

УДК 539.3

## **ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ В ЗАДАЧАХ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ТЕРМОКИНЕТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ**

А.В. Бизюк, М.В. Чернобрышко, В.Г. Ярещенко

*Институт проблем машиностроения НАН Украины, Харьков, Украина*

In work is done a comparative analysis of mathematical models of high-rate elasto-plastic deforming of cylindrical shells, which based on comparison with experimental data. An optimum model is a 2-dimension layer with taking into account deformation speed dominance and thermal parameters.

При расчете параметров высокоскоростного упругопластического деформирования конструкционных элементов рациональным является использование упрощенных математических моделей, степень адекватности которых реальным процессам различна. Основным критерием выбора той или иной модели является, наряду с трудоемкостью счетного процесса, мера соответствия теоретических и экспериментальных результатов.

В качестве объекта исследования выбраны конструкционные элементы цилиндрической формы. Разработанная в ИПМаш НАН Украины технология использования широкополосной тензометрической станции для регистрации высокоскоростных процессов позволяет определить величину деформаций и скоростей деформаций на малых интервалах времени (до 5-10 мкс). Цилиндрическая оболочка находится под действием комбинации внутреннего статического и локального ударно-импульсного нагружения большой интенсивности, возникающих, например, при сварке взрывом, детонационно-плазменном напылении и других нестационарных локальных воздействиях.

В очаге нагружения и его окрестности возникает зона пластического деформирования и значительные прогибы, что не дает возможности проводить многократное нагружение в одном и том же месте. Волновой характер процесса деформирования требует охвата точками измерения большой поверхности оболочки, а большие градиенты деформаций в зоне нагружения – достаточной плотности размещения точек измерения. При этом датчики расположены в точках вдоль главных направлений тензора деформации – в осевом и окружном сечениях (см. рис. 1). Принятая схема размещения тензорезисторов позволяет регистрировать главные деформации  $\epsilon_r$  и  $\epsilon_\theta$  в ряде точек поверхности в осевом и меридиональном сечениях.

По результатам серии экспериментов был выполнен сравнительный анализ результатов, полученных численным путем с применением различных математических моделей, с экспериментальными данными. Значения

параметров материала слоя: модуль упругости  $E = 2,1 \cdot 10^{11}$  Па; коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ ; плотность  $\rho = 7,8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>; предел пластичности  $\epsilon^s = 1,43 \cdot 10^{-3}$ ; параметры учета влияния скорости деформации  $\lambda_n = 0,992$ ;  $D = 396$  с<sup>-1</sup>;  $n = 7,14$ .

