

PACS: 81.40.Lm, 62.20.Fe

С.В. Мирошниченко

## ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МОДЕЛЕЙ ШТАМПА

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины  
ул. Р. Люксембург, 72, г. Донецк, 83114, Украина

Статья поступила в редакцию 18 июня 2009 года

*С использованием тензометрии поверхности моделей и метода конечных элементов (МКЭ) проведено уточнение расчетов компонентов напряженно-деформированного состояния (НДС) штампов для накопления интенсивных пластических деформаций (ИПД).*

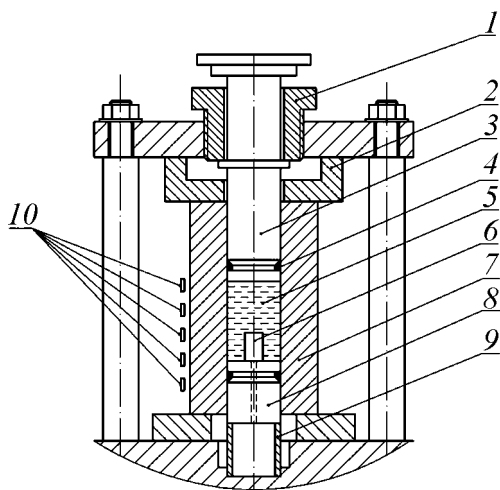
**Ключевые слова:** модель штампа, зона нагружения, тензометрия, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, предельное состояние

### 1. Введение

Штампы и пресс-формы, используемые для накопления ИПД или прессования изделий из порошков, отличаются сравнительно небольшой высотой зоны нагружения  $H_1$  по сравнению с длиной штампа  $L$ . Относительная высота зоны нагружения  $h_1 = H_1/L$  и ее положение относительно торцов штампа  $h_0 = H_0/L$  (где  $H_0$  – расстояние от зоны нагружения до торца штампа) изменяются в широких пределах ( $h_0 = 0-0.5$ ;  $h_1 = 0.1-1$ ). В подавляющем числе реальных нагружений рассматриваемого узла прогноз его предельного состояния на основе модели плоской деформации полых цилиндров [1,2] может рассматриваться только как нижняя оценка. Использование этой модели при расчете давления бандажирования также приводит к ошибкам вычисления оптимальных натягов и геометрических размеров элементов штампа [3], что способствует их быстрому выходу из строя (менее 300 нагружений при давлениях 1000–1200 МПа).

### 2. Методика исследования НДС модели штампа

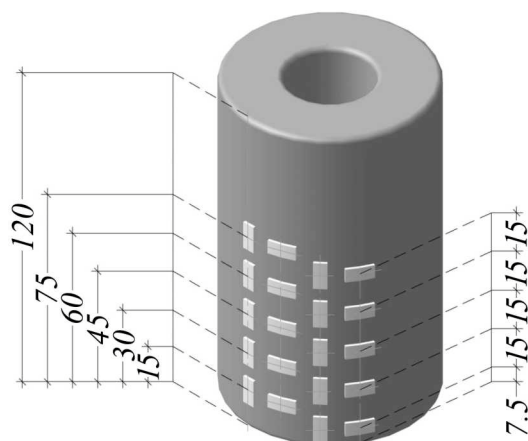
Для сравнения вариантов нагружения по степени опасности мы применяли матрицу влияния модели штампа, в которой содержатся компоненты ее напряженно-деформированного состояния, полученные численно с помощью МКЭ, и методику элементарных нагружений [4]. Соотношение компонент НДС внутренней и наружной поверхностей модели использовано для мониторинга предельного состояния поверхности рабочего канала по данным тензометрии наружной поверхности.



