

УДК 62-50

Авдеева С.О., Короткина М.Р.

## ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ ДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТОК

### Abstract

*The components of small and finite deformations and rotations for every cell of microgrid were made using experimental values of displacement in knots of microgrid. For these cases lines of level were constructed. The character of changes of displacement in "hard" and "soft" areas of a material can be got analysing these lines of level. The material was under the condition of superplasticity.*

Используем данные, полученные в результате экспериментов на одноосное растяжение плоских образцов из некоторого титанового сплава, обсчет которых методом конечных элементов в линейной аппроксимации поля перемещений приведен в работе [1]. В статье предлагается другой метод расчета перемещений, который подробно изложен в работах [2].

Испытания проводились на материалах, находящихся в состоянии сверхпластичности: материал представляет собой "твердые" зерна характерного размера  $\sim 100$  до  $10$  мкм, находящиеся в "мягкой" среде. В процессе деформации квадратная сетка шагом  $1 \mu$ , нанесенная в виде меток (рис.1), искажалась и была сфотографирована в три различных момента времени: начальный, промежуточный и конечный.

Возникает задача восстановить поле перемещений внутри ячейки в линейном, в квадратичном и более высоких порядков приближениях по экспериментальным значениям перемещений в узловых точках. Если окажется при вычислении, что коэффициенты квадратичного и более высоких порядков приближения равны нулю, тогда внутри ячейки поле перемещений имеет линейную аппроксимацию, т. е. в

этом случае реализуются только аффинные преобразования.

В линейном приближении в узловых точках  $(n, m)$  и  $(n, m+1)$  компоненты перемещения представляем в виде:

$$\hat{u}^{n+1, m} = \Psi^{nm} \hat{x}^{n+1, m} + \Phi^{nm} \hat{x}^{n, m}, \quad \hat{u}^{nm+1} = \Psi^{nm} \hat{x}^{nm+1} + \Phi^{nm} \hat{x}^{nm}, \quad (1)$$

$$\hat{u}^{n+1, m+1} = \Psi^{nm} \hat{x}^{n+1, m+1} + \Phi^{nm} \hat{x}^{n, m+1}, \quad \hat{u}^{nm+1} = \Psi^{nm} \hat{x}^{nm+1} + \Phi^{nm} \hat{x}^{nm},$$

Компоненты перемещения и координаты узловых точек обозначены:

$$\begin{aligned} \hat{x}_i^{n+1, m} &= x_i^{n+1, m} - x_i^{nm}, & u_i^{n+1, m} &= x_i^{n+1, m} - x_i^{n, m}, \\ \hat{x}_i^{nm+1} &= x_i^{nm+1} - x_i^{nm}, & u_i^{nm+1} &= x_i^{nm+1} - x_i^{n, m}, \\ \hat{x}_i^{n+1, m+1} &= x_i^{n+1, m+1} - x_i^{nm}, & \hat{u}_i^{n+1, m} &= u_i^{n+1, m} - u_i^{nm}, \\ & & \hat{u}_i^{nm+1} &= u_i^{nm+1} - u_i^{nm}, \quad (2) \end{aligned}$$

Из (1) и (2) с учетом равенства, выполняемого на сетке,

$$x_i^{n+1, m} = x_i^{nm}, \quad x_i^{nm+1} = x_i^{nm}, \quad (3)$$

получим выражения:

$$\Psi^{nm} = \frac{\hat{u}^{n+1, m}}{\hat{x}^{n+1, m} - \hat{x}^{n, m}}, \quad \Phi^{nm} = \frac{\hat{u}^{nm+1}}{\hat{x}^{nm+1} - \hat{x}^{n, m}}, \quad \Psi^{nm} = \frac{\hat{u}^{n+1, m}}{\hat{x}^{n+1, m} - \hat{x}^{n, m}}, \quad \Phi^{nm} = \frac{\hat{u}^{nm+1}}{\hat{x}^{nm+1} - \hat{x}^{n, m}}.$$

