

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П.КОРОЛЕВА»

Институт ракетно-космической техники  
Кафедра обработки металлов давлением

**СПОСОБ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ОСНОВАННОЙ НА  
ПРОЦЕССЕ ОСАДКИ МЕЖДУ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ  
ПЛИТАМИ**

Методические указания к лабораторной работе №3

Самара 2017

УДК 669:539.4(075.8)

Составители : проф. д.т.н. Попов И.П.

доц. к.т.н. Николенко К.А.

Рецензенты: проф., д.т.н. Каргин В.Р.

Способ структурообразования основанной на процессе осадки между плоскопараллельными плитами [Электронный ресурс]: электрон. метод. указания к лаб. работам / Минобрнауки России, Самар. нац. исслед. ун-т. им. С. П. Королева; авт.-сост. И. П. Попов, К. А. Николенко. – Электрон. текстовые и граф. дан. ( 1,07 Мбайт). - Самара, 2017. - 17 с.

Рассматривается способ интенсивного пластического деформирования, основанного на процессе осадки в условиях плоской деформации.

Предназначено для студентов по направлениям «Наноинженерия», «Металлургия», «Машиностроения».

**Цель работы:** Получение больших пластических деформаций способом осадки.

Наиболее прост способ наноструктурирования металлов, основанных на процессах осадки кубической заготовки. Для того, чтобы образец, подвергающийся большим интенсивным деформациям в условиях плоской деформации, сохранял первоначальную форму и размеры необходимо соблюдать их после каждого цикла. За цикл принимаются два этапа осадки по каждой оси (рисунок 1).

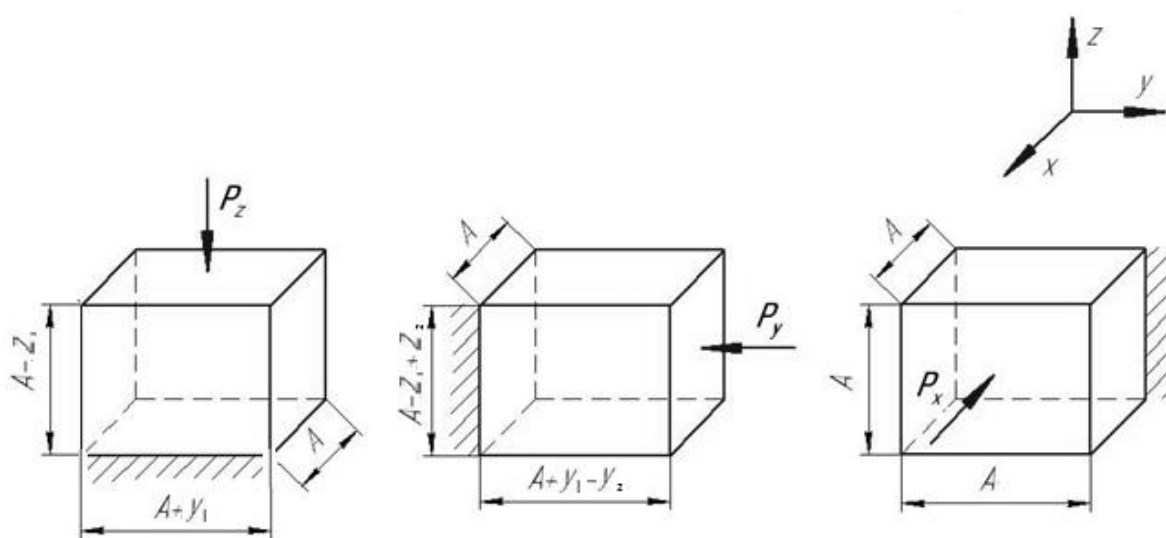


Рисунок 1 – Способ осадки кубической заготовки в условиях плоской деформации.

На рисунке 1 показаны положения и размеры образцов перед осадкой в каждом из двух направлений. После первого этапа осадки при условии сохранения объёма и формы куба имеем:

$$A^3 = (A - z_1)(A + y_1) \cdot A, \quad (1)$$

где  $A$  - сторона куба,

$z_1$  - перемещение грани куба в направлении координаты «z»,

$y_1$  - величина изменения размеров грани в направлениях «y» и «x».

В направлении оси  $x$  перемещение отсутствует.

