

Impact Factor ISRA (India) = 1.344
Impact Factor ISI (Dubai, UAE) = 0.829
based on International Citation Report (ICR)
Impact Factor GIF (Australia) = 0.356

Impact Factor JIF = 1.500
Impact Factor SIS (USA) = 0.438
Impact Factor ПИИЦ (Russia) = 0.179

SOI: [1.1/TAS](http://s-o-i.org/1.1/TAS) DOI: [10.15863/TAS](https://doi.org/10.15863/TAS)

International Scientific Journal Theoretical & Applied Science

p-ISSN: 2308-4944 (print) e-ISSN: 2409-0085 (online)

Year: 2015 Issue: 03 Volume: 23

Published: 30.03.2015 <http://T-Science.org>



Denis Alexandrovich Chemezov
Master of Engineering and
Technology, Corresponding
member of International
Academy TAS, Lecturer of
Vladimir Industrial College,
Russia
chemezov-da@yandex.ru

SECTION 7. Mechanics and machine construction.

THE CHOICE OF THE OPTIMAL ROUND/RING CROSS-SECTION STEEL RODS RUNNING TORSION

Abstract: The article presents a research of the values of strain and stress of the steel rods of round and ring cross-sections in the application to them of torsion torque. Defined the optimal cross-section, providing the greatest strength of the rod and rational material savings.

Key words: test sample, strain, stress, displacement.

Language: Russian

Citation: Chemezov DA (2015) THE CHOICE OF THE OPTIMAL ROUND/RING CROSS-SECTION STEEL RODS RUNNING TORSION. ISJ Theoretical & Applied Science 03 (23): 44-48.

Soi: [http://s-o-i.org/1.1/TAS*03\(23\)9](http://s-o-i.org/1.1/TAS*03(23)9) **Doi:**  <http://dx.doi.org/10.15863/TAS.2015.03.23.9>

УДК 620.162.3

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО КРУГЛОГО/КОЛЬЦЕВОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ СТАЛЬНЫХ СТЕРЖНЕЙ РАБОТАЮЩИХ НА КРУЧЕНИЕ

Аннотация: В статье представлено исследование величин деформирования и напряжения стальных стержней круглого и кольцевого поперечных сечений при приложении на них вращающего момента. Определено оптимальное поперечное сечение, обеспечивающее наибольшую прочность стержня и рациональную экономию материала.

Ключевые слова: образец, деформация, напряжение, перемещение.

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 [1]. 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.

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



Impact Factor ISRA (India) = 1.344
 Impact Factor ISI (Dubai, UAE) = 0.829
 based on International Citation Report (ICR)
 Impact Factor GIF (Australia) = 0.356

Impact Factor JIF = 1.500
 Impact Factor SIS (USA) = 0.438
 Impact Factor РИНЦ (Russia) = 0.179

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 %.