**Рис. 1.** Устройство для нагружения моделей штампов: 1 – гайка, 2 – вставка, 3 – пуансон, 4 – уплотнения, 5 – парафиновый стакан, 6 – манганиновый манометр, 7 – исследуемый цилиндр, 8 – пробка, 9 – мездоза, 10 – тензодатчики

Предварительно с помощью манганинового манометра, установленного в герметичном стаканчике из фторопласта с минеральным маслом в тело парафинового цилиндра, выбирали уровень осевой силы, соответствующий давлению 30 МПа и в дальнейшем контролируемый мездозой. Сигнал от 10 пар тензодатчиков, ориентированных взаимно перпендикулярно, манганинового манометра и мездозы поступал на тензоусилители «Топаз» и осциллографы К12-22 и НО71.2.

Схема наклейки тензодатчиков и эскиз модели показаны на рис. 2. Модели подвергали нагружениям (таблица), зависящим от размера ( $h_1 = H_1/L$ ) и положения ( $h_0 = H_0/L$ ) зоны нагрузки относительно торцов штампа.



**Рис. 2.** Схема расположения тензодатчиков на модели штампа

В качестве моделей применяли втулки из стали Ст3 ( $\sigma_s = 220$  МПа) с диаметром рабочего канала  $d = 30$  мм и длиной  $L = 120$  мм. Размер ее наружного диаметра  $D$  определяли в зависимости от выбранного значения толстостенности ( $m = D/d = 1.6; 2.4$ ).

Нагружение моделей осуществляли на лабораторном гидропрессе ( $F = 200$  кН) с помощью специального устройства (рис. 1). В качестве передающей давление среды использовали парафин. Устройство снабжено гайкой для механического фиксирования усилия нагружения, величину которого измеряли с помощью мездозы. Основной массив значений относительных деформаций наружной поверхности  $\epsilon_{\tau 2}$  и  $\epsilon_{z 2}$  получен при давлении в рабочем канале 30 МПа. Предварительно с помощью манганинового манометра, установленного в герметичном стаканчике из фторопласта с минеральным маслом в тело парафинового цилиндра, выбирали уровень осевой силы, соответствующий давлению 30 МПа и в дальнейшем контролируемый мездозой. Сигнал от 10 пар тензодатчиков, ориентированных взаимно перпендикулярно, манганинового манометра и мездозы поступал на тензоусилители «Топаз» и осциллографы К12-22 и НО71.2.

Высоту нагружения устанавливали с помощью стальных пробок 8 (см. рис. 1).

На рис. 3 представлены средние значения окружной  $\epsilon_{\tau 2}$  и осевой  $\epsilon_{z 2}$  деформаций (приведенных к давлению нагрузки 1 МПа) вдоль наружной поверхности модели с толстостенностью  $m = 1.6$  и  $2.4$  с различными вариантами нагружения. Обращает на себя внимание высокий градиент деформаций наружной поверхности вдоль оси модели.

Варианты нагружения моделей штампа внутренним давлением

| № модели | $H_0$ , mm | $h_0$ | $H_1$ , mm | $h_1$ |
|----------|------------|-------|------------|-------|
| 1        | 0          | 0     | 15         | 0.125 |
| 2        |            |       | 30         | 0.25  |
| 3        |            |       | 45         | 0.375 |
| 4        |            |       | 60         | 0.5   |
| 5        |            |       | 75         | 0.625 |
| 6        | 15         | 0.125 | 15         | 0.125 |
| 8        |            |       | 30         | 0.25  |
| 9        |            |       | 45         | 0.375 |
| 10       |            |       | 60         | 0.5   |
| 11       | 30         | 0.25  | 15         | 0.125 |
| 12       |            |       | 30         | 0.25  |
| 13       |            |       | 45         | 0.375 |
| 14       |            |       | 60         | 0.5   |
| 15       | 45         | 0.375 | 15         | 0.125 |
| 16       |            |       | 30         | 0.25  |
| 17       | 60         | 0.5   | 15         | 0.125 |
| 18       |            |       | 30         | 0.25  |