После второго этапа осадки на величину « $y_2$ » в направлении координаты «y» условие постоянства объёма примет вид:

$$A^3 = (A + y_1 - y_2)(A - z_1 + z_2) \cdot A, \quad (2)$$

где  $y_2$  - перемещение грани куба в направлении координаты «у»,

$z_2$  - перемещение грани куба в направлении координаты «z»,

В направлении оси x перемещение отсутствует.

Чтобы восстановить размеры заготовки в исходном состоянии надо произвести осадку в направлении у на величину  $y_2=y_1$ .

Получим из условия постоянство объёма:

$$A^3 = (A + y_1 - y_2)(A - z_1 + z_2) \cdot A$$

$$z_1 = z_2 \quad (3)$$

Степень интенсивности деформации при плоской деформации для изотропного металла составит за один цикл:

$$\ell_i = \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \frac{(A + y_1) \cdot A}{A^2} = \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \frac{(A + y_1)}{A} \quad (4)$$

Считаем что для получения наноструктурированного зерна интенсивность деформации составит  $\ell_i = E$

Тогда количество циклов равна:

$$N = \frac{E}{\frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \frac{A + y_1}{A}} \quad (5)$$

Возможность достижение такой степени осадки предоставляет критерий Колмогорова, где величине критический деформации определяется:

$$\varepsilon_p^c = 2\delta_p \exp\left(-2,16 \frac{\sigma_0}{\sigma_i}\right)$$

где  $\sigma_0 = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3}$  (6)

$$\sigma_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + (\sigma_z - \sigma_y)^2}$$

При осадке в условиях плоской деформации соотношения между напряжениями можно принять:

$$\sigma_z = 2\sigma_x \quad \sigma_y = 0,3\sigma_x$$

## Порядок выполнения работы

- Зарисовать схему штампа для осадки в условиях плоской деформации.
- Рассчитать величину критической деформации для материала с заданными характеристиками плотности.
- Рассчитать количество циклов осадки при заданной величине осадки  $U_1$ .
- Занести в таблицу изменение размеров кубика.
- Провести осадку с рассчитанным числом циклов.
- Осмотреть на микроскопе поверхность деформированного образца.
- Сделать выводы.

Таблица 1 – Изменение размеров кубика по циклам.

№ цикла	№ этапа	Величина осадки кубика, мм
1	1	3
	2	4
2	1	3
	2	3
3	1	6
	2	7

### Моделирование способа в условиях плоской деформации

Числовой расчет формоизменения заготовок в холодном состоянии интенсивными пластическими деформациями проходили для кубика с размерами: длина  $a = 19$  мм; ширина  $b = 19$  мм; высота  $h = 19$  мм. Материал заготовки алюминий марки АД0. Для расчета в программе DEFORM-3D вместо алюминия марки АД0 использовали его аналог алюминий марки Al-1100.

Вся геометрия была построена в программе КОМПАС-3D, а затем импортирована в DEFORM-3D. Это было сделано для того, чтобы избежать ошибки, вызванной неправильным позиционированием объектов.

Материал заготовки Al-1100 взят из библиотеки материалов DEFORM. Для его описания принята модель упрочняющейся пластической среды (рисунок 2). Из рисунка видно, что материал интенсивно упрочняется. Предел текучести представлен в виде кусочно-линейной зависимости упрочнения материала. Этот закон упрочнения одинаков для всех материальных точек деформируемой заготовки (рисунок 2).

Тип объекта заготовки – пластичный. На поверхностях контакта прямоугольной заготовки с инструментом действуют силы трения, определяемые по закону Кулона. Коэффициент трения принят равным 0,4. Формоизменение осуществляют в три перехода (один полный цикл) при температуре окружающей среды 20 °С. Для получения необходимой мелкозернистой кристаллической структуры было проведено шесть полных циклов.

Компьютерная модель инструмента для пластической деформации прямоугольной заготовки, основанной на способе всестороннейковки, приведена на рисунке 2.

Инструмент состоит из подвижной верхней плиты 1, и неподвижной нижней плиты 3.

Полный цикл состоит из 3 этапов. Заготовка помещается на нижнюю плиту.

На первом этапе осадка происходит вдоль оси Z. Верхняя плита опускается вниз и деформирует заготовку на 3 мм (рисунок 2 а).

На втором этапе необходимо осадить заготовку по оси X. Чтобы избежать ошибок, вызванных неправильным позиционированием объектов в DEFORM-3D, перемещение и вращение заготовки не применялось. Вместо этого на каждом этапе перемещению подвергался инструмент, а именно верхняя и нижняя плита. Верхняя плита деформирует заготовку на 4 мм (рисунок 2 б).

