

А.Г. АНДРЕЕВ, Д.Г. ВИНОГРАДСКИЙ

ВЗАИМНОЕ ВЛИЯНИЕ СОЕДИНЕНИЙ С НАТЯГОМИ СОПРЯЖЕННЫХ С НИМИ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

У даній задачі припускається, що у деталей з'єднання з натягом (вала і втулки) є пов'язані з ними конструктивні елементи, які є їх продовженнями. Через це НДС з'єднання з натягом впливає на ці пов'язані конструктивні елементи, які, через зв'язаність, у свою чергу впливають на деталі з'єднання з натягом. Аналізуються 6 типів з'єднань з натягом, які мають пов'язані з ними конструктивні елементи, для яких визначаються компоненти НДС, які характеризують міру взаємного впливу з'єднань з натягом і конструктивних елементів.

Ключові слова: з'єднання з натягом, метод скінченних елементів, напруження, деформації.

В рассматриваемой задаче предполагается, что у деталей соединения с натягом (вала и втулки) имеются сопряженные с ними конструктивные элементы, являющиеся их продолжениями. В силу этого НДС соединения с натягом воздействует на эти сопряженные конструктивные элементы, которые, в силу сопряженности, в свою очередь влияют на детали соединения с натягом. Анализируются 6 типов соединений с натягом, имеющих сопряженные с ними конструктивные элементы, для которых определяются компоненты НДС, характеризующие степень взаимного влияния соединений с натягом и конструктивных элементов.

Ключевые слова: соединения с натягом, метод конечных элементов, напряжения, деформации.

In this problem, it is assumed that the connection parts with interference (shaft and bushing) are structural elements with them, which are their continuation. By virtue of this compound with stress-strain, state interference affects these conjugates structural elements that, by virtue of conjugation in turn affect the interference fit connection details. Analyzed six types of connections with a tightness that have associated with them the elements (I – bush console solid shaft, II – Solid shaft with cantilever sleeve, III – bush console hollow shaft, IV – hollow shaft with cantilever sleeve, V - connection Type III to reduce the thickness of the shaft and sleeve, VI - compound type IV with a reduction in the thickness of the shaft and sleeve), which are determined by stress-strain state, characterizing the degree of mutual influence of connections with a tightness conjugate components.

Keywords: connections with a tightness, finite element method, stress, strain.

Введение. В условиях современного производства соединения с натягом широко применяются в машиностроении, на железнодорожном транспорте, при проектировании артиллерийских систем и в других областях механики, когда требуется передача больших осевых усилий и крутящих моментов. Прочность и относительная неподвижность этих соединений обеспечиваются силами трения, которые зависят от давления между соединяемыми деталями, и определяются величиной натяга - разницы размеров охватывающей и охватываемой деталей. После соединения посадочный размер деталей становится общим, при этом посадочный размер охватывающей детали в результате упругих деформаций увеличивается, а охватываемой – уменьшается. Наибольшее распространение получили цилиндрические соединения с натягом, у которых одна деталь охватывается второй по цилиндрической поверхности.

Постановка задачи. В сложных механических схемах конструктивные элементы могут объединяться между собой соединениями с натягом, находящимися в некоторых местах схем, между которыми располагаются конструктивные элементы. Естественно, что НДС соединения с натягом влияет на НДС конструктивных элементов, являющихся продолжением соединений с натягом, а эти конструктивные элементы в свою очередь корректируют НДС деталей соединений с натягом.

Эта взаимосвязь представляется следующим образом:

1) Конструктивные элементы, сопряженные с соединениями с натягом, являются продолжениями деталей, входящие в соединение, в виде консольного вала или консольной втулки, на которые передаются деформации соединения с натягом. В этом случае задача состоит в определении характеристик НДС и зоны их распространения в конструктивных элементах под воздействием соединения с натягом.

2) В свою очередь, сами конструктивные элементы в виде консольных валов и втулок, сопряженные с соединением с натягом, влияют на это соединение, т.к. в этом случае проявляется «консольный эффект» из-за разных осевых размеров вала и втулки соединения. Это предполагается исследовать, оценивая влияние сопряженного конструктивного элемента в виде консольного вала или втулки на НДС соединения с натягом.

