 \times 10^{-5}$	-0,0001	-0,0001	0,00075
Интенсивность напряжения, Н/мм ²	20,86	20,863	21,373	23,831	34,86
Ошибка энергетической нормы	0,575	0,736	0,67	0,553	0,323
Перемещение X, мм	0,031	0,031	0,031	0,035	0,052
Перемещение Y, мм	0,031	0,031	0,031	0,035	0,052
Перемещение Z, мм	$1,26 \times 10^{-6}$	$9,85 \times 10^{-7}$	$1,28 \times 10^{-6}$	$1,09 \times 10^{-6}$	$1,47 \times 10^{-6}$
Результирующее перемещение, мм	0,031	0,031	0,031	0,035	0,052
Сила реакции X, Н	34,548	31,407	30,167	33,066	48,963
Сила реакции Y, Н	34,632	33,53	34,33	34,648	42,409
Сила реакции Z, Н	0,015	0,038	0,022	0,032	0,03
Результирующая сила реакции, Н	37,706	34,062	37,464	37,385	54,149
Нормальная деформация по оси X	$8,32 \times 10^{-7}$	$8,29 \times 10^{-7}$	$8,20 \times 10^{-7}$	$8,28 \times 10^{-7}$	$8,49 \times 10^{-7}$
Нормальная деформация по оси Y	$8,26 \times 10^{-7}$	$8,27 \times 10^{-7}$	$8,29 \times 10^{-7}$	$8,23 \times 10^{-7}$	$8,45 \times 10^{-7}$
Нормальная деформация по оси Z	$7,26 \times 10^{-8}$	$6,65 \times 10^{-8}$	$7,52 \times 10^{-8}$	$5,12 \times 10^{-8}$	$6,73 \times 10^{-8}$
Эквивалентная деформация	$7,16 \times 10^{-5}$	$7,17 \times 10^{-5}$	$7,34 \times 10^{-5}$	$8,20 \times 10^{-5}$	0,00012
Сдвиг по Y на плоскости YZ	$1,67 \times 10^{-6}$	$1,6 \times 10^{-6}$	$1,64 \times 10^{-6}$	$1,6 \times 10^{-6}$	$1,63 \times 10^{-6}$
Сдвиг по Z на плоскости YZ	0,0001	0,00012	0,00013	0,00014	0,00021
Сдвиг по Z на плоскости XZ	0,0001	0,00012	0,00013	0,00014	0,00021
Плотность энергии деформации, (Н × м) / м ³	631,654	634,306	665,013	829,468	1780,14
Суммарная энергия деформации, Н × м	$3,89 \times 10^{-6}$	$4,64 \times 10^{-6}$	$3,86 \times 10^{-6}$	$5,69 \times 10^{-6}$	$9,44 \times 10^{-6}$
Деформации в 1, 2, 3 главных направлениях	0,00011	0,00012	0,00012	0,00013	0,0002
Design insight, %	47,75	47,79	49,61	48,4	48,04
Запас прочности					
Максимальное напряжение von Mises – предел текучести, Н/мм ²	681790	316965	296822	410722	184565

Максимальное напряжение von Mises – предел прочности, Н/мм ²	1044444	485563	454707	629191	282738
Максимальное напряжение при сдвиге (Tresca) – предел текучести, Н/мм ²	609410	275009	271164	356078	162314
Максимальное напряжение при сдвиге (Tresca) – предел прочности, Н/мм ²	933564	421291	415400	545481	248651

Проведена статистическая обработка результатов моделирования. Наименьшие значения напряжения, перемещения и деформации материала и наибольшие величины запаса прочности образцов принимались за один балл. Наибольшие значения параметров не учитывались.

1 образец – 22 балла (*VON, TXZ, TYZ, P1, P3, INT, UX, UY, URES, RFZ, ESTRN, GMXZ, GMYZ, SEDENS, E1, E2, E3, Design insight, FOS1, FOS2, FOS3, FOS4*).

2 образец – 17 баллов (*VON, TXY, TXZ, TYZ, P1, INT, UX, UY, UZ, URES, RFY, RFRES, EPSY, ESTRN, GMXY, SEDENS, Design insight*).

3 образец – 13 баллов (*VON, SX, SY, TXZ, TYZ, P1, UX, UY, URES, RFX, EPSX, SEDENS, ENERGY*).

4 образец – 5 баллов (*SY, SZ, P2, EPSZ, GMXY*).

5 образец – 1 балл (*ERR*).

4. Заключение

Принимая напряженно-деформированное состояние материала стержня круглого сечения за наименьшее, определено, что практически аналогичным характеристикам соответствуют второй и третий образцы, а по нескольким параметрам превосходят первый образец. Таким образом, оптимальное поперечное сечение стержня (1), работающего на кручение, должно выбираться в пределах (первое значение – для кольцевого поперечного сечения):

$$(D \leq 0,4d); d, \quad (1)$$

где d – наружный диаметр образца круглого поперечного сечения, мм; D – внутренний диаметр образца, мм.

Вопросы для самоконтроля

1. Значение испытаний деталей на кручение?
2. Что такое напряжение по фон Мизесу и нормальные напряжения?
3. По каким критериям определяют запас прочности материала?
4. Сравните запас прочности стержня с круглым поперечным сечением и кольцевым?
5. Что такое сила реакции?