На третьем этапе происходит осаживание заготовки по оси Y. Для этого снова перемещаем верхнюю и нижнюю плиты и устанавливаем их

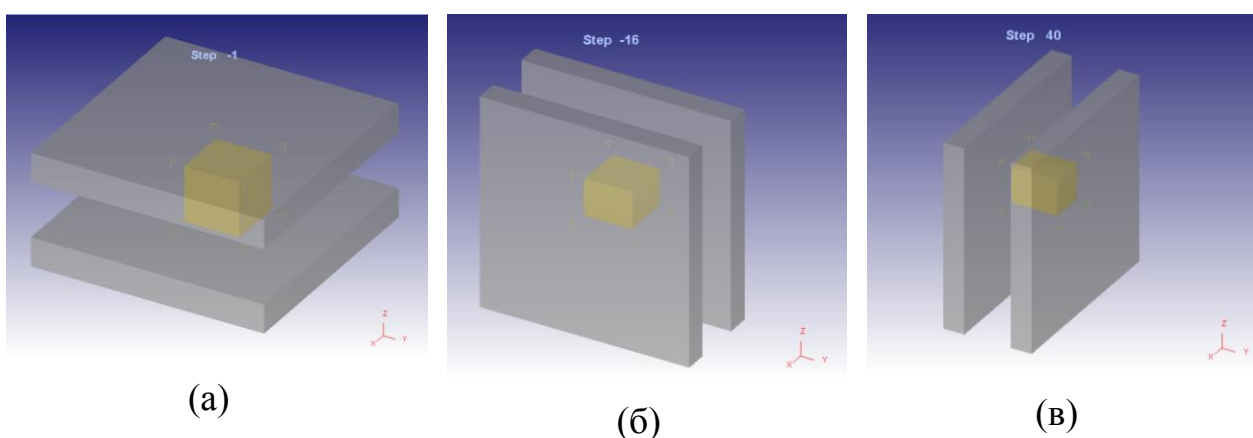
перпендикулярно оси деформирования. Осадка происходит на 5 мм (рисунок 2 в).

В результате, после первого цикла мы получаем заготовку, имеющую ту же форму, что и в начале процесса, а именно кубик. Размеры ребер несколько меньше, чем до процесса осадки. Это вызвано тем, что в процессе деформирования происходит бочкообразование и часть граней имеют выгнутую форму.

Данные операции повторяются поочередно до тех пор, пока не будет достигнута необходимая величина зерна заготовки. В результате, в заготовке возникает попеременно перемещающаяся по заготовке зона локальной пластической деформации. При этом геометрические размеры прямоугольной заготовки остаются неизменными.

Трехмерную упорядоченную сетку конечных элементов сгенерировали с использованием 8000 элементов.

Скорость верхней плиты принимаем равную  $\mathcal{G} = 2$  мм/с. Перемещение заготовки на каждом шаге решения равно 0,2 мм. Таким образом, при сохранении базы через каждые 5 шагов деформация заготовки составляет 1 мм.

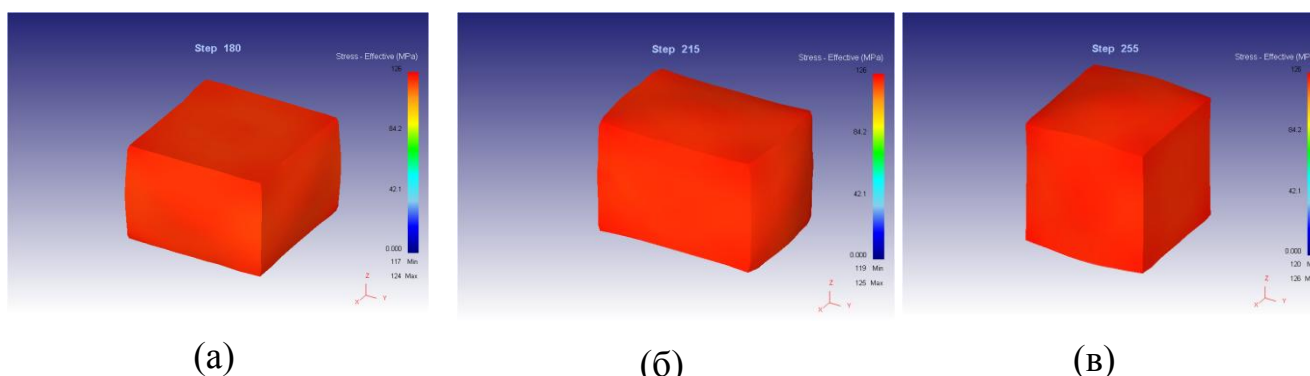


а – осадка по оси Z; б – осадка по оси X; в – осадка по оси Y.