Целью данной работы является выявление, в какой мере это справедливо.

Рассмотрим 6 типов соединений с натягом: тип I – втулка с консольным сплошным валом (рис. 1), тип II – сплошной вал с консольной втулкой (рис. 2), тип III – втулка с консольным пустотелым валом (рис. 3), тип IV – пустотелый вал с консольной втулкой (рис. 4), тип V – соединение тип III с уменьшенными толщинами вала и втулки (рис. 3), тип VI – соединение тип IV с уменьшенными толщинами вала и втулки (рис. 4).

Геометрические размеры и характеристики материала соединений с натягом и сопряженных элементов представлены в табл. 1 и 2.

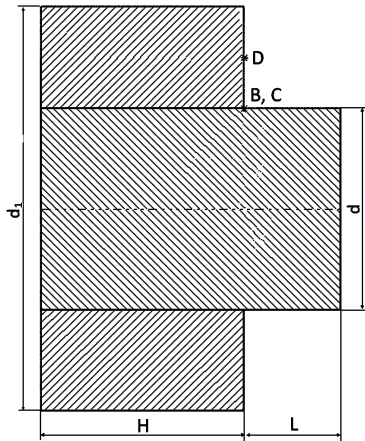


Рисунок 1 – Втулка с консольным сплошным валом (Тип I)

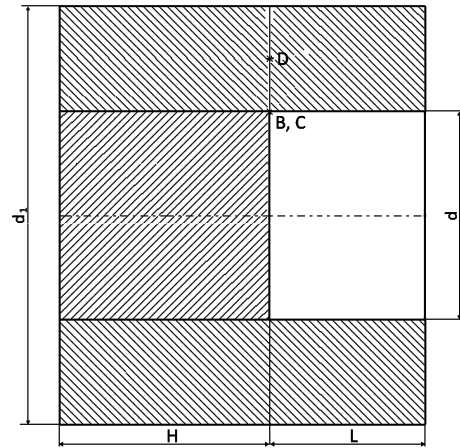


Рисунок 2 – Сплошной вал с консольной втулкой (Тип II)

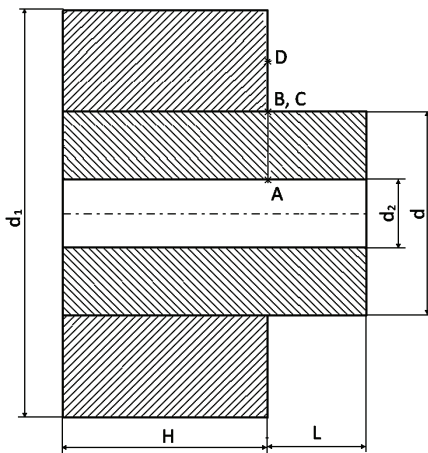


Рисунок 3 – Втулка с консольным пустотелым валом (Тип III, V)

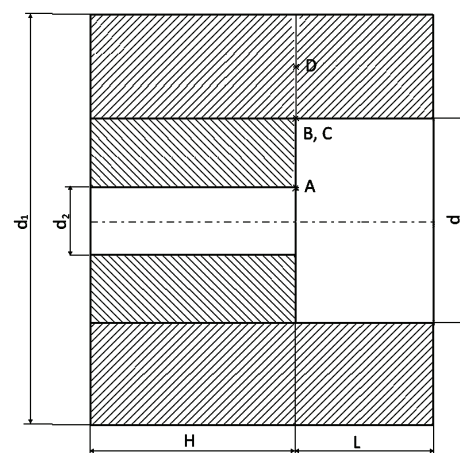


Рисунок 4 – Пустотелый вал с консольной втулкой (Тип IV, VI)

Таблица 1 – Геометрические размеры соединений с натягом и сопряженных элементов, мм