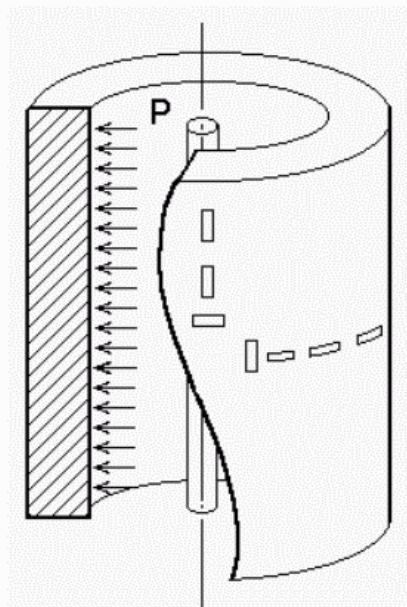


Рис. 1. Схема нагружения оболочки

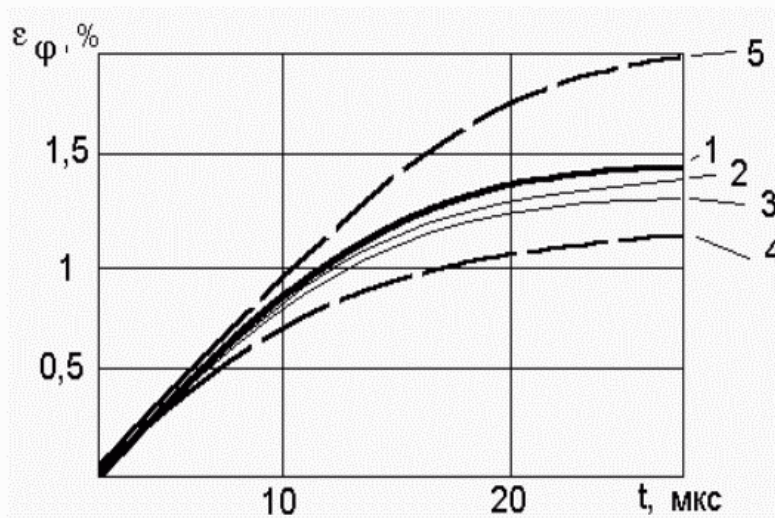


Рис. 2. Сравнение результатов расчетов

На рисунке 2 представлено сравнение экспериментальных (кривая 1) и теоретических данных, полученных при значениях нагрузки  $P_m = 3,734 \cdot 10^8$  Па, время затухания импульса  $Q = 7,1 \cdot 10^{-6}$  с. В качестве сопоставляемых математических моделей были приняты модель цилиндрического слоя конечной длины с учетом влияния скорости деформации на закон упрочнения материала в степенной форме, а также влияния тепловых параметров (кривая 2). Кривая 3 соответствует результатам, полученным при исследовании движения цилиндрического слоя без учета термокинетических свойств материала. Кривая 4 отражает данные, полученные для одномерной схемы высокоскоростного расширения цилиндра; кривая 5 соответствует результатам, полученным при решении задачи без учета влияния скорости деформации на динамические параметры. Анализ этих результатов показывает, что двумерная постановка задачи позволяет получить приемлемую точность решения, аппроксимируя экспериментальную кривую лучше, чем одномерная схема. Помимо этого следует отметить, что для данного материала (конструкционная сталь X18H10T) существенным является учет влияния скорости деформации на динамические параметры.

Моменты времени, когда скорость деформации равна нулю и в материале начинается разгрузка, определяемые по кривым 2 и 3, приблизительно

равны, сильно отличаясь от времени разгрузки, определяемого по кривой 5.

В таблице приведены значения максимальных окружных и продольных деформаций, измеренных методом динамического тензометрирования [2] и полученных расчетным путем с использованием двумерной модели метания цилиндрического слоя при его гидровзрывном нагружении. Результаты, получаемые с использованием двумерной модели деформирования, хорошо согласуются с экспериментальными данными для широкого класса относительных толщин и при различных нагрузках.

h, см	Заряд ДШ	Экспериментальные данные	Теоретические данные		Расхождение в % теоретических данных с экспериментальными	
			Без учета температуры	С учетом температуры	Без учета температуры	С учетом температуры
Значение $\varepsilon_{\varphi}^{\max}$ , %						
0,2	1	8,87	8,46	8,51	4,6	4,1
0,8	1	1,36	1,30	1,32	4,4	2,9
0,34	1	4,42	3,99	4,29	9,7	2,9
0,34	2	8,05	7,87	7,93	2,2	1,5
0,34	3	11,04	10,92	10,96	1,08	0,7
Значение $\varepsilon_r^{\max}$ , %						
0,2	1	0,73	0,69	0,71	5,5	2,7

Таким образом, оптимальным следует считать выбор двумерной математической модели упругопластического цилиндрического слоя, учитывающей влияние скорости деформации на величину предела пластичности, а также влияние температурных напряжений.