Рисунок 2 – Этапы деформации.

Результатом моделирования в комплексе DEFORM, стало получение ряда графиков и зависимостей, таких как: интенсивность напряжения, интенсивность деформирования, направление и скорость течения металла, силовые параметры процесса и предельные параметры формообразования. Все эти графики и параметры необходимы для правильной постановки задачи, подготовки и проведения реального эксперимента на гидравлическом прессе.

На рисунке 3 приведены значения интенсивности напряжения на трех стадиях промежуточного четвертого цикла (всего 7), полученные в результате проведения виртуального эксперимента в комплексе DEFORM-3D.

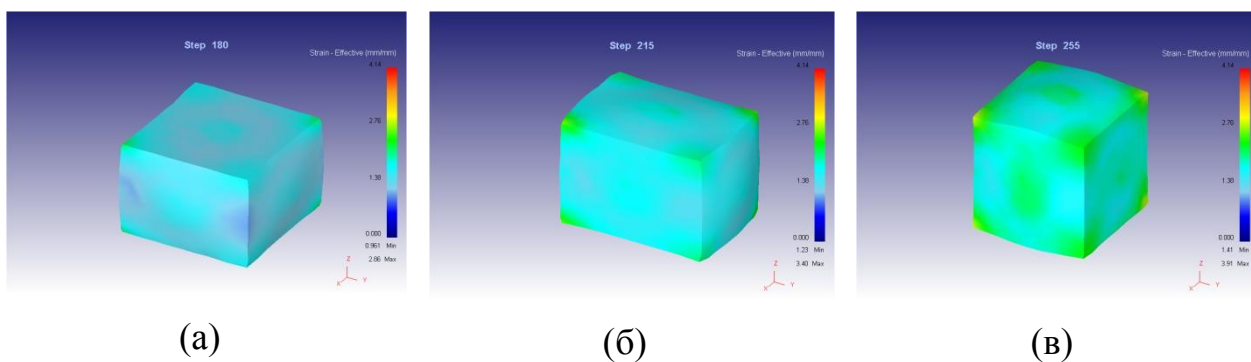


а – осадка по оси Z; б – осадка по оси X; в – осадка по оси Y.

Рисунок 3 – Интенсивность напряжения.

На рисунке 4 приведены значения интенсивности деформаций на трех стадиях промежуточного четвертого цикла (всего 7), полученные в результате проведения виртуального эксперимента в комплексе DEFORM-3D.

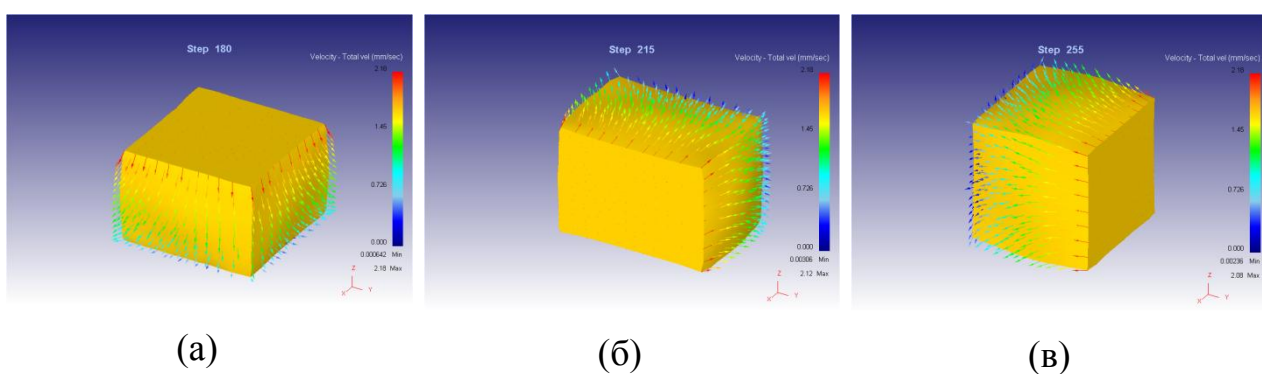




а – осадка по оси Z; б – осадка по оси X; в – осадка по оси Y

Рисунок 4 – Интенсивность деформаций.