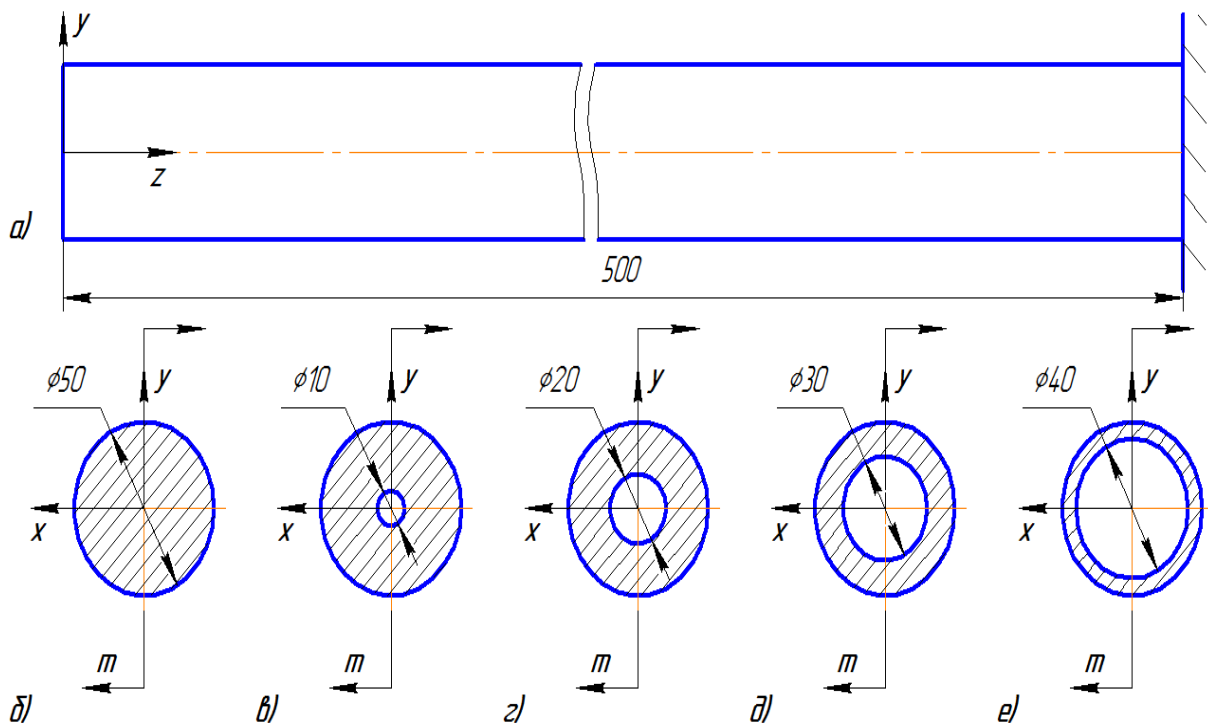


Рисунок 1 – Постановка исследования: а – главный вид круглого стержня имеющего жесткую заделку с одного конца; б – геометрическая форма и размер образца 1 в поперечном сечении; в – геометрическая форма и размер образца 2 в поперечном сечении; г – геометрическая форма и размер образца 3 в поперечном сечении; 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.

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 [2];

б) нормальные напряжения по координатным осям (*SX, SY, SZ*) – составляющие

(компоненты) напряженного состояния твердого тела в рассматриваемой точке [3];

в) сдвиги по координатным осям на плоскостях (TXU , TXZ , TYZ) – 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 [4];

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 [5];

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 [6];

д) суммарная энергия деформации ($ENERGY$) – суммарная работа, приходящаяся на единицу объёма твердого тела [7];

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 объёма 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 [8];

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 [9].

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

Impact Factor ISRA (India) = 1.344
 Impact Factor ISI (Dubai, UAE) = 0.829
 based on International Citation Report (ICR)
 Impact Factor GIF (Australia) = 0.356

Impact Factor JIF = 1.500
 Impact Factor SIS (USA) = 0.438
 Impact Factor PИИЦ (Russia) = 0.179

3-е 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*).

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.

Impact Factor ISRA (India) = 1.344
Impact Factor ISI (Dubai, UAE) = 0.829
based on International Citation Report (ICR)
Impact Factor GIF (Australia) = 0.356

Impact Factor JIF = 1.500
Impact Factor SIS (USA) = 0.438
Impact Factor PИИЦ (Russia) = 0.179

References:

1. GOST 3565-80. Metally. Metod ispytaniya na kruchenie.
2. (2015) Konechno-elementny analiz v SolidWorks Simulation. Available: <http://cadregion.ru/solidworks-simulation/konechno-elementnyj-analiz-v-solidworks-simulation.html> (Accessed: 14.03.2015).
3. (2015) Napryajennoe i deformirovannoe sostoyanie chasticy tela. Available: <http://www.soprotmat.ru/tns.htm> (Accessed: 14.03.2015).
4. (2015) Intensivnost napryajeniy. Available: http://femto.com.ua/articles/part_1/1381.html (Accessed: 14.03.2015).
5. (2015) Sila normalnoy reakcii. Available: https://ru.wikipedia.org/wiki/Сила_нормально_й_реакции (Accessed: 14.03.2015).
6. (2015) Plotnost energii. Available: https://ru.wikipedia.org/wiki/%CF%E8%EE%F2%E0%EE%F1%F2%FC_%FD%ED%E5%F0%E3%E8%E8 (Accessed: 14.03.2015).
7. (2015) Energiya deformacii. Available: http://lib.sernam.ru/book_tupr.php?id=92 (Accessed: 14.03.2015).
8. (2015) Kriteriy: maksimalnoe napryajenie von Mises. Available: http://help.solidworks.com/2010/russian/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/Checking_stresses/prot_vonm.html?id=979f07d4a87847c596e135c4b554344c#Pg0 (Accessed: 14.03.2015).
9. (2015) Kriteriy: maksimalnoe napryajenie sdviga. Available: http://help.solidworks.com/2010/russian/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/Checking_stresses/prot_shea.html (Accessed: 14.03.2015).

