

– кільцеве нагрівання навколо з'єднання з додатковим підігрівом у зоні інтенсивного тепловідводу в периферійну частину деталі 1 (див. рис. 4, варіант розрахунку № 2, йому ідентичні варіанти № 3-6).

Виконане дослідження дозволяє зробити такі висновки:

Як правило, при обмеженні максимальної температури нагрівання до 350° не вдається одержати необхідне розширення отвору. При встановленні заздалегідь рівня розширення отвору на рівні 0,1 мм (за радіусом) не здійсненне задане обмеження з максимальної температури. Усі обмеження виконані в розрахунку № 2 у припущенні високого контактного опору. Точне значення контактного опору може бути отримане експериментально.

Отримані варіанти розрахунку потужності нагрівання дають дані для створення реального індукційно-нагрівального пристрою.

**Список літератури:** 1. Андреев Г.Я. Тепловая сборка колесных пар. – Харків, Вид-во Харківського університету, 1965. – 227 с. 2. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – Москва, Мир, 1975. – 541 с. 3. Подгорный А.Н., Гонтаровский П.П., Киркач Б.Н. и др. Задачи контактного взаимодействия элементов конструкций. – Київ: Наукова думка, 1989. – 232 с. 4. Миллер В.С. Контактный теплообмен в элементах высокотемпературных машин. – Київ: Наукова думка. – 1966. – 164 с. 5. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – Москва, Мир, 1979. – 392 с. 6. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэсдел К. Оптимизация в технике: в 2-кн. Кн. 2. – Москва: Мир, 1986. – 320 с.

*Надійшла до редакції 22.05.2006*

УДК 658.515 (088.8)

*А.Г.АНДРЕЕВ*, канд.техн.наук; *А.П.ЗВОНАРЕВА*,  
*А.В.ЩЕПКИН*; НТУ «ХПИ»

## **СПОСОБ РАЗБОРКИ ПРЕССОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

У статті описаний спосіб розбирання пресових з'єднань конструкцій типу вал-втулка, який складається з операцій нагрівання з'єднання та наступного швидкого його охолодження рідким азотом.

In the article the press junctions disassembly method of a type the shaft-cartridge is described. The method consists of heat of junction and quick postcooling by liquid nitrogen.

**Актуальность темы.** Известен способ разборки прессовых соединений деталей типа вал-втулка, включающий операции быстрого нагрева втулки до заданной температуры с последующим съемом охватывающей детали. Однако такой способ не обеспечивает разборку тонкостенной охватывающей детали с валом. По предложенному способу [1] в целях устранения указанного недостатка предварительно нагретое прессовое соединение деталей типа вал-втулка охлаждают со скоростью 80-105 град/с путем струйного опрыскивания соединения хладагентом (жидким азотом).

При охлаждении охватывающая тонкостенная деталь, остывая быстрее вала, создает в соединении дополнительный температурный натяг, который, суммируясь с технологическим натягом, создает напряжения, превышающие предел пластичности. В результате в тонкостенной охватывающей детали появляются остаточные пластические деформации и натяг исчезает. После полного охлаждения вала охватывающая тонкостенная деталь без усилия легко снимается. Метод позволяет производить замену, в частности, удлинителей при ремонте электродвигателей без повреждения вала.

**Цель работы** – проведение исследования напряженного и теплового состояния соединения типа вал-втулка (рис. 1) в процессе его разборки описанным методом и уточнение параметров разборки.

Для расчета напряженно-деформированного состояния и решение темпера-

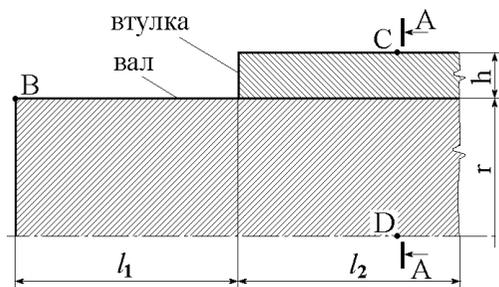


Рисунок 1

турной задачи был применен метод конечных элементов [2]. Рассчитываемое соединение аппроксимируется тороидальными конечными элементами трехугольного поперечного сечения с тремя узлами; также используются стыковые элементы, которые моделируют состояние сила-сдвиг-теплопередача на поверхностях деталей [3,4]. Решения нестационарной температурной задачи осуществляется с применением центральной разностной схемы [5]. Расчеты пластических деформаций проводятся на основе диаграммы растяжения материала с использованием метода начальных напряжений; остаточные напряжения и деформации находим по закону разгрузки [6]. Для обращения матрицы и вычисления перемещений применен метод квадратного корня [7], что учитывает ленточную структуру матрицы жесткости конструкции. Описанный алгоритм реализует программа МКЕ-D языком Fortran.