На рисунке 5 представлены данные по направлению истечения металла.



а– по оси Z; б – по оси X; в – по оси Y

Рисунок 5 – Направление течения металла.

Длина стрелки и ее цвет соответствует скорости течения металла в данной точке. Чем ближе к деформируемой поверхности, тем выше скорость течения металла. В данном процессе максимальная скорость течения металла составляет 2,18 мм/сек.

На рисунке 6 и рисунке 7 приведены графики изменения усилий на верхней и нижней плите по одной из осей в зависимости от времени процесса деформации по циклам.

Из графиков видно, что верхняя и нижняя плита воспринимают на себя одинаковое усилие в течение всех циклов деформирования. Наблюдается рост усилия от цикла к циклу при одинаковой площади заготовки.

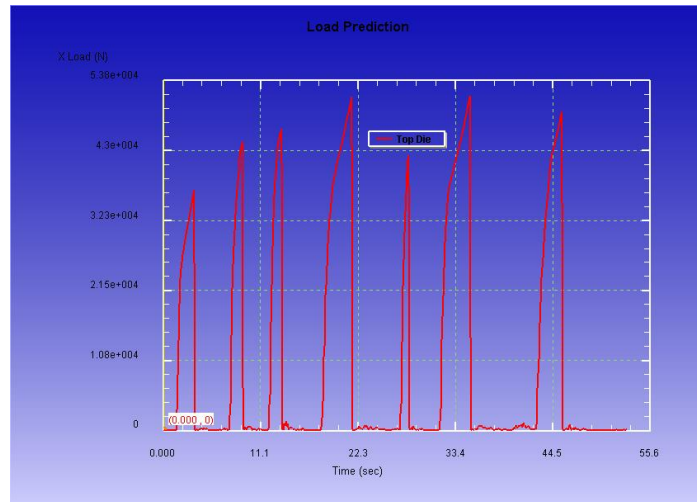
Образование трещины при осадке происходит при условии, когда интенсивность накопленной деформации достигает величины критической деформации, при данной схеме напряженного состояния [10].

$$\psi = \frac{\int_0^t d\varepsilon_i}{\varepsilon_p^{кр}} = 1 - \text{критерий Колмогорова}; \quad (7)$$

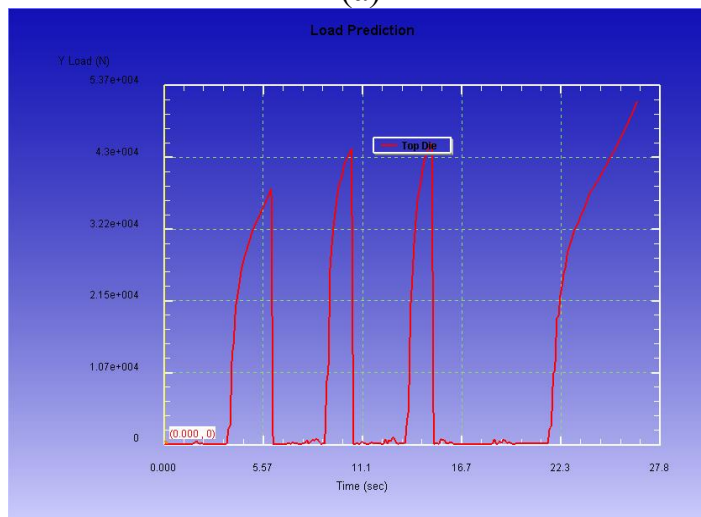
где  $\psi$  – критерий Колмогорова;

$\varepsilon_i$  – накопленная интенсивность деформаций;

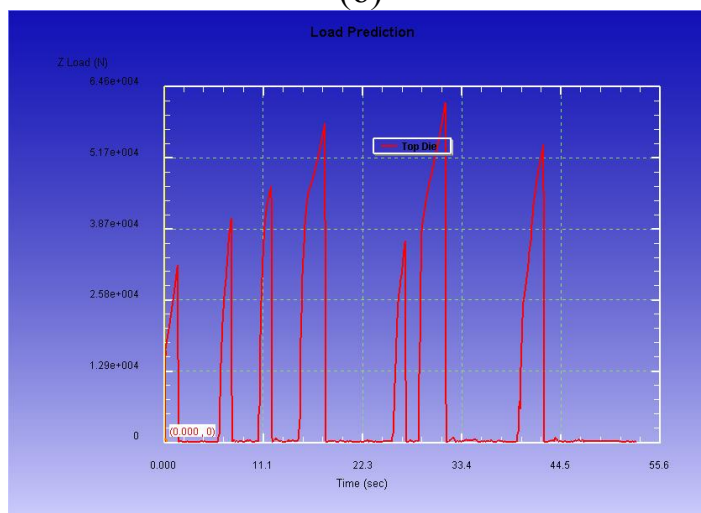
$\varepsilon_p^{кр}$  – критическая степень деформации для данной схемы напряженного состояния;