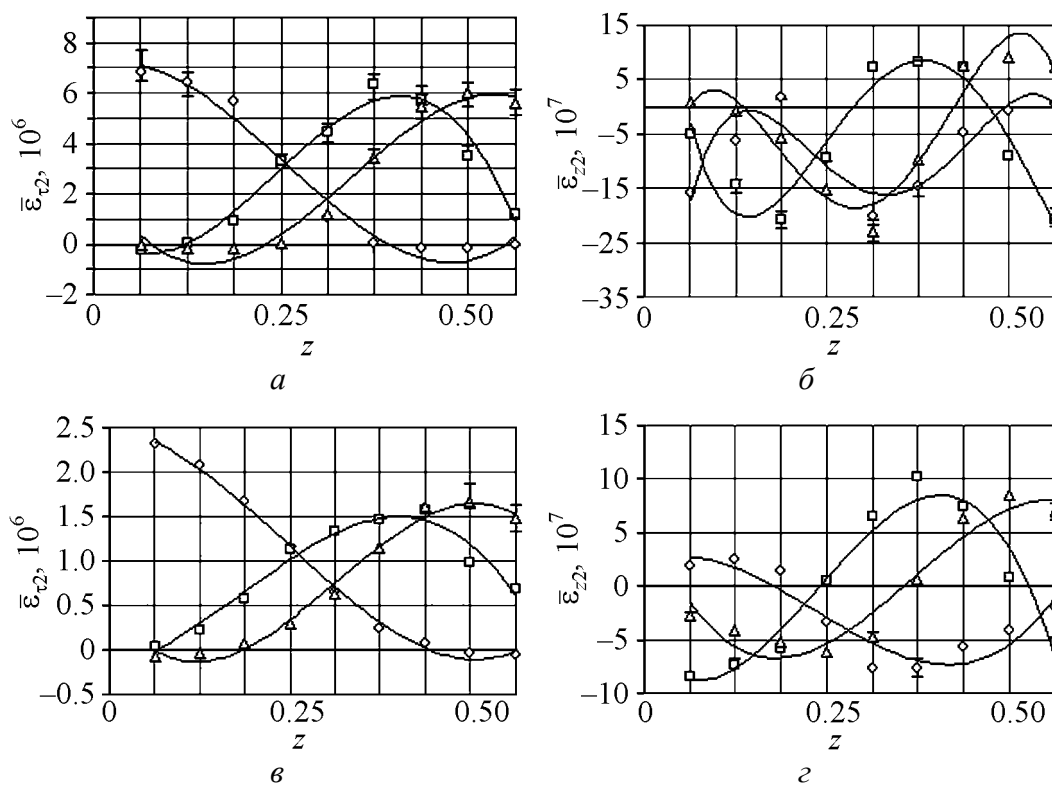


Рис. 3. Средние значения окружной  $\varepsilon_{\tau 2}$  и осевой  $\varepsilon_{z 2}$  деформаций ( $P = 1$  МПа) вдоль оси  $z$  наружной поверхности модели: а, б –  $m = 1.6$ ; в, г –  $m = 2.4$ ;  $\circ$  –  $h_0 = 0$ ,  $\square$  –  $h_0 = 0.25$ ;  $\triangle$  –  $h_0 = 0.375$ ;  $h_1 = 0.25$

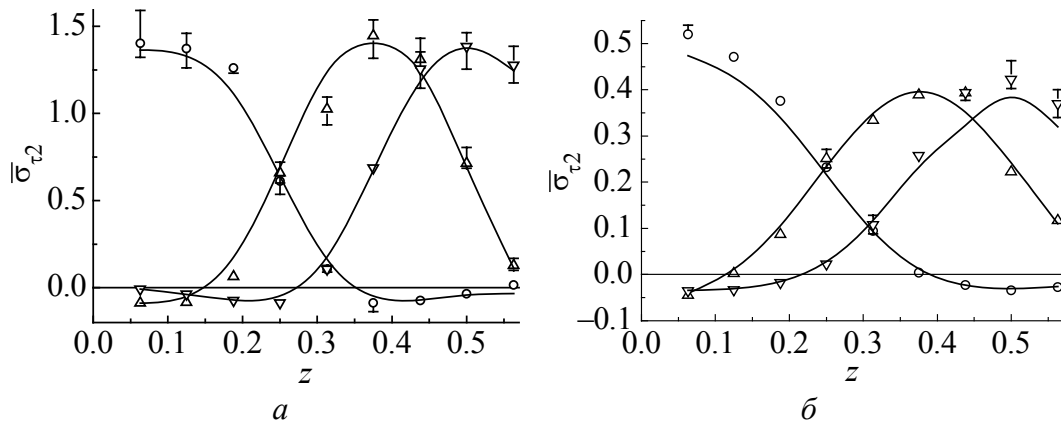
На базе данных рис. 3 с помощью закона Гука построены зависимости окружных напряжений  $\sigma_{\tau 2}$  наружной поверхности моделей (рис. 4):