В расчетах предполагается, что вал и втулка сделаны из одинакового материала, характеристики которого приведены в табл. 1.

Начальная температура соединения составляет 200° С. Шаг по времени при решении нестационарной температурной задачи принят равным 0,01 с, перерасчет напряженно-деформированного состояния осуществляется через 0,25 с. Характеристики исследуемых соединений приведены в табл. 2 (см. также рис. 1).

На рис. 2 показано распределение температуры в сечении А соединений № 1-3 (см. рис. 1, табл. 2) при их охлаждении хладагентом в моменты времени  $t = 1, 2, 3, 4$  секунды с начала процесса охлаждения. На рис. 3 дано изменение температуры на торце вала в точке В, на поверхности втулки вдали от торца в точке С и на оси вала в точке D при охлаждении. Граница пластиче-

ских деформаций в моменты времени  $t = 1, 2, 3, 4$  секунды с начала процесса для соединений № 1 и 3 показана на рис. 4,5. Согласно расчету, натяг в соединении № 1 снимается при продолжительности охлаждения не менее 3 с., для соединения № 2 – при продолжительности охлаждения около 2 с., для соединения № 3 – 1 с.

Таблица 1 – Характеристики материала соединений

	Сталь	Дюралю- миний	Медь
Модуль упругости $E$ , МПа	$0,2 \cdot 10^6$	$0,071 \cdot 10^6$	$0,11 \cdot 10^6$
Коэффициент Пуассона $\nu$	0,3	0,3	0,32
Предел пластичности $\sigma_{ПС}$ , МПа	350	200	150
Коэффициент линейного расширения $\alpha$ , град <sup>-1</sup>	$12 \cdot 10^{-6}$	$22 \cdot 10^{-6}$	$17 \cdot 10^{-6}$
Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	7800	2640	8900
Удельная теплоемкость $c$ , Дж/кг · град.	460	922	393
Коэффициент теплопроводности $K$ , Вт/м · град;	50	181	390
Коэффициент конвективного теплообмена $h$ , Вт/м <sup>2</sup> · град.	10000	10000	10000
Термическое сопротивление в зоне контакта, м <sup>2</sup> · град./Вт: $R_0$ – при нулевом давлении; $R_{10}$ – при контактом давлении $\sigma = 10$ МПа, $R_{100}$ – при $\sigma = 100$ МПа ;	$176 \cdot 10^{-6}$ ; $84 \cdot 10^{-6}$ ; $15 \cdot 10^{-6}$	$176 \cdot 10^{-6}$ ; $84 \cdot 10^{-6}$ ; $15 \cdot 10^{-6}$	$176 \cdot 10^{-6}$ ; $84 \cdot 10^{-6}$ ; $15 \cdot 10^{-6}$
Коэффициент трения, $f$	0,15	0,15	0,15

Примечание: коэффициент конвективного теплообмена задан на основе [8]; термическое сопротивление в зоне контакта – [4].

Таблица 2 – Характеристики исследуемых соединений

№	Материал	г, м	h, м	Натяг $\delta$ , м
1	Сталь	0,03	0,01	$30 \cdot 10^{-6}$
2			0,005	
3			0,0025	
4	Дюралюми- ний	0,03	0,01	$30 \cdot 10^{-6}$
5			0,005	
6			0,0025	
7	Медь	0,03	0,01	$30 \cdot 10^{-6}$
8			0,005	
9			0,0025	

Примечание: указан радиальный натяг.