## Литература

1. Лурье А.И. Нелинейная теория упругости. Москва, Наука, 1980.
2. Воробьев Ю.С., Колодяжный А.В., Севрюков В.И., Янютин Е.Г. Скоростное деформирование элементов конструкций. Киев; Наукова думка, 1989. – 192 с.
3. Колодяжный А.В., Меша Ю.В., Чернобрышко М.В. Термокинетический анализ деформирования цилиндрического слоя конечной длины при осесимметричном импульсном нагружении. - Вестник Харьк. гос. политех. ун-та. – Харьков: ХГПУ. – 2000. – Вып. 106 – С.16 – 19.

Поступила в редколлегию 06.09.2001

УДК 539.3

## **НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МОДЕЛИ СОСТАВНОЙ БАНДАЖИРОВАННОЙ МАТРИЦЫ ДЛЯ ПОЛУГОРЯЧЕГО ВЫДАВЛИВАНИЯ**

С.В.Бондарь, В.И.Лавинский, А.В.Степук

*Национальный технический университет "ХПИ", Харьков, Украина*

Представлены материалы по разработке и внедрению методики моделирования контактного взаимодействия элементов в составных многокомпонентных бандажированных матрицах для полугорячего выдавливания, ориентированной на применение программного комплекса SPACE-T.

Полугорячее выдавливание металлов в традиционных схемах обработки металлов давлением используется в основном для формоизменения заготовок из высокопрочных и малодеформируемых сталей.

При значительных пластических деформациях в заготовке возникает упрочнение металла, приводящее к повышению твердости и предела текучести  $\sigma_T$  [1,2,3]. На рис. 1 приведены экспериментальные данные зависимости истинных напряжений  $\sigma_\epsilon$  от деформации  $\epsilon$  при различных температурах (диаграмма истинных напряжений).

При повышении температуры происходит разупрочнение металлов, которое объясняется возрастанием подвижности дефектов кристаллической решетки и приводящей к рекристаллизации. В соответствии с этими экспериментальными данными деформационное формоизменение металлических заготовок условно разделим на три типа, определяемые по эффектам рекристаллизации в металле заготовки. Выделенные типы деформирования регламентируют режимы подготовительной термообработки заготовок.

Холодное выдавливание (ХВ) соответствует диапазону температур  $T \in (0,2 \dots 0,3) \cdot T_{пл}$ , где  $T_{пл}$  - температура плавления металла. При этих температурах разупрочнение не происходит (кривая 1). Полугорячее выдавливание (ПГВ) металлических заготовок происходит при температурах  $T \in (0,45 \dots 0,55) \cdot T_{пл}$ . В этом случае развивающееся разупрочнение металла не завершается полностью (кривая 2). И, наконец, горячее выдавливание, при котором металл полностью разупрочняется (кривая 3) [4]. Так, например, при ПГВ заготовки из стали О8 необходимо нагреть на температуру 250... 300°C. При этом осуществляется технологическое заметное снижение интенсивности силового воздействия непосредственно на матрицу в процессе деформирования заготовки по сравнению с процессом ХВ.