Геометрический параметр	Тип I-II	Тип III-IV	Тип V-VI
Диаметр зоны контакта d	120	120	120
Внешний диаметр втулки d1	240	240	200
Диаметр отверстия вала d2	0	40	60
Длина короткой втулки, короткого вала H	120	120	120
Длина изменяемой части втулки, вала L	0→100	0→200	0→100
Диаметральный натяг соединения Δ	0,12	0,12	0,12
Радиусы расчетных точек втулки и вала			
A	0	20	30
B-вал	60	60	60
C- втулка	60	60	60
D	90	90	80

Предварительные исследования показали целесообразность характеризовать НДС соединений с натягом через соответствующие характеристики торцевого сечения соединения с натягом в точках A, B, C, D, что отражено на рис. 1-4 и в табл. 1.

Таблица 2 – Характеристики материала сталь 40x

Физический параметр	Значение
Модуль упругости E, МПа	$2,1 \cdot 10^5$
Коэффициент Пуассона ν	0,3
Плотность ρ, кг/м ³	7800
Предел текучести σ _т , МПа	785
Предел прочности σ _в , МПа	980
Коэффициент трения μ	0,15

Теоретические основы. Поставленная задача моделировалась с помощью МКЭ в ПК ANSYS. Для решения использовался стандартный конечный элемент программного пакета - трехмерный восьмиузловой объемный элемент PLANE82, который имеет три степени свободы в каждом узле. Для создания контактной пары в ПК ANSYS использовались конечные элементы CONTA 172 и TARGET 169. Точки фиксации на рисунках 1-4 обозначены *. Решение задачи МКЭ приводит к системе линейных алгебраических уравнений:

$$[K]\{U\} = \{F\}, \quad (1)$$

где [K] – матрица жесткости тела, состоящая из матриц жесткости конечных элементов; {U} – вектор--

столбец узловых перемещений; $\{F\}$ – вектор приведенной внешней нагрузки.

Результаты расчетов

На рис. 5-9 изображены графики изменения НДС (эквивалентных напряжений, контактных давлений, радиальных перемещений) в соединениях с натягом типов I-VI под влиянием сопряженных конструктивных элементов в виде изменяемых консолей L.

Влияние на эквивалентные напряжения σ_3 в соединениях с натягом различных типов со стороны сопряженных конструктивных элементов в виде консольных валов и втулок показано на графиках рис. 5 и 6 где приведены кривые для расчетных точек A, B, C, D торцевого сечения в зависимости от величины L консольного элемента в виде выступающей части вала или втулки.

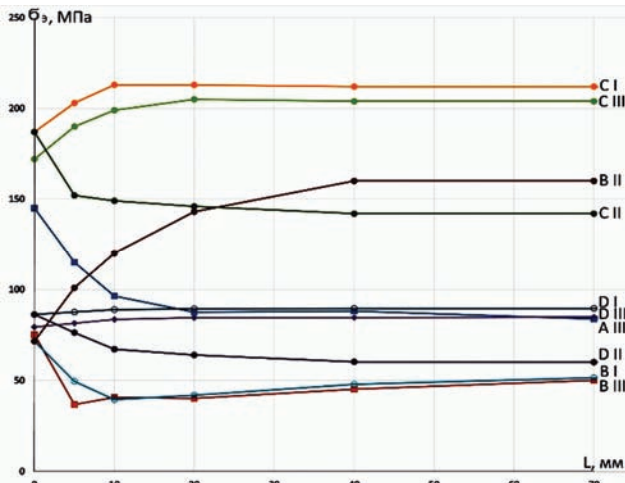


Рисунок 5 – Эквивалентные напряжения в соединениях с натягом типов I, II, III под влиянием конструктивных элементов: A, B, C, D – расчетные точки; L – размер консоли