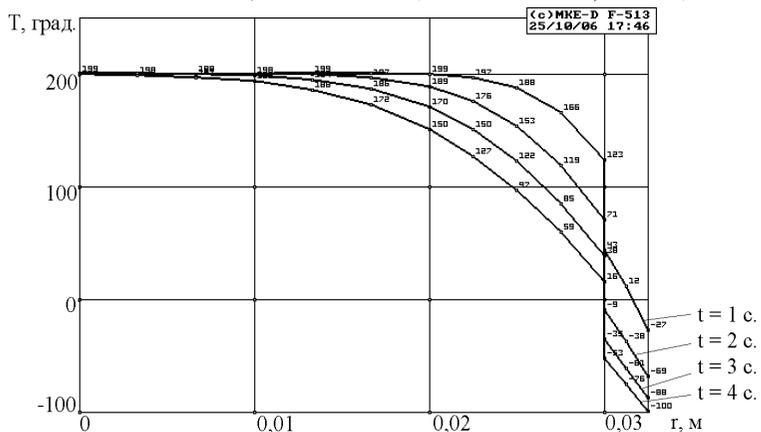
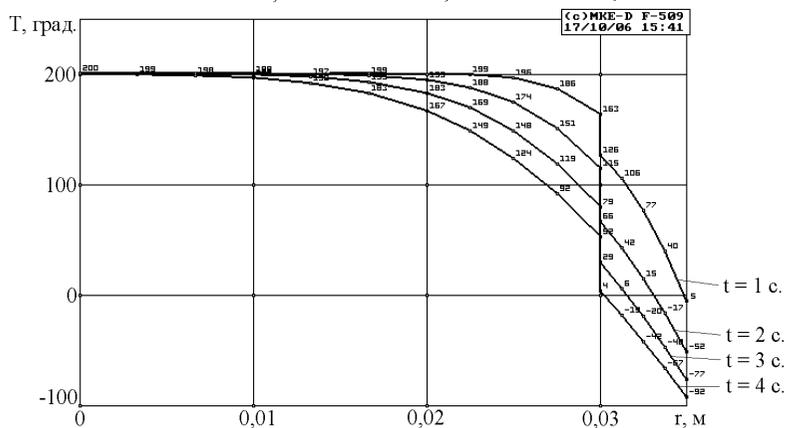
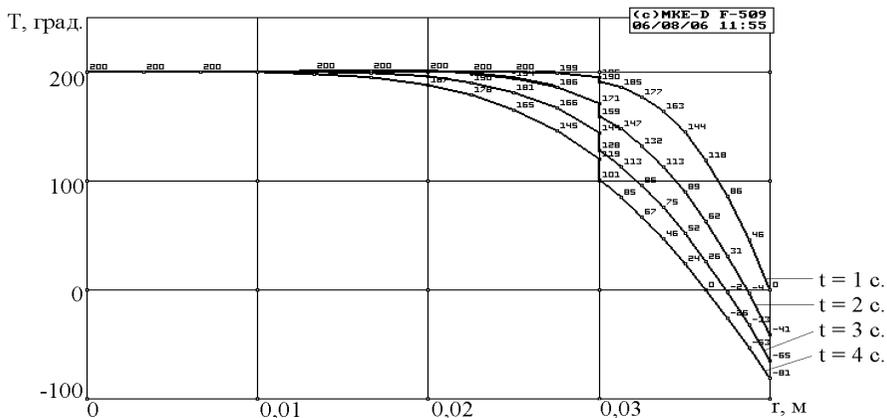


Рисунок 2 – Распределение температуры в сечении А соединений № 1-3 при их охлаждении в моменты времени  $t = 1, 2, 3, 4$  секунды

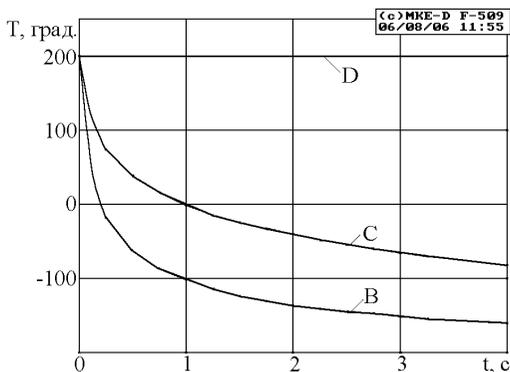


Рисунок 3 – Изменение температуры на поверхности втулки в точке С и вала в точках В, D для соединения № 1

В табл. 3 приведено распределение температуры в точках В,С, D (см. рис. 1) в процессе охлаждения соединения. В табл. 4 приведены характеристики соединения в зависимости от продолжительности процесса охлаждения  $t_{пр}$  хладагентом: уровень сжимающих напряжений  $\sigma_r$  или зазор  $\Delta$  в соединении деталей с натягом. Данные соответствуют полному выравниванию температуры в соединении.  $W$  – количество энергии, забранной у детали хладагентом, данные приведены для  $l_1 = l_2 = 0,05$  м (см. рис. 1).  $\sigma_{r0}$  – уровень сжимающих напряжений в соединении до начала технологического процесса.