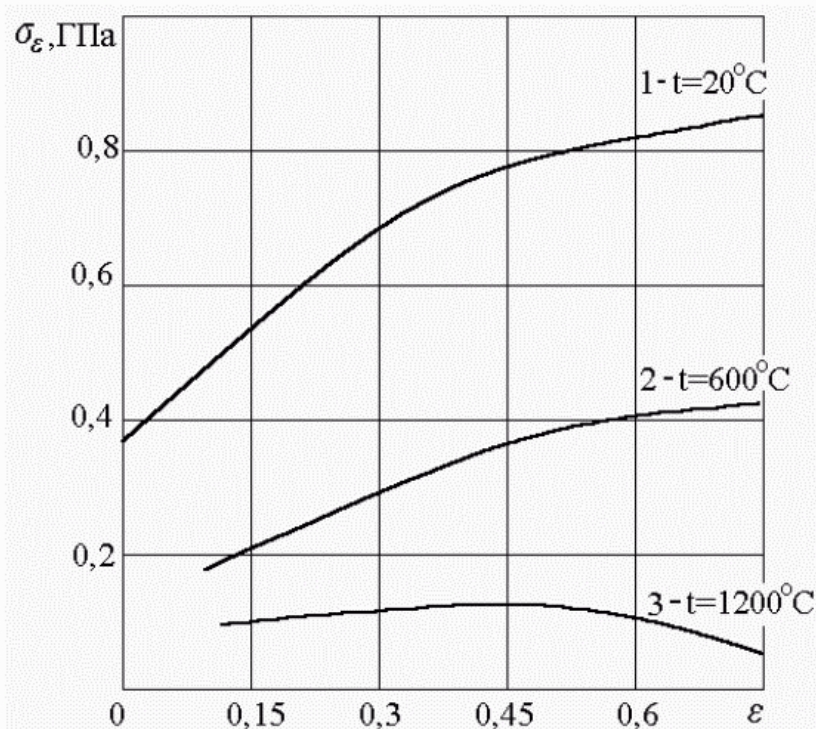


Рис.1. Диаграммы истинных напряжений для стали 08.

В составных матрицах для ПГВ рабочая вставка при контакте с заготовкой нагревается до высоких температур. Возникающее неоднородное поле температур приводит к тому, что геометрические параметры элементов составной матрицы изменяются, вызывая искажение в форме деформируемой заготовки. Анализ производственного опыта, а также литературных данных [4, 5] показал, что один из распространенных технологичных способов охлаждения заключается в снижении температуры наружной поверхности матрицы. В этом случае возникают большие градиенты температурного поля, и как, следствие этого, резкое изменение напряженного состояния в точках внутренней поверхности рабочей вставки. Охлаждение же непосредственно внутренней рабочей поверхности рабочей вставки вызывает возникновение значительных растягивающих окружных напряжений в точках на ее поверхности.

Рассмотрим составную бандажированную матрицу для ПГВ осесимметричных деталей. Геометрические параметры и упругие характеристики материалов структурных элементов матрицы приведены в таблице 1.

Модель данного типа составной бандажированной матрицы в классе структурно связанных механических систем [6] состояла из взаимодействующих однородных изотропных осесимметричных тел, ограниченных коническими и цилиндрическими поверхностями. Структурные элементы системы моделировали заготовку, рабочую вставку и комбинированный бандаж, выполненный в виде сегментного кольца, бандажа

и обоймы. Между сегментным кольцом и бандажом на соприкасающихся конических поверхностях ведена модель контактного слоя без скольжения, учитывающего возникающий при запрессовке матрицы первоначальный натяг. Внешняя поверхность рабочей вставки выполнена в виде двухстороннего усеченного конуса с меньшими основаниями на торцах. Аналогичная модель контактного слоя была введена на поверхностях взаимодействия между рабочей вставкой и сегментным кольцом, внутренняя поверхность которого выполнена в виде ответной конической поверхности. На границе раздела внутренней поверхности рабочей вставки и деформируемой заготовки вводился контактный слой второго типа, моделирующий фрикционное контактное взаимодействие по закону Кулона. Между коническими поверхностями обоймы и бандаж контактный слой третьего типа моделировал контакт между этими поверхностями под действием сил затяжки матрицедержателя.

Таблица 1. Исходные данные

		Геометрические характеристики:											
		$\Delta L_2, \text{M}$	$L_{\text{заг}}, \text{M}$	$\Delta L_{\text{об}}, \text{M}$	$L_{\text{об}}, \text{M}$	$R_{\text{вн}}, \text{M}$	$R_{\text{б1}}, \text{M}$	$R_{\text{бвн}}, \text{M}$	$R_{\text{б2}}, \text{M}$	$R_{\text{об}}, \text{M}$	$\alpha_1, ^\circ$	$\alpha_2, \alpha_3, ^\circ$	$\alpha_4, ^\circ$
		0.02	0.18	0.05	0.25	0.068	0.1	0.178	0.25	0.3	7	5	10
Физические характеристики: № Структурный элемент		Материал		E, МПа		v							
		1	Заготовка	СТ45	$2 \cdot 10^5$		0,3						
		2	Раб.вставка	ВК20	$2 \cdot 10^5$		0,33						
		3	Сегм.кольцо	35ХГСА	$2,1 \cdot 10^5$		0,31						
		4	Внеш.бандаж	35ХГСА	$2,1 \cdot 10^5$		0,31						
		5	Обойма	40Х	$1,9 \cdot 10^5$		0,27						