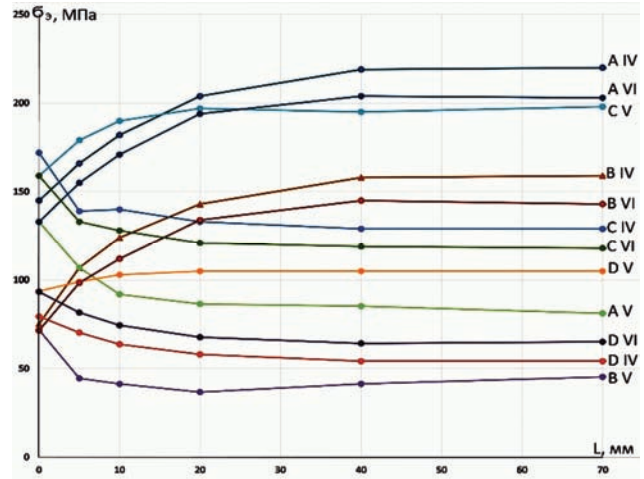


Рисунок 6 – Эквивалентные напряжения в соединениях с натягом типов IV, V, VI под влиянием конструктивных элементов: A, B, C, D- расчетные точки; L- размер консоли.

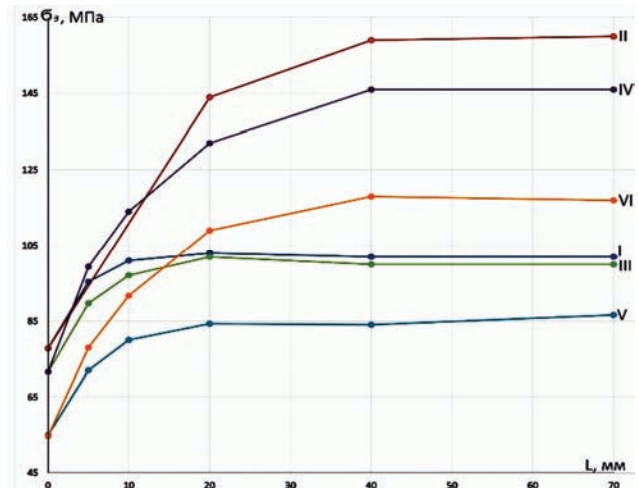


Рисунок 7 – Контактные давления в торцевом сечении соединений с натягом типов I-VI под влиянием конструктивных элементов: L- размер консоли

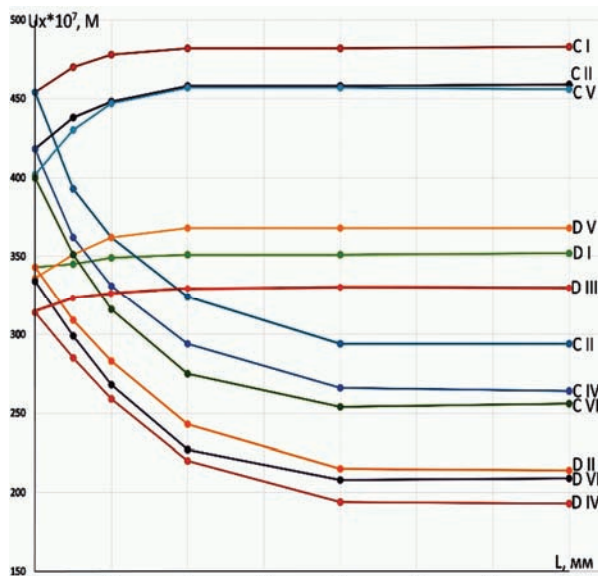


Рисунок 8 – Радиальные перемещения в соединениях с натягом типов I-VI под влиянием конструктивных элементов: C, D- расчетные точки; L- размер консоли