(а)



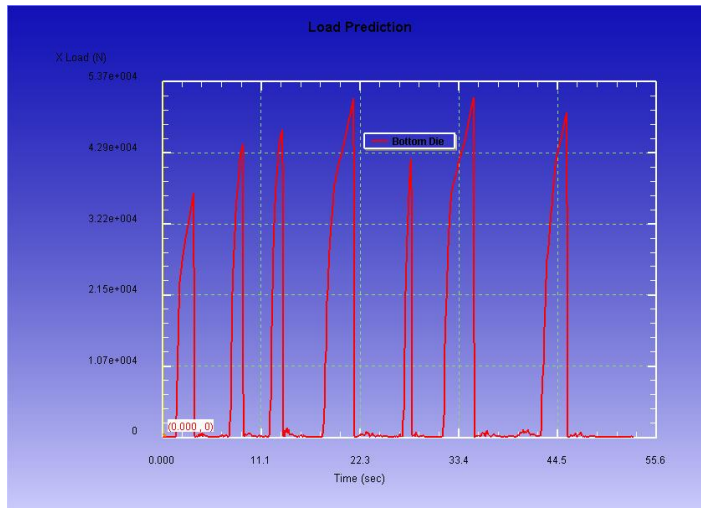
(б)



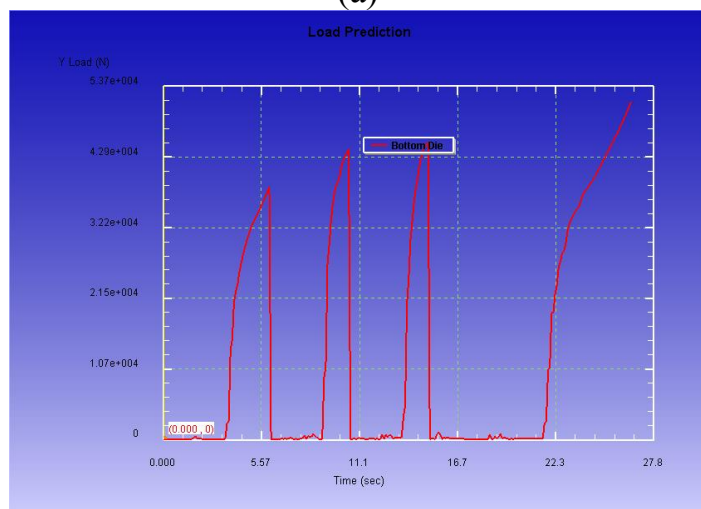
(в)

а – по оси X; б – по оси Y; в – по оси Z.

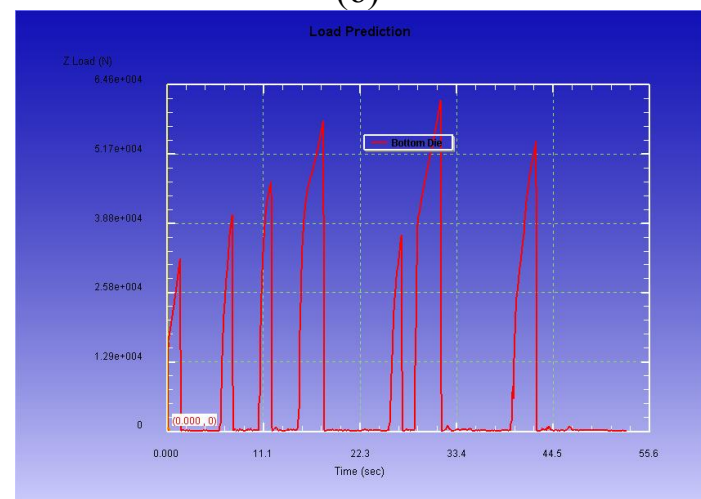
Рисунок 6 – Графики изменения усилий на верхней плите при осадке



(a)



(б)



(в)