Нижние кольцевые области сегментного кольца и бандаж шарнирно закреплялись:  $U_z=0$ , при  $R_{\text{б1}} \leq r \leq R_{\text{б2}}$ . На центральной оси, в связи с осевой симметрией, граничные условия выбраны в виде:  $U_r=0$ , при  $\Delta L \leq z \leq L_{\text{заг}} + \Delta L$ .

Действие формоизменяющей нагрузки на заготовку  $P_{\text{деф}}$  моделировали фиксированные перемещения верхней плоскости заготовки:  $U_z=0,001\text{m}$  при  $0 < r < R_{\text{вн}}^*$ . Аналогично моделировались силы затяжки матрицедержателя  $P_{\text{заг}}$ .

В принятых условиях стационарный режим нагружения матрицы соответствовал случаю температурного режима: в точках внутренней поверхности рабочей вставки температуры равна  $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в точках внешней поверхности обоймы на участке  $H_{\text{охл}}$  температура равна  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

С использованием осесимметричных конечных элементов в комплексе SPACE-T [6] сформирована КЭ - модель составной бандажированной конической матрицы для ПГВ осесимметричных деталей, приведенная на рис.2. По решению задачи теплопроводности при идеальном тепловом контакте между соприкасающимися поверхностями структурных элементов модели матрицы вычисляли значения узловых температур в принятой конечно-элементной модели.

