

УДК 621.771

**РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ ТРЕТЬЕЙ ВИРТУАЛЬНОЙ
ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ОДИН МО»****Андрей Анатольевич Мальцев**доцент кафедр ФН-7 и МТ-10 МГТУ им Н.Э. Баумана
e-mail: a.a.mal@bmstu.ru**Аннотация**

Разработана концепция лабораторной работы на тему «Исследование предела выносливости ступенчатого вала с кольцевой галтелью при кручении» по учебной дисциплине «Основы динамики и надежности металлургического оборудования» студентами, обучающимися по специальности «Проектирование технологических машин и комплексов».

Ключевые слова: лабораторная работа, кручение, вал, металлургия.**DEVELOPMENT OF THE THIRD VIRTUAL LABORATORY WORK CONCEPT
ON THE DISCIPLINE "ОДИН МО"****Andrey A. Maltsev**associate professor of BMSTU ФН-7 and МТ-10 departments
e-mail: a.a.mal@bmstu.ru**ABSTRACT**

The concept of laboratory work on the topic "Investigation of the endurance limit of a stepped shaft with a ring gallet during torsion" has been developed in the academic discipline "Fundamentals of dynamics and reliability of metallurgical equipment" by students studying in the specialty "Design of technological machines and complexes".

Keywords: laboratory work, torsion, shaft, metallurgy.**Актуальность и цель исследования**

Цель исследования — разработка методических указаний к выполнению третьей лабораторной работы по учебной дисциплине «Основы динамики и надежности металлургического оборудования» на тему «Исследование циклической прочности ступенчатого вала с кольцевой галтелью при кручении», актуальность которых обусловлена все более высокими требованиями кафедры МТ-10 «Оборудование и технологии прокатки»

к формированию у студентов профессиональной компетенции с формулировкой «Способность использовать современные методы моделирования, исследования и расчетов технологических комплексов в металлургическом производстве» [1, 2, 3].

Материалы и методы исследования

Объект исследования – ступенчатый вал с кольцевой галтелью, нагруженный знакопеременным крутящим моментом (рис. 1).

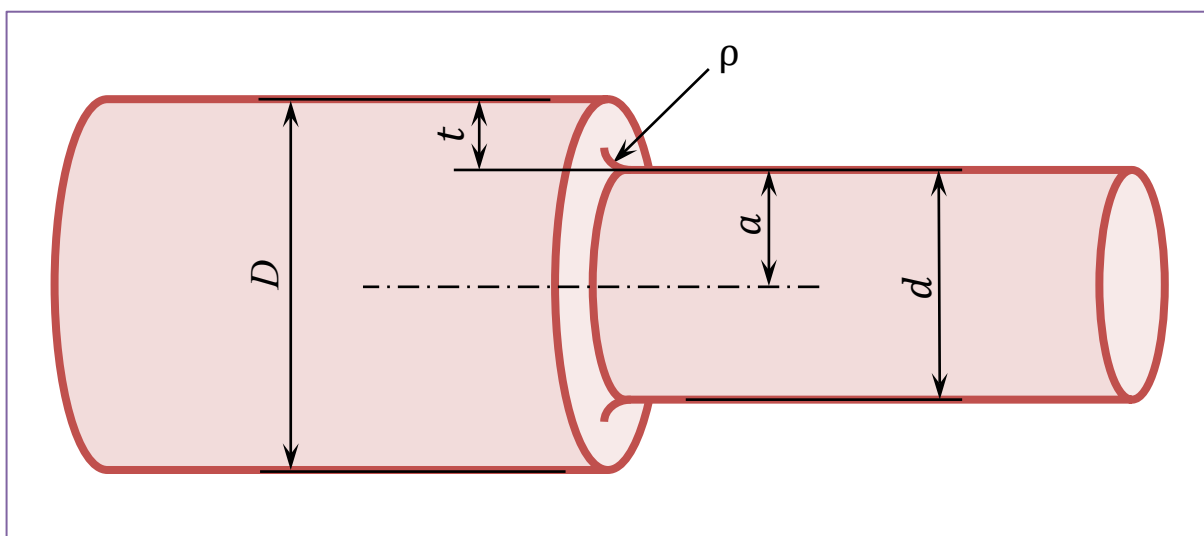


Рисунок 1. Ступенчатый вал с кольцевой галтелью:

D – больший диаметр;

d – меньший диаметр;

ρ – радиус закругления

$$a = \frac{d}{2}; \quad t = \frac{D - d}{2}$$

Сталь, из которой изготовлен ступенчатый вал, имеет статический предел прочности (временное сопротивление разрушению) равный σ_B – напряжение, соответствующее наибольшему усилию, предшествующему разрыву лабораторного образца при проведении (статических) механических испытаний.