а – по оси X; б – по оси Y; в – по оси Z

Рисунок 7 – Графики изменения усилий на нижней плите при осадке

$\sigma_i$  – интенсивность напряжения;

$\sigma_0$  – среднее напряжение в очаге деформации;

Критическая степень деформации равна:

$$\varepsilon_p^{кр} = 2\delta_p \exp\left[-2.16 \frac{\sigma_0}{\sigma_i}\right] - \text{предельная степень деформации.}$$

Для нахождения искомым величин напряжений на последнем этапековки заготовки определялось наибольшее напряжение с учётом знака. Затем на заготовке находили точку, соответствующую данному максимальному напряжению и уже для этой точки определились напряжения по двум оставшимся осям, а также интенсивность напряжения и интенсивность деформации.

В таблице 2 приведены численные значения напряжений в наиболее опасных точках очага пластической деформации по шагам. На рисунке 2.19 видно, что согласно критерию Колмагорова образование микротрещин произошло на 150 шагу.

Таблица 2 – Значение напряжений в опасных точках очага пластической деформации по шагам.

№ цикла	№ шага	Интенсивность напряжений по осям, МПа				Интенсивность напряжения, $\sigma_i$ МПа	Интенсивность деформации, $\varepsilon_i$	Критическая степень деформации, $\varepsilon_p$
		x, $\sigma_1$	y, $\sigma_2$	z, $\sigma_3$	среднее, $\sigma_0$			
1	5	-10,9	-11,7	-64,9	-29,16666667	54,9	0,0909	1,575218201
	60	-15,4	-121	-9,37	-48,59	110	0,777	1,298206542
2	105	-17	-131	-10,9	-52,96666667	118	1,06	1,318391116
3	150	-15,9	-132	-10,4	-52,76666667	121	1,45	1,282489656
4	255	-14	-133	-6,12	-51,04	124	2,76	1,21644989
5	285	6,71	41,6	20,9	23,07	122	2,82	0,332339036
6	395	-5,39	-124	-5,13	-44,84	126	4,32	1,078464784
7	485	-25,5	-146	-18	-63,16666667	127	5,02	1,464016269