$$\sigma_{\tau 2} = \frac{E(\varepsilon_{\tau 2} + \mu\varepsilon_{z 2})}{1 - \mu^2}.$$

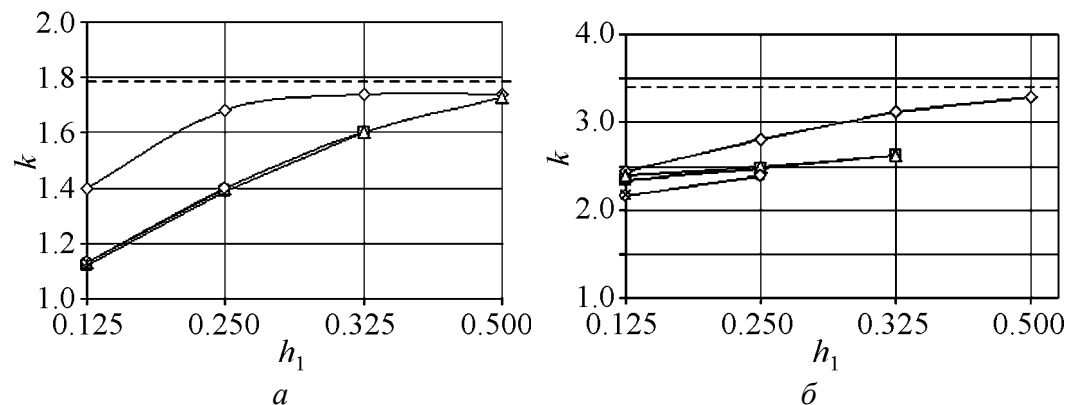
Для сравнения на этом же рисунке приведены аналогичные данные, полученные с помощью МКЭ.

Используя значения параметра  $k = \sigma_{\tau 1} / \sigma_{\tau 2}$ , полученного МКЭ (рис. 5), вычислены максимальные значения окружного напряжения на внутренней поверхности  $\sigma_{\tau 1}$  модели (рис. 6).