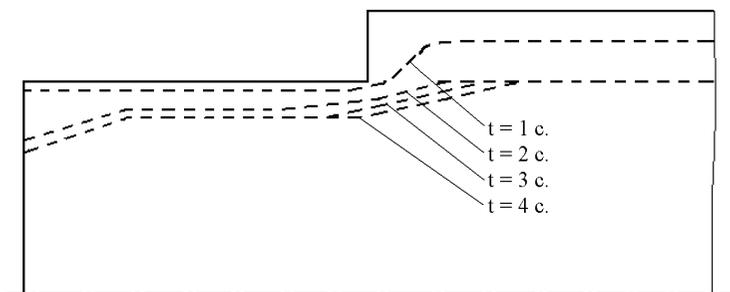


Рисунок 4 – Граница зоны пластических деформаций, возникающих в соединении № 1 в моменты времени  $t = 1, 2, 3, 4$  секунды с начала процесса охлаждения

На рис. 6 показано распределение температуры в сечении А соединения № 4 (см. рис. 1, табл. 2) при его охлаждения хладагентом в моменты времени  $t = 1, 2, 3, 4$  секунды с начала процесса охлаждения; граница пластических деформаций для этого же соединения показана на рис. 7. Согласно расчету, натяг в соединении № 4 не снимается, а лишь снижается на 23 %.

На рис. 8 показано распределение температуры в сечении А соединения № 7 (см. рис. 1, табл. 2) при его охлаждении хладагентом в моменты времени

$t = 1, 2, 3, 4$  секунды с начала процесса охлаждения. Пластичность в соединениях из меди появляется у втулке, на валу пластические деформации не наблюдаются. Согласно расчету, натяг в соединении № 7 не снимается, а лишь снижается на 55 %; в соединениях № 8-9 – полностью снимается.

Таблица 3 – Распределение температуры в процессе охлаждения соединения

№ со-ед.	$t, c.$	$T_B,$ град.	$T_C,$ град.	$T_D,$ град.	№ со-ед.	$t, c.$	$T_B,$ град.	$T_C,$ град.	$T_D,$ град.		
										Материал – сталь	1
0,02	128	161	200	2	-95	-19	192				
0,03	110	151	200	3	-117	-51	166				
0,05	84	137	200	4	-131	-74	133				
0,1	42	113	200	5	1	-62	6	199			
0,15	16	97	200		2	-99	-43	185			
0,2	-3	85	200		3	-117	-73	153			
0,25	-18	74	200		4	-129	-87	116			
0,5	-62	39	200	6	1	-73	-24	199			
0,75	-86	16	200		2	-98	-56	179			
1	-102	0	200		3	-115	-75	145			
1,5	-123	-24	200		4	-127	-91	108			
2	-136	-41	200	7	1	15	80	199			
2,5	-145	-54	200		2	-36	27	188			
3	-151	-65	200		3	-63	-7	163			
3	-151	-65	200		4	-83	-32	132			
4	-160	-82	200	8	1	-7	46	198			
2	1	-103	-5		200	2	-53	-6	181		
	2	-136	-52		200	3	-76	-34	152		
	3	-150	-77		200	4	-92	-54	120		
	4	-157	-93	200	9	1	-32	8	297		
3	1	-107	-27	200		2	-63	-27	175		
	2	-130	-69	200		3	-80	-46	144		
	3	-141	-88	200		4	-94	-62	113		
	4	-148	-100	200							

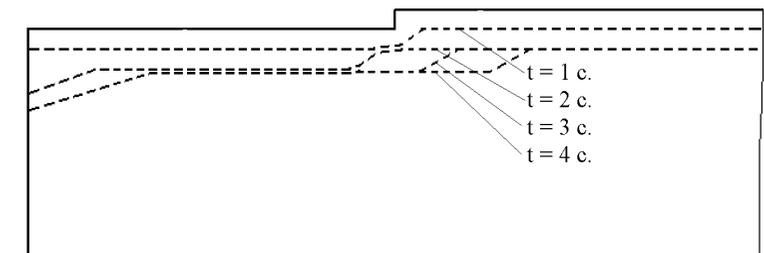


Рисунок 5 – Граница зоны пластических деформаций, возникающих в соединении № 3 в моменты времени  $t = 1, 2, 3, 4$  секунды с начала процесса охлаждения