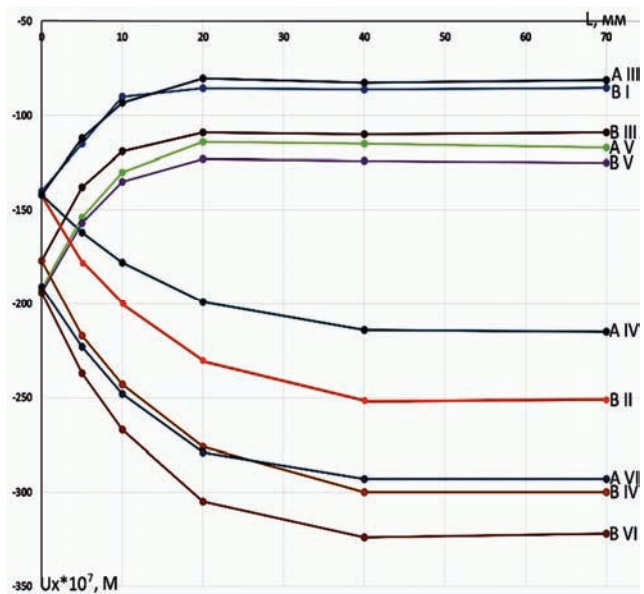


Рисунок 9 – Радиальные перемещения в соединениях с натягом типов I-VI под влиянием конструктивных элементов: A, B - расчетные точки; L- размер консоли

Таблица 3 – Эквивалентные напряжения по Мизесу в сопряженных элементах конструкций под влиянием соединений с натягом, σ_3 , МПа

L, мм	Тип I				Тип II							
	Внешний контур консольного вала R60				Внутренний контур консольной втулки R60				Середина консольной втулки R90			
	L/4	L/2	3L/4	L	L/4	L/2	3L/4	L	L/4	L/2	3L/4	L
0				49,7				137				75,7
10		21		24,8		120		101		67,1		65,1
20		16,7		3,54		79,2		69,9		52,2		44
40	23,9	13	2,91	3,7	61,6	47,7	22,2	18,1	47,6	34	21,8	12,3
70	21,6	10,5	3,19	3,1	55,5	25,7	6,99	17,8	40,7	17,3	3,22	10,8
100	18,8	6,22	1,56	0,8	40,5	18,2	5,41	10,3	27,1	10	6,48	4,2
200					26,5	12,8	4,98	3,27	9,56	6,19	3,99	2

Таблица 4 – Эквивалентные напряжения по Мизесу в сопряженных элементах конструкций под влиянием соединений с натягом, σ_3 , МПа

L, мм	Тип III								Тип IV							
	Внутренний контур пустотелого консольного вала R20				Внешний контур пустотелого консольного вала R60				Внутренний контур консольной втулки R60				Середина консольной втулки R90			
	L/4	L/2	3L/4	L	L/4	L/2	3L/4	L	L/4	L/2	3L/4	L	L/4	L/2	3L/4	L
5				108				62				127				69,8
10		84,6		73,1		30,9		31,3				91,3				59,6
20		48,8		14,9		21,6		5,3		71,8		63,1		48,2		39,7
40	53,3	22,8	10,1	29,9	28,8	13,4	2,66	5,44	55,6	42,9	28,7	15,7	42,8	20,5	19,4	10,8
70	35,5	15,4	9,47	19,5	27	13,1	3,6	5,76	46,2	23	3,55	16,5	33,7	15,5	2,84	10
100	25,7	11,9	6	5,15	22,7	7,26	2,19	1,51	39,7	16,4	5,57	21,2	26,8	8,99	6,17	13

Таблица 5 – Эквивалентные напряжения по Мизесу в сопряженных элементах конструкций под влиянием соединений с натягом, σ_3 , МПа

L, мм	Тип V								Тип VI							
	Внутренний контур консольного пустотелого вала R30				Внешний контур пустотелого консольного вала R60				Внутренний контур консольной втулки R60				Середина консольной втулки R80			
	L/4	L/2	3L/4	L	L/4	L/2	3L/4	L	L/4	L/2	3L/4	L	L/4	L/2	3L/4	L
5				99,5				64,7				125				80,4
10		79,1		65,4		37,7		35,4		102		89,1		69,8		65,8
20		46,2		10,3		24,1		6,79		66,6		55,8		53		39,4
40	49,7	21	5	28,4	30,5	14,1	25,3	12,4	54,4	73,3	13,6	2,64	47,4	29,3	14,5	21,3
70	35,1	17,9	9,49	16,3	28,7	15,2	4,57	7,08	45,2	20,5	3,84	22,5	36	14	4,9	15,7
100	27,3	14,5	5,25	3,17	23,5	10,3	2,31	1,36	37,4	17,2	8	17,9	26,4	8,13	7,55	12,5