По определению компоненты точечного тензора малых и конечных деформаций и тензора вращения в узле  $(n, m)$  рассчитываем по формулам

$$E_{ij}^{nm} = \frac{1}{2} (\Psi_{ij}^{nm} + \Phi_{ij}^{nm}), \quad K_{ij}^{nm} = \frac{1}{2} (\Psi_{ij}^{nm} - \Phi_{ij}^{nm} + \Psi_{ki}^{nm} - \Phi_{kj}^{nm}), \quad (4)$$

$$W_{ij}^{nm} = \frac{1}{2} (\Psi_{ij}^{nm} - \Phi_{ij}^{nm}), \quad W_{ij}^{nm} = \frac{1}{2} (\Psi_{ij}^{nm} - \Phi_{ij}^{nm} + \Psi_{ki}^{nm} - \Phi_{kj}^{nm}).$$

На рис. 2, 3, 4, 5, 6 приведен численный расчет всех компонент для случая малых (верхний рис.) и конечных (нижний рис.) деформаций и поворотов. Контуры на рисунках есть одинаковые

уровни компонент деформации и поворотов. Из качественного анализа рисунков можно принять следующую гипотезу: области замкнутых линий уровня, по всей видимости, связаны с деформацией "твердых" частиц, а разомкнутые – с деформацией "мягкой" среды. Экспериментально эту гипотезу подтверждает тот факт, что в центре замкнутых линий уровня находится риска делительной сетки, изображенная в виде  $\times$ , что хорошо видно на всех рисунках.

При численной обработке экспериментальных данных по формулам (4) согласно рис. 2, 3, 4, 5, 6 можно сделать предварительное заключение: 1% компоненты малых и конечных деформаций и поворотов описывают картину деформирования качественно одинаковым образом, 2% компоненты конечных деформаций и поворотов описывает поведение "мягкой" фазы, а "твердая" фаза качественно адекватно описывается компонентами и малых и конечных деформаций и поворотов.

Таким образом, используя экспериментальные данные, полученные с помощью делительных сеток, вычисляем компоненты деформаций и поворотов и строим линии уровня. Сформулируем обратную задачу. Восстанавливаем реальную структуру исследуемого материала в процессе деформирования: положение и деформации "твердых" частиц – замкнутые линии уровня, деформации "мягкой" фазы – разомкнутые линии.

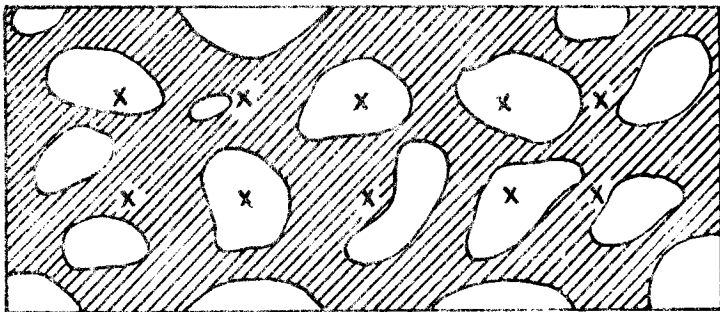


Рис. 1.