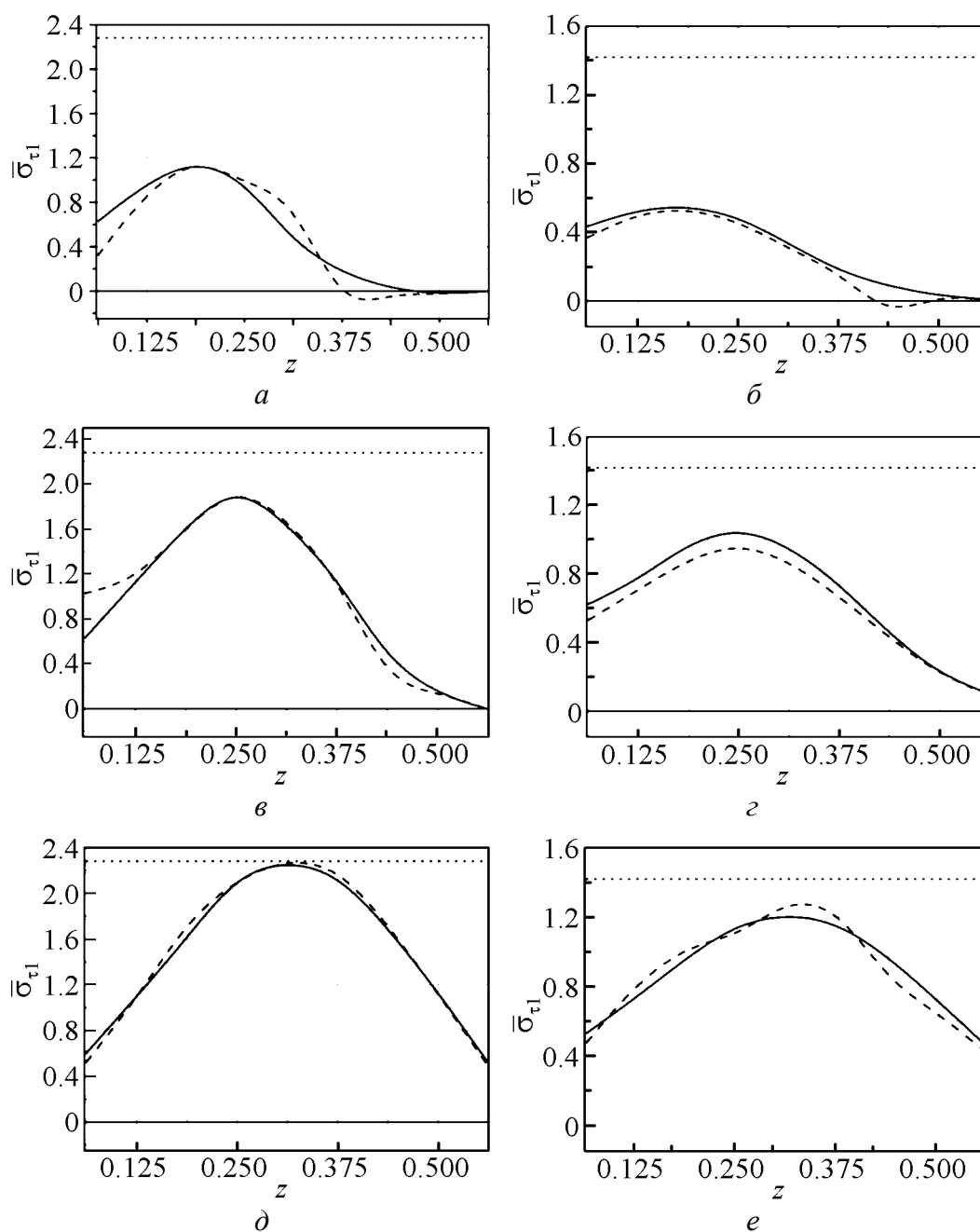
Сравнение параметра  $k$ , полученного МКЭ, с аналогичным параметром, вычисленным по модели плоской деформации,  $k = (m^2 + 1)/2$  выявило их существенное расхождение, которое для приведенных на рис. 3 вариантов составляет 16–23%, а для некоторых – до 40%.



**Рис. 4.** Значения окружных напряжений  $\sigma_{\tau 2}$  ( $P = 1$  МПа) наружной поверхности модели, полученные МКЭ (—) и тензометрией для вариантов нагружения:  $a - m = 1.6$ ;  $b - m = 2.4$ ;  $\circ - h_0 = 0$ ,  $\Delta - h_0 = 0.25$ ,  $\nabla - h_0 = 0.375$ ;  $h_1 = 0.25$



**Рис. 5.** Значения параметра  $k$  для опасного сечения модели, полученные с использованием МКЭ:  $a - m = 1.6$ ;  $b - m = 2.4$ ;  $\diamond - h_0 = 0$ ,  $\square - h_0 = 0.125$ ,  $\circ - h_0 = 0.25$ ,  $\Delta - h_0 = 0.375$ ,  $\times - h_0 = 0.5$