Предел выносливости этой стали при симметричном цикле кручения

$$\tau_{-1} = 0,6 (0,55 - 0,0001 \sigma_B) \sigma_B. \quad (1)$$

Предел выносливости ступенчатого вала в области кольцевой галтели при симметричном кручении

$$\tau_{-1 \text{ гал}} = \frac{\tau_{-1}}{K}. \quad (2)$$

Коэффициент снижения предела выносливости

$$K = \left(\frac{2a_\tau}{1 + \Theta^{-v_\tau}} + \frac{1}{K_{F\tau}} - 1 \right) \frac{1}{K_v}. \quad (3)$$

Теоретический коэффициент концентрации касательных напряжений в области кольцевой галтели в случае кручения зависит только от геометрических размеров ступенчатого вала:

$$a_{\tau} = 1 + \frac{1}{\sqrt{\frac{3,4}{\frac{t}{\rho}} + 19,0 \frac{\left(1 + \frac{a}{\rho}\right)^2}{\left(\frac{a}{\rho}\right)^3} + \frac{1,0}{\left(\frac{t}{\rho}\right)^2} \cdot \frac{a}{\rho} + \frac{t}{\rho}}}}. \quad (4)$$

Относительный критерий подобия усталостного разрушения

$$\Theta = \frac{\pi d}{88,3 \left(\frac{1,15}{\rho} + \frac{2}{d}\right)}. \quad (5)$$

Коэффициент чувствительности стали к концентрации напряжений и масштабному фактору при кручении для случая, когда $\sigma_B \leq 1300$ МПа, определяется по формуле:

$$\nu_{\tau} = 1,5 (0,211 - 0,000143 \sigma_B). \quad (6)$$

Коэффициент влияния шероховатости поверхности **ступенчатого вала** (при кручении):

$$K_{F\tau} = 0,575 \left[1 - 0,22 \lg R_z \left(\lg \frac{\sigma_B}{20} - 1\right)\right] + 0,425, \quad (7)$$

где R_z – параметр шероховатости поверхности кольцевой галтели.

Коэффициент упрочнения поверхности ступенчатого вала K_{ν} учитывает влияние таких факторов как поверхностная закалка кольцевой галтели токами высокой частоты, химико-термическая обработка (азотирование, цементация, цианирование), поверхностный наклеп (обкатка роликом, обдувка дробью).

Эмпирические формулы (1) – (7), взятые мною из ГОСТ 25.504-82 «Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости», будут приведены в теоретической части лабораторной работы.

После инструктажа по технике безопасности в компьютерном зале каждому студенту будет выдано индивидуальное задание на выполнение виртуальной лабораторной работы (табл. 1).

Таблица 1

Варианты исходных данных

№ варианта	σ_B МПа	R_z мкм	D мм	d мм	ρ мм
1	500	1,6	200	150	20
2	510	1,6	205		21
3	520	1,6	210		22
4	530	1,6	215		23
5	540	1,6	220		24
6	550	1,6	225		20
7	560	1,6	230		21
8	570	1,6	235		22
9	580	1,6	240		23
10	590	1,6	245		24
11	600	3,2	200	150	24

12	610	3,2	205		23
13	620	3,2	210		22
14	630	3,2	215		21
15	640	3,2	220		20
16	650	3,2	225		20
17	660	3,2	230		21
18	670	3,2	235		22
19	680	3,2	240		23
20	690	3,2	245		24
21	700	6,3	200		150
22	710	6,3	205	22	
23	720	6,3	210	21	
24	730	6,3	215	24	
25	740	6,3	220	23	
26	750	6,3	225	20	
27	760	6,3	230	22	
28	770	6,3	235	21	
29	780	6,3	240	24	
30	790	6,3	245	23	

Результаты исследования и выводы

Студентами будет установлено, что по мере увеличения радиуса закругления кольцевой галтели (ρ) теоретический коэффициент концентрации напряжений в области кольцевой галтели (a_τ) уменьшается (табл. 2).