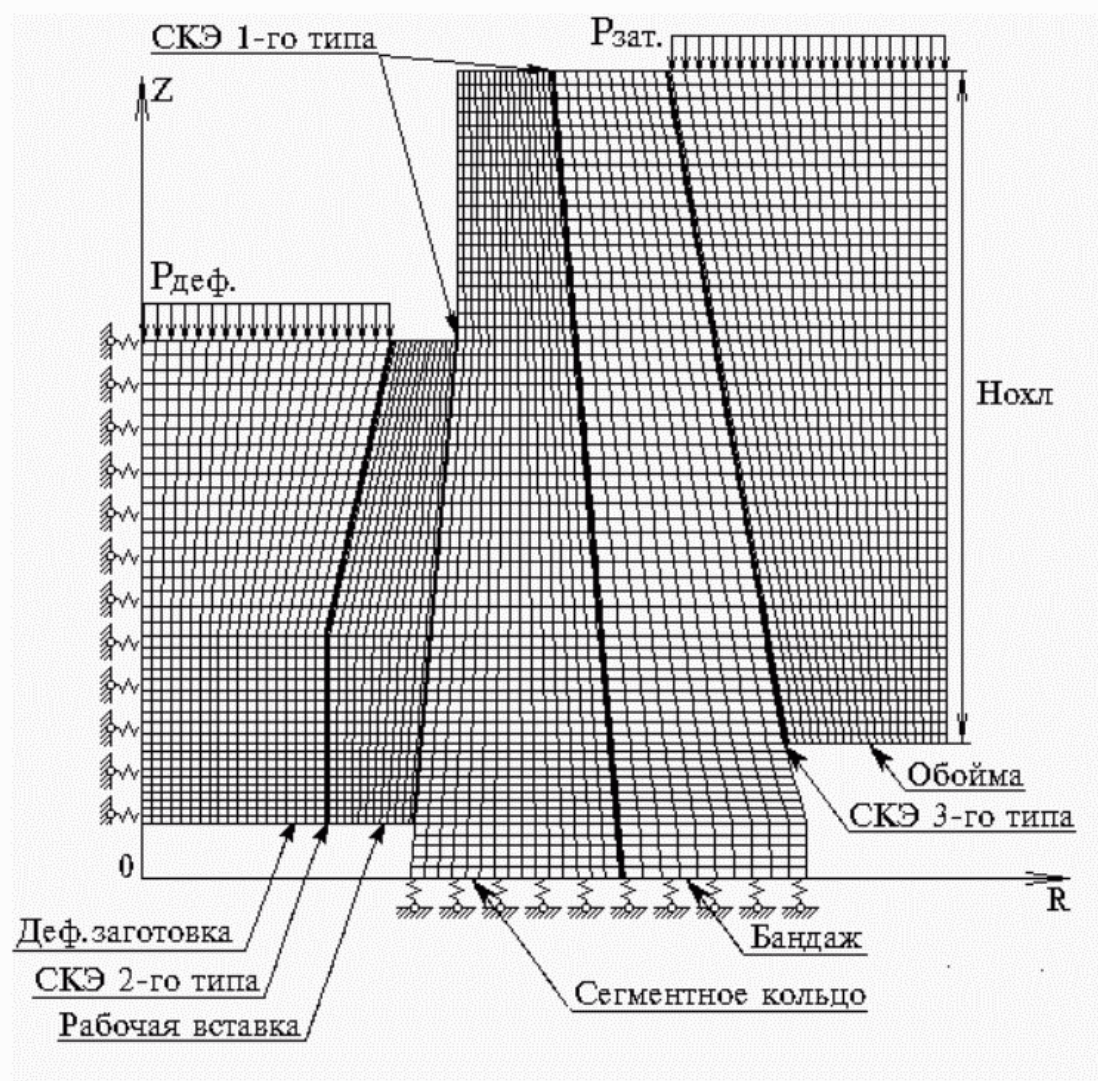


Рис. 2. Конечно-элементная модель составной матрицы для ПГВ.

Три типа контактных конечных элементов, кроме учета описанных выше моделей контактных взаимодействий, позволили вычислить истинные размеры контактных площадок в соответствующих зонах с точностью до

величины конечного элемента.

Для этой модели системы средствами программного комплекса SPACE-T были выполнены исследования напряженного состояния элементов конструкции составной конической матрицы СБК-1М для ПГВ полуконических втулок.

Анализ результатов расчета термоупругой задачи показал, что температурное поле приводит к позитивному перераспределению напряженного состояния, вызывая увеличение сжимающего радиального напряжения на внутренней поверхности рабочей вставки, усиливая эффективность внешнего бандажирования матрицы. Заметим, что расчеты позволили модифицировать конструкцию матрицедержателя с уменьшенными габаритными параметрами.

Анализ напряженно-деформированного состояния в модели составной матрицы показал, что эффективность охлаждения на внешней поверхности обоймы достигается на участке с относительной длиной  $H'_{охл} = H_{охл}/L_{об} = 0,5$ . Для этого случая на рис. 3 приведено распределение интенсивностей напряжений в элементах матрицы. Дальнейшее уменьшение  $H'_{охл}$  привело к увеличению интенсивности напряжений. С увеличением  $H'_{охл}$  не происходило заметного ее снижения.