Таблица 6 – Радиальные перемещения в сопряженных элементах конструкций под влиянием соединений с натягом, $U_x \cdot 10^7$, м

L, мм	Тип I				Тип II							
	Внешний контур консольного вала R60				Внутренний контур консольной втулки R60				Середина консольной втулки R90			
	L/4	L/2	3L/4	L	L/4	L/2	3L/4	L	L/4	L/2	3L/4	L
0				-58,6				354				309
10		-53,1		-34,2			324			277		273
20		-27,9		4,81			245			216		193
40	-32,7	-10,8	4	18,4	197	153	95	51,5	172	129	89,1	53,1
70	-13,5	-6,5	2,95	8,75	153	76,1	2,5	-51,4	139	70,6	2,63	-46,9
100	-7,53	1,64	1,8	2,28	124	42,6	-10,7	-62,4	127	48,3	-10,6	-37,2
200					44,6	-5,94	-9,96	-8,8	53,7	-2,84	-9,9	-9,4

На рис. 7 приведены графики контактных давлений P между валом и втулкой в торцевом сечении соединения в зависимости от величины L консольного элемента для разных типов соединений.

На рис. 8, 9 приведены радиальные перемещения в соединениях с натягом разных типов под влиянием

сопряженных конструктивных элементов.

В табл. 3-5 приведены эквивалентные напряжения σ_3 , а в табл. 6-8 радиальные перемещения. U_x в различных сечениях сопряженных элементов (консольных валов и втулок) в зависимости от величины консоли и типов соединений.

Таблица 7 – Радиальные перемещения в сопряженных элементах конструкций под влиянием соединений с натягом, $U_X \cdot 10^7$, м

L, мм	Тип III								Тип IV							
	Внутренний контур консольного пустотелого вала R20				Внешний контур пустотелого консольного вала R60				Внутренний контур консольной втулки R60				Середина консольной втулки R90			
	L/4	L/2	3L/4	L	L/4	L/2	3L/4	L	L/4	L/2	3L/4	L	L/4	L/2	3L/4	L
5				-106				-88,3				362				284
10		-82,4		-71		-80		-62,1				249				250
20		-46,9		-15		-45		-5,38		222		182		195		174
40	-52,1	-23,1	3,3	29,4	-50,2	-20	3,8	26,6	178	127	85	44,8	155	116	79,4	46,3
70	-35,1	-7,14	6,7	19,3	-29,9	-5,5	5,9	16,4	138	68,3	96	-47,6	125	63	9,06	-43,5
100	-19,8	1,75	4,2	5,1	-16	1,65	3,7	4,3	115	43,3	-10	-6,13	104	38	-10,1	-56,9

Таблица 8 – Радиальные перемещения в сопряженных элементах конструкций под влиянием соединений с натягом, $U_X \cdot 10^7$, м

L, мм	Тип V								Тип VI							
	Внутренний контур консольного пустотелого вала R30				Внешний контур пустотелого консольного вала R60				Внутренний контур консольной втулки R60				Середина консольной втулки R80			
	L/4	L/2	3L/4	L	L/4	L/2	3L/4	L	L/4	L/2	3L/4	L	L/4	L/2	3L/4	L
5				-144				-111				317				298
10		-113		-95,1		-99,2		-80,7		285		272		259		252
20		-64,9		-15,4		-57,9		-10,3		205		161		188		154
40	-72,7	-31,4	5,2	42,2	-64,3	-26,5	46	35,1	168	110	58	7,41	115	103	54	7,93
70	-47,4	-8,79	9,1	15,4	-39,6	-7,31	7,8	13,1	134	59	-4	-64,9	125	54,1	-4,2	-60,8
100	-7,92	5,6	5,0	4,51	-6,58	4,76	4,3	3,86	135	20,5	-18	-51,6	125	16,7	-17	-48,4

Анализ полученных результатов. Эквивалентные напряжения σ_3 в соединениях с натягом под влиянием сопряженных конструктивных элементов по мере увеличения консоли L сначала резко изменяются (как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения), затем стабилизируются в интервале $L=20 \rightarrow 50$ мм, что характеризуется коэффициентом K_s , представляющим отношение стабилизированных эквивалентных напряжений соединений с натягом к соответствующим базовым исходным величинам при $L = 0$ (рис. 5, 6, табл. 9).