Таблица 2

Ожидаемые результаты теоретического исследования a_τ

D мм	d мм	$\frac{D}{d}$	ρ мм	$\frac{\rho}{d}$	a_τ
200	100	2	4	0,04	1,7
			8	0,08	1,46
			12	0,12	1,36
			16	0,16	1,29
			20	0,20	1,25
			24	0,24	1,21
			28	0,28	1,19
133		1,33	4	0,04	1,62
			8	0,08	1,41
			12	0,12	1,32
			16	0,16	1,26
			20	0,20	1,22
			24	0,24	1,19

			28	0,28	1,17
120	1,2		4	0,04	1,55
			8	0,08	1,37
			12	0,12	1,29
			16	0,16	1,23
			20	0,20	1,2
			24	0,24	1,17
			28	0,28	1,15
		109	1,09		4
	8			0,08	1,28
	12			0,12	1,21
	16			0,16	1,17
	20			0,20	1,14
	24			0,24	1,12
	28			0,28	1,11

Студенты могут обнаружить, что результаты теоретического расчета a_{τ} по формуле (4), к сожалению, не всегда удовлетворительно согласуются с графическими результатами измерений по методу электрических аналогий (рис. 2).

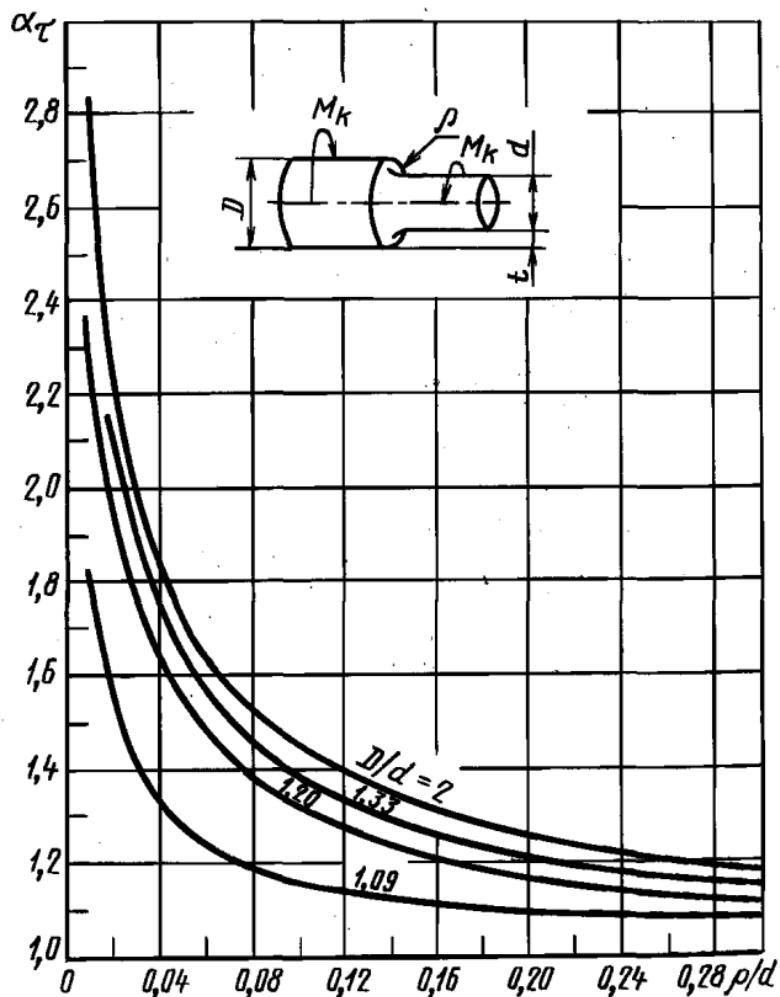


Рисунок 2. Номограммы для определения α_τ , взятые из ГОСТ 25.504-82

Студенты сделают вывод, что по мере увеличения параметра шероховатости поверхности (R_z) коэффициент снижения предела выносливости **кольцевой галтели** (K) увеличивается (табл. 3).