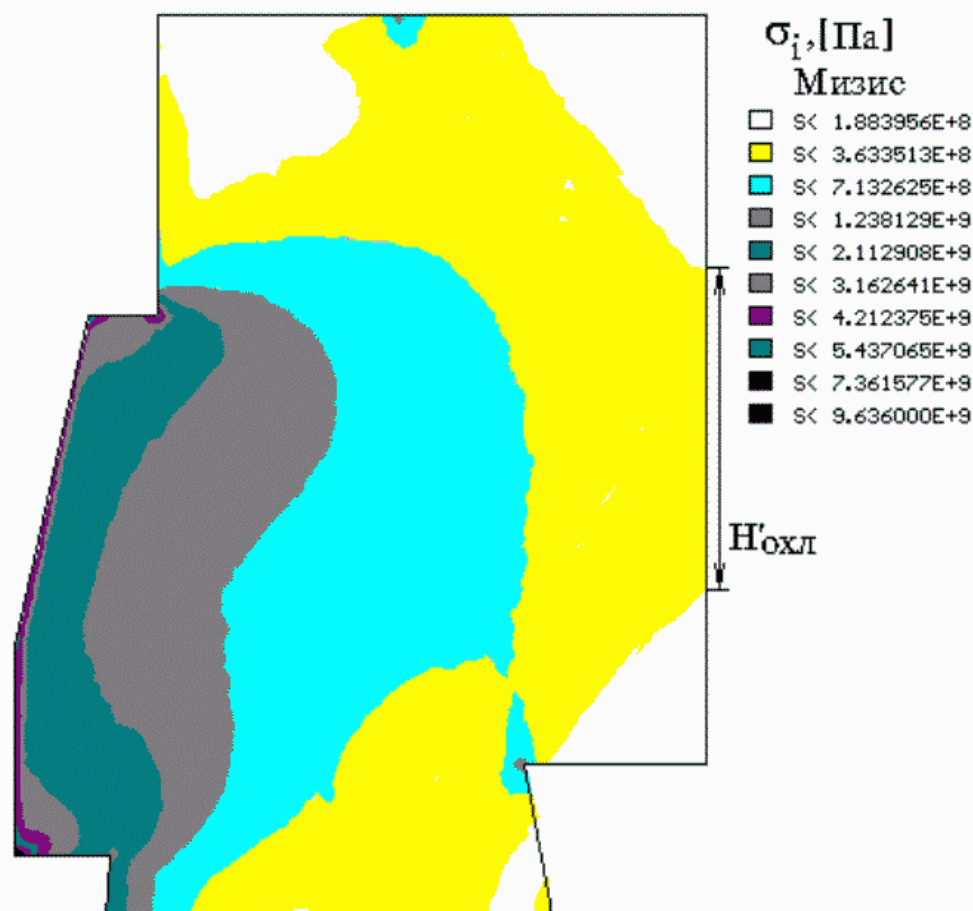


Рис. 3. Распределение интенсивности напряжений в нагретой матрице.



Дальнейшие исследования заключались в оценки влияния углов конусности  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ ,  $\alpha_4$  элементов матрицы на параметры напряженно-деформированного состояния в точках внутренней поверхности рабочей вставки.

Незначительное влияние на напряженное состояние во внутренних точках поверхности рабочей вставки угла  $\alpha_3$  позволило выбрать его рациональное значение из технологических требований.

Увеличение угла  $\alpha_4$  привело к возрастанию сжимающих радиальных напряжений в бандаже. При этом уменьшились радиальные напряжений в точках внутренней поверхности рабочей вставки. Значение этого угла также принимали наибольшим из технологических требований.

Данные расчетов, приведенные на рис.4, показали, что наиболее заметное влияние на интенсивность напряжений в точках внутренней поверхности рабочей вставки оказал угол конусности рабочей вставки  $\alpha_2$ .