Таблица 9 – Значение коэффициента K_s для соединений с натягом

Тип	Расчетные точки			
	A	B	C	D
I	-	0,72	1,13	1,04
II	-	2,25	0,75	0,71
III	0,57	0,66	1,19	1,07
IV	1,52	2,1	0,75	0,69
V	0,61	0,61	1,24	1,12
VI	1,54	2,01	0,74	0,7

Контактные давления P в соединениях с натягом под влиянием сопряженных конструктивных элементов после резкого увеличения при начальных изменениях консоли стабилизируются в интервале длины консоли $L = 20 \rightarrow 40$ мм, что характеризуется коэффициентом K_k , представляющим отношение стабилизированных контактных давлений соединений с натягом к соответствующим базовым исходным величинам при $L = 0$ (рис. 7, табл. 10).

Радиальные перемещения в соединениях с натягом под влиянием сопряженных конструктивных элементов при увеличении консоли L , сначала резко из-

меняют свою величину (как в одну, так и в другую сторону), затем стабилизируются в интервале $L = 40 \rightarrow 70$ мм. Процесс характеризуется коэффициентом K_n , представляющим отношение стабилизированных перемещений к соответствующим базовым величинам при $L = 0$ (рис. 8, 9, табл. 11).

Таблица 10 – Значение коэффициента K_k для соединений с натягом.

Тип	I	II	III	IV	V	VI
	1,32	2,04	1,43	2,04	1,54	2,17

Таблица 11 – Значение коэффициента K_n для соединений с натягом

Тип	Расчетные точки			
	A	B	C	D
I	-	0,61	0,96	1,02
II	-	1,84	0,64	0,61
III	0,56	0,61	1,1	1,06
IV	1,51	1,69	0,64	0,61
V	0,6	0,65	1,14	1,1
VI	1,54	1,67	0,61	0,62

Влияние соединений с натягом на сопряженные конструктивные элементы проявляется в резком возрастании σ_3 в этих элементах при малых размерах консоли L и затухании в интервале длины консоли $L = 20 \rightarrow 40$ мм (табл. 3-5), а также резком изменении радиальных перемещений U_X и смене их направлений при малых значениях консоли L , а затем стабилизации или их полном исчезновении в интервале $L = 40 \rightarrow 70$ мм (табл. 6-8). Уменьшение толщины деталей соединения с натягом (тип III заменяется типом V, тип IV – типом VI) приводит к уменьшению напряжений σ_3 в вале и увеличению во втулке (рис. 5, 6).

Выводы. Установлено, что между соединениями с натягом и сопряженными с ними конструктивными элементами имеется взаимное влияние, которое проявляется в изменении характеристик НДС (эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{э}}$, контактных давлений $P_{\text{к}}$, радиальных перемещений $U_{\text{х}}$) в силу этого эффекта. Определены величины характеристик НДС, зоны их распространения и диапазон изменений, которые являются источником или следствием таких влияний.

Список литературы:

1. Самуль В.И. Основы теории упругости и пластичности. Учеб. пособие / В.И. Самуль. – М.: Высшая школа, 1982. – 264 с.
2. Берникер Е.И. Посадки с натягом в машиностроении / Е.И. Берникер. – М.; Л.: Машиностроение, 1966. – 166 с.
3. Тарабасов Н.Д. Расчет напряженных посадок в машиностроении / Н.Д. Тарабасов. – М.: Mashgiz, 1961. – 264 с.
4. Шевченко Р.А. Компьютерное моделирование некоторых типов профильных соединений с натягом при осевых нагрузках / Р.А. Шевченко, А.Г. Андреев // Вісник НТУ «ХПІ». Тематичний випуск «Динаміка і міцність машин». – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 57. – С. 106-114.
5. Данилов Д.В. НДС профільних з'єднань з натягом під дією контактних навантажень / Д.В. Данилов, А.Г. Андреев // Вісник НТУ «ХПІ». Тематичний випуск «Динаміка і міцність машин». – Х.: НТУ «ХПІ», 2011. – № 52. С. 63-76.