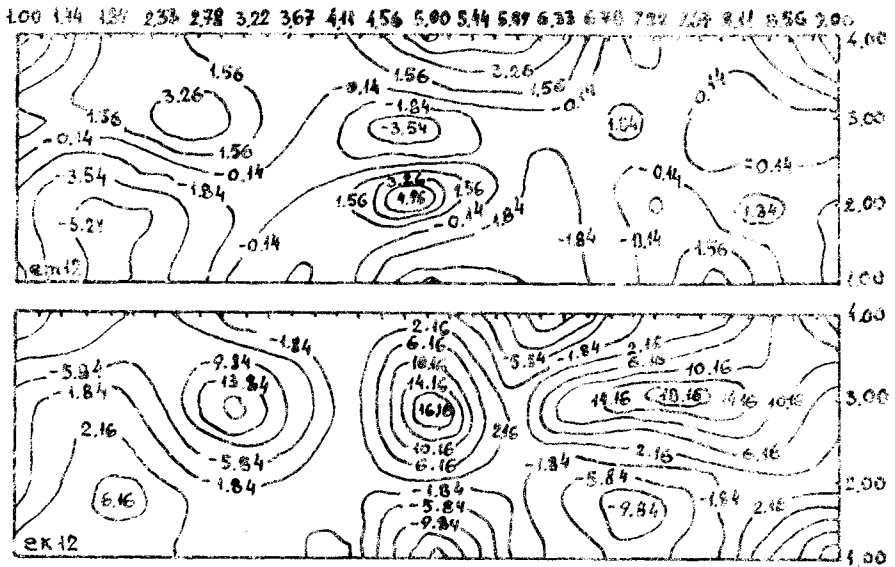


Рис. 2.

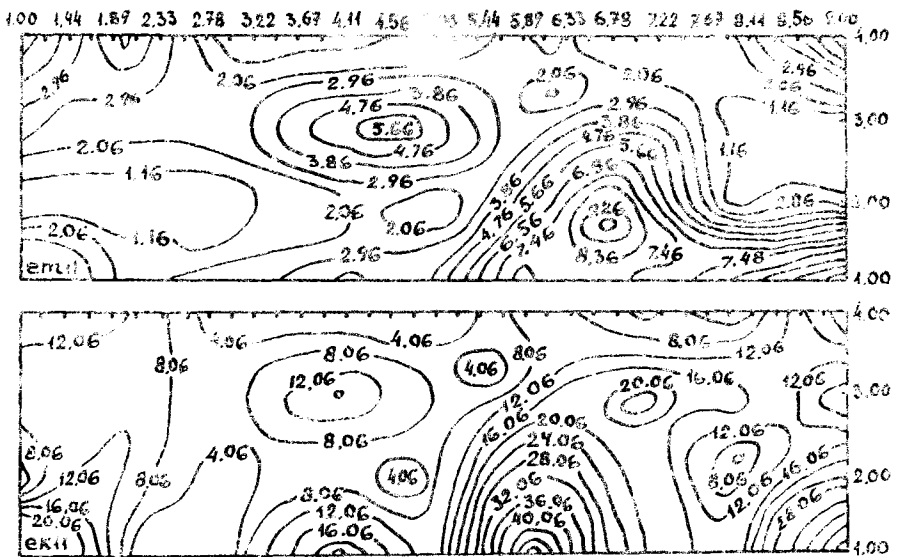


Рис. 3.

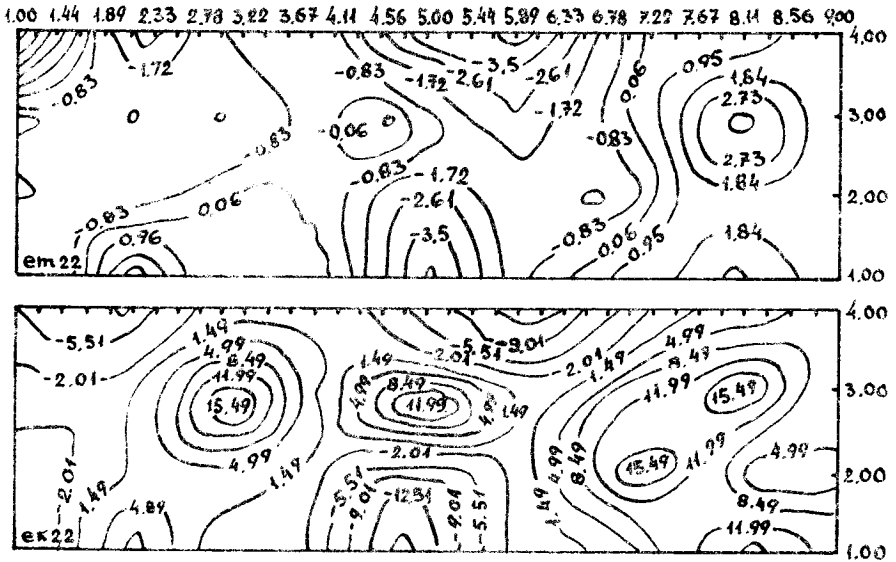


Рис. 4.