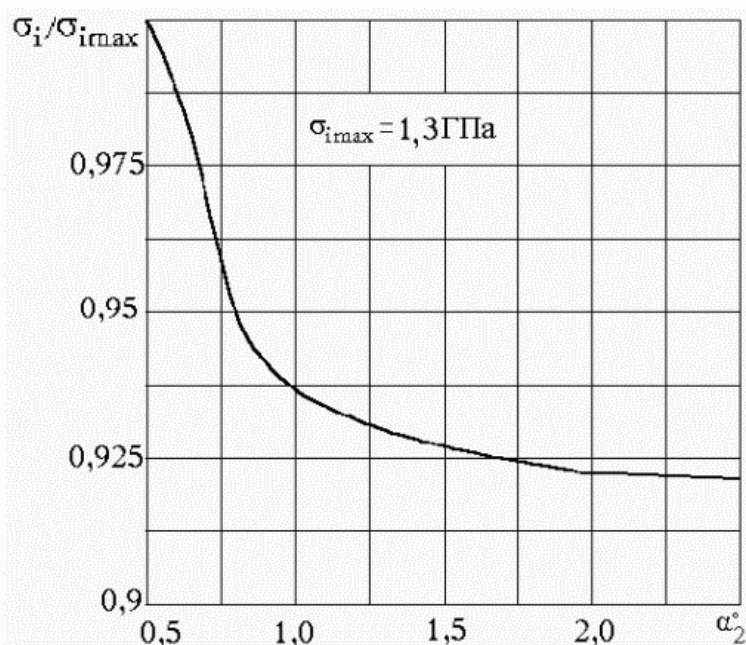


Рис.4. Зависимость интенсивности напряжения в опасной точке внутренней поверхности рабочей вставки.

Приведенные данные показали, что значительное уменьшение интенсивности напряжения (до 10%) происходило при возрастании угла конусности в интервале  $0,5^\circ \dots 1,0^\circ$ . В диапазоне значений угла конусности  $1,0^\circ \dots 2,0^\circ$  интенсивность напряжений незначительно уменьшилась (до 3%). Значения угла  $\alpha_2$  из этого диапазона являлись рациональными по прочностным и технологическим условиям. Дальнейшее уменьшение угла не привело к существенному снижению интенсивности напряжений.

Использование описанной методики позволило получить рекомендации для проектирования работоспособной конструкции составной матрицы СБК-1М

для ПГВ полуконических втулок со сниженными показателями материалоемкости отдельных ее элементов по сравнению с существующими.

### **Литература**

**1.** Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением.-4-е изд. - М.: Машиностроение, 1977. – 423с. **2.** Третьяков А.В., Трофимов Г.К., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. – М.: Машиностроение, 1964. – 223с. **3.** Холодная объемная штамповка: Справочник / Под ред.Г.А. Навроцкого. - М.: Машиностроение, 1973. – 496с. **4.** Евстратов В.А. Основы технологии выдавливания и конструирования штампов.- Харьков: Вища школа, 1987. – 144с. **5.** Головин В.А. Актуальные проблемы холодной и полугорячей объемной штамповки // Кузнечно-штамповое производство. - 1985. –№ 8. –С.34-36. **6.** Бондарь С.В., Зубатый С.С., Киркач Б.Н., Лавинский В.И. Программный комплекс SPACET для решения термоупругопластических контактных задач // Республ. межвед. научн.-техн. сборн. “Динамика и прочность машин”. - Харьков: ХГПУ, 2000. -Вып.57. –С.24-34.

Поступила в редколлегию 03.09.2001

УДК 539.3

### **КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ОБОЛОЧЕК**

В.В. Бортовой, Д.В. Лавинский

*Национальный технический университет "ХПИ", Харьков, Украина*

The text in question deals with stress-strain analysis for technological operation of connection of two thin-wall constructions. The construction are modeled by two cylindrical shells. One of them is oriented in vertical direction, another – in horizontal. Horizontal shell is loaded by uniform internal normal pressure. The finite element method (FEM) is numerical one of solution. The FEM program complex COSMOS/M is mean of solution. The deformed shape of construction and plots of displacements and stress intensity is presented. It is shown that uniform pressure is unsuccessful for required technological conditions.

Тонкостенные элементы в последнее время получили широкое распространение в практике проектирования и создания различных машиностроительных конструкций. Причиной этому является относительно малый вес при достаточно высоких прочностных и жесткостных характеристиках. Накопленный опыт проектирования и эксплуатации тонкостенных конструкций свидетельствует о том, что использование традиционных способов (болтовые