6. Басов К.А. ANSYS: справочник пользователя / К.А. Басов. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с.

7. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах / К.А. Басов. Под общ. ред. Д.Г. Красковского. – М.: Компьютер-Пресс, 2002. – 224 с.

8. Басов К.А. Графический интерфейс комплекса ANSYS / К.А. Басов. – М.: ДМК Пресс 2006. – 248 с.

Bibliography (transliterated):

1. Samul V.I. Osnovi teorii uprugosti i plastichnosti. Uchebnoe posobie. Moscow: Vissaya shkola, 1982, 264 p.
2. Bemiker E.I. Posadka s natyagom v mashinostroenii. Moscow: Mashinostroenie, 1968, 168 p.
3. Tarabasov N.D. Raschet napryazhennykh posadok v mashinostroenii. Moscow: Mashgiz, 1961. 264 p.
4. Shevchenko R.A., Andreev A.G. Komp'yuternoe modelirovaniye nekotorykh tipov profil'nykh soedineniy s natyagom pri osevykh nagruzkah. Visnyk NTU "KhPI", 2014, No 57, pp. 106-114.
5. Danilov D.V., Andreev A.G. NDS profil'nykh soedineniy s natyagom pod dejstviem kontaknykh nagruzkok. Visnyk NTU "KhPI", 2011, No 52, pp. 63-76.
6. Basov K.A. ANSYS: spravochnik pol'zovatelya. Moscow: DMK Press, 2005, 640 p.
7. Basov K.A. ANSYS v primerah i zadachah. Pod red. D.G. Kraskovskogo. Moscow: Komp'yuter Press, 2002, 224 p.
8. Basov K.A. Graficheskii interfeice kompleksa ANSYS. Moscow: DMK Press, 2006, 248 p.

Поступила (received) 21.09.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Взаємний вплив з'єднань з натягом і пов'язаних з ними конструктивних елементів / Д.Г. Віноградський, А.Г. Андреев // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 46 (1218). – С. 10–15. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2078-9130.

Взаимное влияние соединений с натягом и сопряженных с ними конструктивных элементов / А.Г. Андреев, Д.Г. Віноградський // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 46 (1218). – С. 10–15. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2078-9130.

Mutual influence of connections with a tightness and associated structural elements / A.G. Andreev, D.G. Vinogradsky // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Dynamics and strength of machines. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 46 (1218). – P. 10–15. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2078-9130.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Андреев Арнольд Георгійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Динаміка та міцність машин», НТУ «ХПІ», тел.: (057) 707-68-79, e-mail: andreev@kpi.kharkov.ua.

Андреев Арнольд Георгиевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Динамика и прочность машин», НТУ «ХПІ», тел.: (057) 707-68-79, e-mail: andreev@kpi.kharkov.ua.

Andreev Arnol'd Georgievich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Dynamics and Strength of Machines, NTU «KhPI», tel.: (057)707-68-79, e-mail: andreev@kpi.kharkov.ua.

Віноградський Дмитро Георгійович – студент, кафедра «Динаміка та міцність машин», НТУ «ХПІ», тел.: (063) 426-13-64, e-mail: cikmon@mail.ru

Віноградський Дмитрій Георгиевич – студент, кафедра Динамика и прочность машин, НТУ «ХПІ»; тел.: (063) 426-13-64, e-mail: cikmon@mail.ru

Vinogradsky Dmitry Georgievich – Student, Department of Dynamics and strength of machines, NTU «KhPI»; tel.: (063) 426-13-64, e-mail: cikmon@mail.ru