**Рис. 6.** Максимальные значения окружного напряжения на внутренней поверхности модели в зависимости от варианта нагружения: *a* –  $m = 1.6, h_0 = 0, h_1 = 0.25$ ; *б* –  $m = 2.4, h_0 = 0, h_1 = 0.25$ ; *в* –  $m = 1.6, h_0 = 0.25, h_1 = 0.25$ ; *г* –  $m = 2.4, h_0 = 0.25, h_1 = 0.25$ ; *д* –  $m = 1.6, h_0 = 0.375, h_1 = 0.25$ ; *е* –  $m = 2.4, h_0 = 0.375, h_1 = 0.25$ ; — — результаты МКЭ, --- — тензометрии, ..... — расчета по моделям Ляме

Минимальное давление появления пластических деформаций в моделях, соответствующее значениям  $h_1 \geq 0.75$ , оценивали по соотношению [3,4]:

$$P_{\min} = \frac{\sigma_s(m^2 - 1)}{\sqrt{3}m^2}.$$

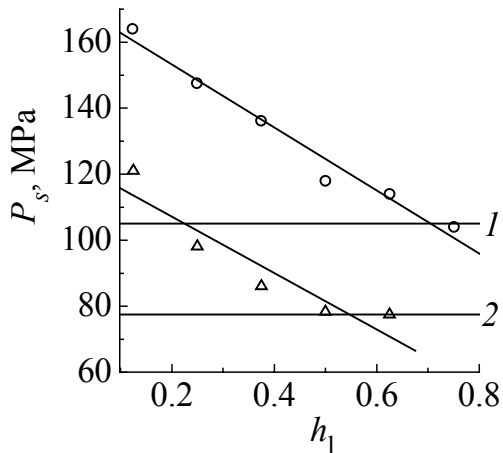


Рис. 7. Предельное состояние моделей штампа в зависимости от длины участка нагружения:  $\circ$  –  $m = 2.4$ ,  $P_s = 172.53 - 95.77h_1$ ;  $\triangle$  –  $m = 1.6$ ,  $P_s = 124.21 - 85.52h_1$ ; 1, 2 – результаты расчета по модели Ляме соответственно при  $m = 2.4$  и 1.6

Результаты экспериментальной проверки предельного состояния моделей по началу пластической деформации поверхности рабочего канала, нагруженных внутренним давлением на участках  $h_1 = 0.125-0.75$ , приведены на рис. 7.

### Выводы

1. Предложена методика, позволяющая численно-экспериментальным способом определить напряженное состояние на поверхности рабочего канала при произвольной геометрии участка нагружения.
2. Тензометрия наружной поверхности штампа дает возможность получать надежную информацию о напряженно-деформированном и предельном состояниях узла в любой момент его нагружения.
3. При относительной длине участка нагружения штампа в диапазоне  $h_1 = 0.125-0.65$  необходимо корректировать выражение для максимального главного напряжения.
4. Величина корректирующего коэффициента в зависимости от параметров  $h_1$ ,  $h_0$  и  $m$  изменяется в диапазоне 1.1–1.6 раза.
5. Смещение участка нагружения от свободного торца штампа на величину  $h_0 \geq 0.125$  существенно (на 15–25%) снижает напряжения на поверхности рабочего канала.

1. С.В. Мирошниченко, В.Г. Сынков, А.А. Лебедев, Проблемы прочности № 5, 32 (2002).
2. С.В. Мирошниченко, В.Г. Сынков, ФТВД 11, № 2, 132 (2001).
3. С.В. Мирошниченко, В.Г. Сынков, ФТВД 10, № 2, 92 (2000).
4. С.В. Мирошниченко, В.Г. Сынков, Металлообработка № 2 (2007).
5. С.В. Мирошниченко, В.Г. Сынков, ФТВД 17, № 2, 105 (2007).
6. В.Г. Сынков, О.Е. Глауберман, Е.И. Вербицкий, Проблемы прочности № 4, 95 (1986).
7. В.Г. Сынков, О.Е. Глауберман, Е.И. Вербицкий, ФТВД вып. 22, 85 (1986).