Таблица 3

Ожидаемые результаты теоретического исследования коэффициента K

σ_B МПа	D мм	d мм	ρ мм	α_τ	θ	ν_τ	R_z мкм	$K_{F\tau}$	K
700	150	80	5	1,58	11,16	0,17	1,6	0,99	1,9
							3,2	0,97	1,93
							6,3	0,94	1,95
							12,5	0,92	1,97
							25	0,9	2
							50	0,88	2,02
							100	0,86	2,05

	100	10	1,38	26,35	1,6	0,99	1,76
					3,2	0,97	1,78
					6,3	0,94	1,8
					12,5	0,92	1,83
					25	0,9	1,85
					50	0,88	1,88
					100	0,86	1,91
	120	15	1,29	45,74	1,6	0,99	1,7
					3,2	0,97	1,72
					6,3	0,94	1,74
					12,5	0,92	1,77
					25	0,9	1,79
					50	0,88	1,82
					100	0,86	1,85

Расчет коэффициента K выполнен мною по эмпирическим формулам (3), (4), (5), (6), (7).

Студенты убедятся, что по мере возрастания величины коэффициента влияния поверхностного упрочнения K_v предел выносливости ступенчатого вала в области кольцевой галтели $\tau_{-1 \text{ гал}}$ повышается (табл. 4).

Таблица 4

Ожидаемые результаты теоретического исследования $\tau_{-1 \text{ гал}}$

τ_{-1} МПа	a_τ	θ	ν_τ	$K_{F\tau}$	K_v	K	$\tau_{-1 \text{ гал}}$ МПа
150	1,34	32,43	0,21	0,97	1,1	1,67	90
					1,2	1,53	98
					1,3	1,42	106
					1,4	1,31	114
					1,5	1,23	122
					1,6	1,15	130
					1,7	1,08	139
					1,8	1,02	147
					1,9	0,97	155
					2,0	0,92	163

Предел выносливости кольцевой галтели $\tau_{-1 \text{ гал}}$ был рассчитан мною по эмпирическим формулам (1), (2), (3).

Список литературы:

1. Мальцев А.А. Разработка парадигмы электронного учебника по дисциплине «Основы динамики и надежности металлургического оборудования». – [Электронный ресурс] Оригинальные исследования (ОРИС). 2022. Т.12, №8.

С.140–148. – Режим доступа: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2022-oris-8-2022/a230764>

2. Мальцев А.А., Беляков Ю.И. Разработка концепции первой виртуальной лабораторной работы по дисциплине «ОДИН МО». – [Электронный ресурс] Оригинальные исследования (ОРИС). 2022. Т.12, №9. С.87–97. – Режим доступа: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2022-oris-9-2022/a230796>
3. Мальцев А.А., Беляков Ю.И. Разработка концепции второй виртуальной лабораторной работы по дисциплине «ОДИН МО». – [Электронный ресурс] Оригинальные исследования (ОРИС). 2022. Т.12, №10. С.199–212. – Режим доступа: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2022-oris-10-2022/a230826>

References:

1. A.A. Maltsev. Development of the paradigm of an electronic textbook on the discipline "Fundamentals of dynamics and reliability of metallurgical equipment". – [Electronic resource] Original research (ORIS), 2022, Vol.12, #8. – P.140–148. – Access mode: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2022-oris-8-2022/a230764> [in Russian].
2. A.A. Maltsev, Y.I. Belyakov. Development of the concept of the first virtual laboratory work on the discipline "ОДИН МО". – [Electronic resource] Original research (ORIS). 2022. Vol.12, #9. P.87–97. – Access mode: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2022-oris-9-2022/a230796>
3. A.A. Maltsev, Y.I. Belyakov. Development of the concept of the second virtual laboratory work on the discipline "ОДИН МО". – [Electronic resource] Original research (ORIS), 2022, Vol.12, #10. – P.199–212. – Access mode: <https://ores.su/ru/journals/oris-jrn/2022-oris-10-2022/a230826> [in Russian].