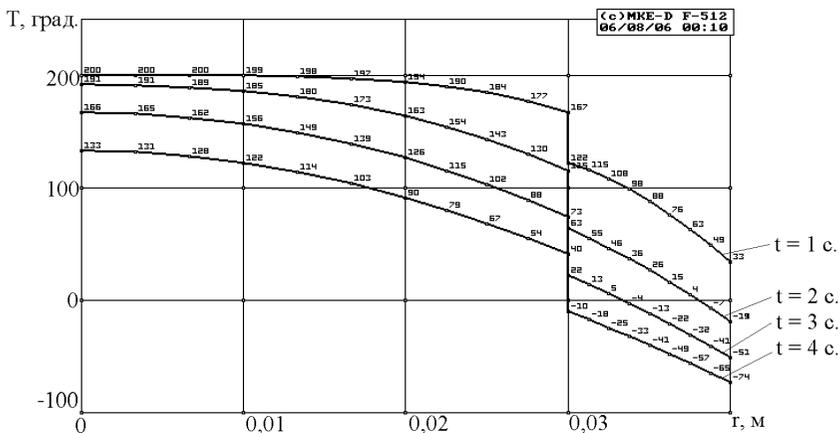


Рисунок 6 – Распределение температуры в сечении А соединения № 4 при ее охлаждении в моменты времени  $t = 1, 2, 3, 4$  секунды

Таблица 4 – Характеристики соединения в зависимости от продолжительности охлаждения  $t_{\text{ПР}}$

№ соед	$t_{\text{ПР}}$	$\sigma_{r0}$ , МПа	$\sigma_r$ , МПа	$\Delta$ , мкм	W, кДж
1	1	46,7	29,1	0	59
	2		14,8	0	99
	3		-	1,8	131
	4		-	5,5	159
2	1	27,9	4,9	0	52
	2		-	12,0	86
	3		-	18,0	116
	4		-	19,7	138
3	1	15,5	-	12,5	48
	2		-	13,7	79
	3		-	12,7	104
	4		-	13,1	126
4	1	16,6	15,7	0	67
	2		13,4	0	114
	3		12,7	0	151
	4		12,7	0	182
5	1	9,9	1,8	0	57
	2		-	3,0	97
	3		-	3,0	128
	4		-	3,7	155
6	1	5,5	-	16,7	54
	2		-	17	86
	3		-	17	115
	4		-	19	140
7	1	26,0	21,7	0	76
	2		13,9	0	135
	3		12,0	0	185
	4		11,9	0	227
8	1	15,4	-	0,1	65
	2		-	6,4	114
	3		-	6,3	155
	4		-	6,8	191
9	1	8,7	-	13,0	58
	2		-	12,8	102
	3		-	12,8	140
	4		-	13,8	173

Примечание: в таблице указан радиальный зазор.

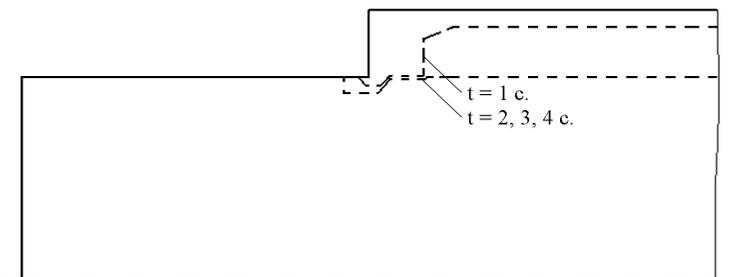


Рисунок 7 – Граница зоны пластических деформаций, возникающих в соединении № 4 в моменты времени  $t = 1, 2, 3, 4$  секунды с начала процесса охлаждения

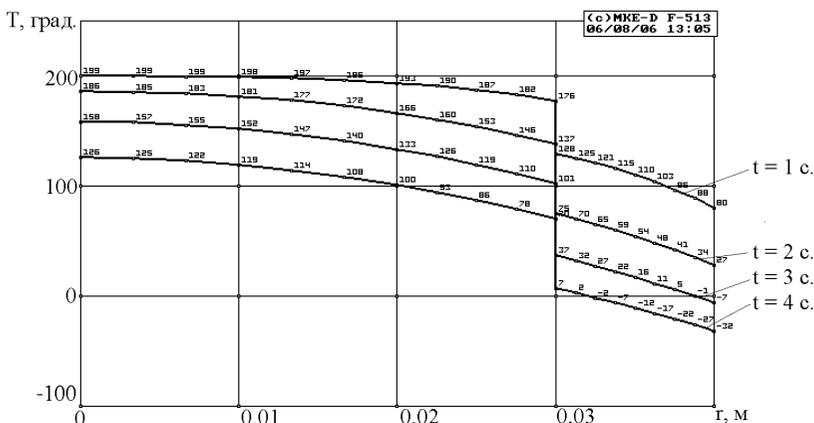


Рисунок 8 – Распределение температуры в сечении А соединения № 7 при его охлаждении в моменты времени  $t = 1, 2, 3, 4$  секунды

**Выводы.** С помощью современных численных методов проведено исследование способа разборки прессовых соединений деталей типа вал-втулка, обеспечивающий съем тонкостенной охватывающей детали с вала. Расчеты показали, что возможность съема втулки зависит от геометрии соединения, свойств материала, времени охлаждения.