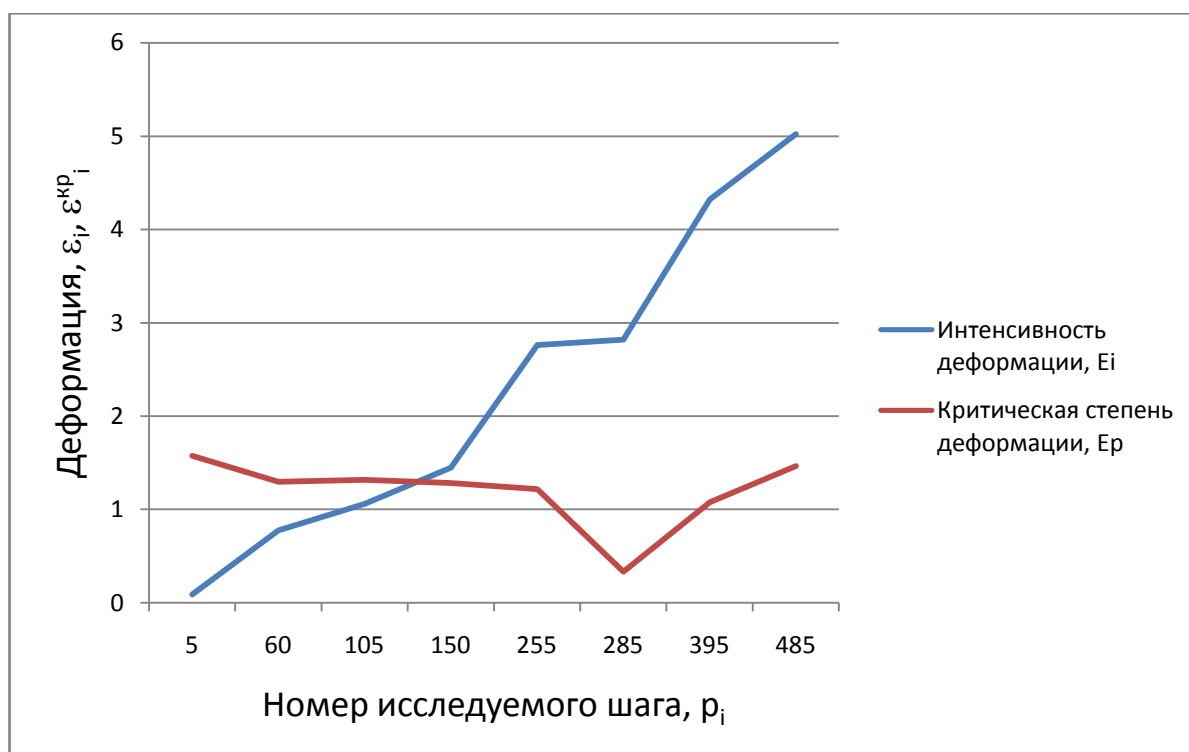


Рисунок 8 – Определение разрушения по критерию Колмогорова

В процессе моделирования получены значения величин напряжений в самом начале (шаг 5) и последних шагах каждого цикла, т.е. на последней третьей стадии каждого цикла (рисунок 8) (таблица 2). Анализ результатов показывает, что согласно критерию (7) образование микротрещины происходит в конце второго цикла (шаг 150).

Как показал анализ, на схеме напряжённо-деформированного состояния величина осадки на этапековки не оказывает существенного влияния.

Способ многопереходной всестороннейковки разработан относительно заготовки в виде кубика, при деформации его путем приложения усилия последовательно по всем трем направлениям к двум взаимно-противоположным сторонам каждого из трех направлений (рисунок 2). При этом в конце троекратного деформирования (цикла) необходимо восстановить размеры исходной заготовки, придерживаясь величин осадки,

предложенных в таблице 4.2. Интенсивность деформации за один цикл составит:

$$e_{i\sigma} = \ln \left| \frac{z}{A} \right| + \ln \left| \frac{y}{A} \right| + \ln \left| \frac{x}{A} \right|, \quad (1.7)$$

где  $e_{i\sigma}$  – интенсивность деформации за один цикл.

Полученные способами прессования, сдвига, осадки, всесторонней ковкой образцы подвергались металлографическому исследованию.

Образцы предварительно шлифовались на наждачных бумагах разной зернистости (наждачных шкурках), полировались на сукне с применением шлифовальной пасты ГОИ, электрополировались в растворе, содержащем 430 мл  $\text{H}_3\text{PO}_4$  и 60  $\text{O}_2\text{CrO}_3$  до получения зеркальной поверхности. Травление осуществлялось в растворе азотной и плавиковой кислот в соотношении 4:1. Структура исследовалась на металлографическом микроскопе МИМ-8М при увеличении 200 крат. Электронно-микроскопические исследования проводились на электронном микроскопе ЭВМ-1005 с использованием метода реплик при ускоряющем напряжении 75кв.

## Контрольные вопросы

1. При каких величинах деформаций происходит измельчения зерен в металлах до наноразмерных величин?
2. Какова должна быть схема н/д состояния для получения больших пластических деформаций?
3. Какие факторы влияет на величину критических деформации?
4. Как определить величину интенсивности деформации при осадке в условиях плоской деформации?
5. Как направлены силы трения на контакте заготовки и инструмента?



## Список использованных источников

1. Valiev R.Z., Estrin V., Horita Z и др. Producing bulk ultrafine – grained materials by severe plastic deformation // IOM 2006. 58, №4. P.33
2. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. – М.: Лотос, 2000. 272С.
3. Zehetbaner M., Adv/ Eng Mater/ 5 (SPD), 2003
4. Валиев Р.З., Корзников А.В., Мулюков Р.Р. // Структура и свойства металлических материалов с субмелкокристаллической структурой. М.М. 1992. Т2. №6. С.70.
5. Овчинников А.Г. Физико-технологическая механика. – М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана. 1980.-68с.
6. Копылов В.И., Чувильдеев В.Н. Предел измельчения зерен при равноканальной угловой деформации // Металлы. 2004. №1. С.22-35
7. Раб Г.И. // Развитие методов интенсивной пластической деформации для получения объемных ультрамелкозернистых материалов. Вестник УГАТУ. 2004. №3. С.67.
8. Латнис В.В., Семенова И.П., Салимгареева Г.Х., Валиев Р.З. // Влияние интенсивной пластической деформации и термомеханической обработки на структуру и свойства титана. МиГОМ, 2005. №11. С.31.
9. Raab J.I/ // Plastic flow at equal channel angular processing in parallel channels. Mater. Sci.Eng. A 2005 410-411. P.230.
10. Сегал В.М., Резников В.И., Копылов В.И. и др. Процессы пластического структурообразования металлов. – Минск: Наука и техника, 1994.-222с.
11. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1986.-688с.