*С.В. Мірошніченко*

## ЧИСЕЛЬНО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МОДЕЛЕЙ ШТАМПУ

З використанням тензометрії поверхні моделей і методу кінцевих елементів проведено уточнення розрахунків компонентів напружено-деформованого стану штампів для накопичення інтенсивних пластичних деформацій.

**Ключові слова:** модель штамп, зона навантаження, тензометрія, метод кінцевих елементів, напружено-деформований стан, граничний стан

*S.V. Miroshnichenko*

## NUMERICAL-EXPERIMENTAL TECHNIQUE FOR INVESTIGATION OF STRESS-STRAIN STATE MODEL DIES

The calculations of components of the stress-strain state of dies for the accumulation of severe plastic deformations (SPD) were clarified by using strain measurement on the surface of models and by the finite-element method (FEM).

**Keywords:** die model, load zone, strain measurement, finite element method, stress-strain state, limiting state

**Fig. 1.** A device for loading die models: 1 – nut, 2 – inset, 3 – punch, 4 – seals, 5 – paraffin cup, 6 – manganine manometer, 7 – tested cylinder, 8 – plug, 9 – pressure capsule, 10 – strain gauges

**Fig. 2.** Layout for strain gauge location on die model

**Fig. 3.** Average values of tangential  $\varepsilon_{\tau 2}$  and axial  $\varepsilon_{z 2}$  strain ( $P = 1$  MPa) along the  $z$ -axis of the outer surface of the model:  $a, \bar{b} - m = 1.6$ ;  $\bar{c}, \bar{z} - m = 2.4$ ;  $\circ - h_0 = 0$ ,  $\square - h_0 = 0.25$ ;  $\Delta - h_0 = 0.375$ ;  $h_1 = 0.25$

**Fig. 4.** Values of tangential stresses  $\sigma_{\tau 2}$  ( $P = 1$  MPa) of the outer surface of the model obtained by FEM (—) and strain measurement for various loading types:  $a - m = 1.6$ ;  $\bar{b} - m = 2.4$ ;  $\circ - h_0 = 0$ ,  $\Delta - h_0 = 0.25$ ,  $\nabla - h_0 = 0.375$ ;  $h_1 = 0.25$

**Fig. 5.** Values of parameter  $k$  for the dangerous cross-section of the model obtained by using FEM:  $a - m = 1.6$ ;  $\bar{b} - m = 2.4$ ;  $\diamond - h_0 = 0$ ,  $\square - h_0 = 0.125$ ,  $\circ - h_0 = 0.25$ ,  $\Delta - h_0 = 0.375$ ,  $\times - h_0 = 0.5$

**Fig. 6.** Maximum values of tangential strain on the inner surface of the model depending on the loading type:  $a - m = 1.6$ ,  $h_0 = 0$ ,  $h_1 = 0.25$ ;  $\bar{b} - m = 2.4$ ,  $h_0 = 0$ ,  $h_1 = 0.25$ ;  $\bar{c} - m = 1.6$ ,  $h_0 = 0.25$ ,  $h_1 = 0.25$ ;  $\bar{z} - m = 2.4$ ,  $h_0 = 0.25$ ,  $h_1 = 0.25$ ;  $\bar{d} - m = 1.6$ ,  $h_0 = 0.375$ ,  $h_1 = 0.25$ ;  $e - m = 2.4$ ,  $h_0 = 0.375$ ,  $h_1 = 0.25$ ; — – FEM result, --- – strain measurement result, ··· – calculations by Lamé model

**Fig. 7.** Limiting state of die models depending on length of loading section:  $\circ - m = 2.4$ ,  $P_s = 172.53 - 95.77h_1$ ;  $\Delta - m = 1.6$ ,  $P_s = 124.21 - 85.52h_1$ ; 1, 2 – results of calculations by Lamé model for  $m = 2.4$  and 1.6, respectively