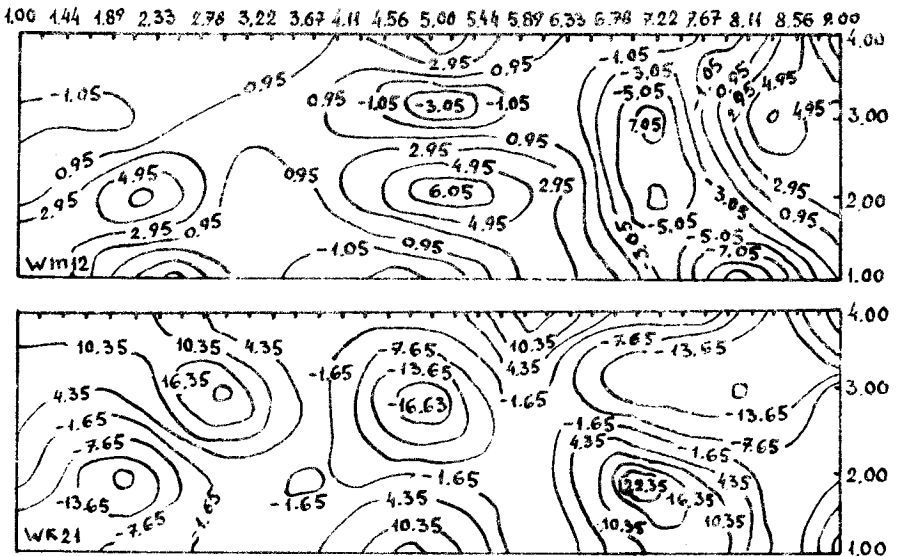


Рис. 5.

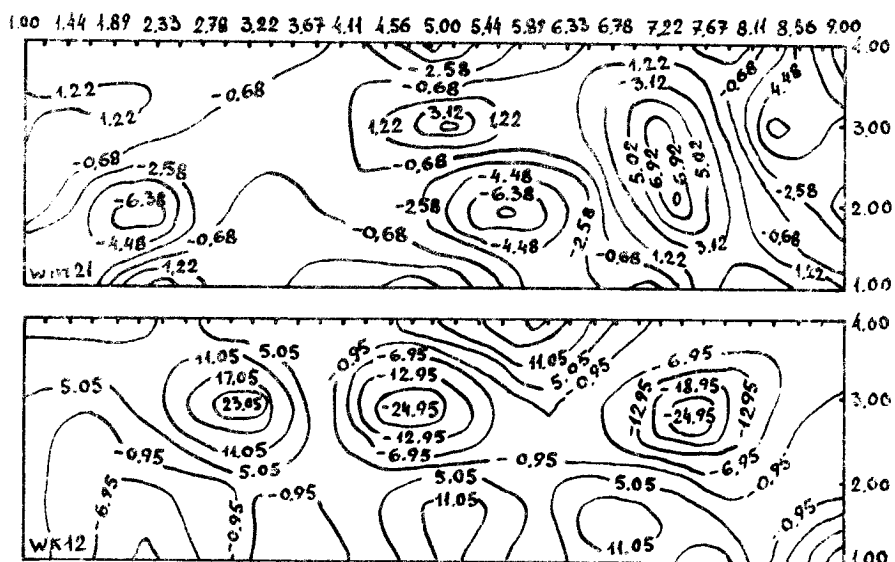


Рис. 6.

### Литература

1 M. Zelin, M. Alexandrova, Geometrical aspects of development of superplastic deformation. P.63-68, ICSAM-91, Asaka, Japan, June 3-6, 1991.

2. Короткина М.Р., Авдеева С.О. Развитие экспериментально-теоретических методов исследования... Определение мер деформаций с помощью делительных координатных сеток. - М., 1991. - 40л. - МГУ НИИ механики. Отчет №4156.

Московский государственный университет