Охлаждение хладагентом с целью съема эффективно лишь кратковременно – для деталей из стали – 7-8 с., из меди и алюминия – 2-3 с. при внешнем диаметре втулки 8 см. Время эффективного охлаждения определяется временем начала уменьшения градиента температур во втулке, что приблизительно соответствует началу охлаждения оси вала. Дальнейшее охлаждение не дает эффекта.

Согласно расчету, в стальном валу после применения такой разборки возникают пластические деформации.

Чем толще стенка втулки, тем менее эффективен данный метод. Таким образом, данный метод разборки следует применять там, где не работают стандартные методы (быстрый нагрев или прессовый съем втулки).

- Список литературы:** 1. Патент 453276 СССР Способ разборки прессовых соединений / Г.Я. Андреев, Н.М.Лактионов, А.Н.Морозов. Заявлено 06.12.72; Опубл. 15.12.74; Бюл. № 46. – 1975. 2. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике. – Москва, Мир, 1975. – 541 с. 3. *Подгорный А.Н., Гонтаровский П.П., Киркач Б.Н.* и др. Задачи контактного взаимодействия элементов конструкций. – Киев: Наукова думка, 1989. – 232 с. 4. *Миллер В.С.* Контактный теплообмен в элементах высокотемпературных машин. – Киев: Наукова думка, 1966. – 164 с. 5. *Сегерлинд Л.* Применение метода конечных элементов. – М., Мир, 1979. – 392 с. 6. Приложение методов теории пластичности и ползучести к решению инженерных задач машиностроения: В. 2 ч. Ч. 2: *Можаровский Н.С. Качаловская Н.Е.* Методы и алгоритмы решения краевых задач. – Киев, Вища школа, 1991. – 287 с. 7. *Демидович Б.П., Марон И.А.* Основы вычислительной математики. – М., Физматгиз, 1963. – 660 с. 8. *Михеев М.А.* Основы теплопередачи. – М.-Л.: Энергоиздат, 1956. – 392 с.

*Поступила в редколлегию 11.10.2006*

УДК 539.4

***К.В. АСТАХОВА; В.А. ЖОВДАК***, докт.техн.наук;  
***В.В. ТАТЬКОВ***, канд.техн.наук; ***А.И. ТРУБАЕВ***, канд.техн.наук;  
***И.М. ФЕДОРЕНКО***; НТУ «ХПИ»

## **ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ ГИДРОСИСТЕМЫ КОПРОВОГО ПРЕССА**

На основі методу скінчених елементів проведені чисельні дослідження вимушених, власних коливань та міцності трубопроводу гідросистеми, що знаходиться під дією гідравлічних ударів. Дано оцінку впливу внутрішнього тиску на спектр власних частот і напружений стан системи. Динамічні характеристики внутрішнього тиску визначені за допомогою експерименту.

On the basis of a finite element method the numerical researches of forced and free vibrations and strength of the pipeline of a hydraulic-circuit system were under an operation of transient shocks are held. The estimation of influence of internal pressure on a spectrum of natural frequencies and stress state of a system is given. The dynamic responses of internal pressure are defined experimentally.

В современной промышленности все большую роль играет переработка вторичного сырья и, в частности, металлического лома. Технология его переработки включает в себя, помимо всего прочего, прессование, которое осуществляется посредством копровых прессов. При прессовании неклассового лома (т.е. лома, неоднородного по размерам и качеству) в гидросистеме возникают нестационарные явления. Эти явления носят характер гидравлических ударов, сопровождающихся забросами давления, вызывающих разрушение элементов гидроцилиндров, соединительной арматуры, магистральных трубопроводов. До настоящего времени динамике гидроагрегата копрового пресса не уделялось должного внимания. Следовательно, расчет собственных и вынужденных колебаний трубопровода, вызванных пульсацией внутреннего давления, является актуальной проблемой, связанной с обеспечением надежной работы оборудования, используемого в металлургии.

На рис. 1 представлен фрагмент пространственного трубопровода гидро-