

## Исследование процесса осадки цилиндрической заготовки в программе LS-DYNA

В работе исследован процесс обработки металлов давлением – осадка цилиндрической заготовки. Представлено напряженно-деформированное состояние цилиндрического образца, как в процессе стандартной осадки, так и при различных технологических режимах. Математическое моделирование выполнено с помощью программы LS-DYNA версии 971. Исследование выполнено в научных целях.

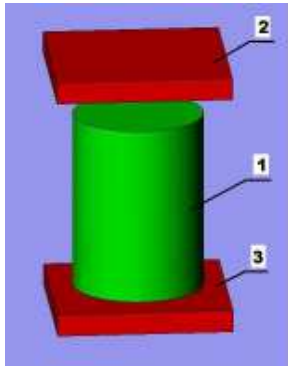


Рис. 1. Твердотельная модель процесса осадки цилиндрической заготовки: 1 – цилиндрическая заготовка, 2 – подвижная плита, 3 – основание

Осадку – процесс обработки металлов давлением, заключающийся в деформации между плоскопараллельными поверхностями цилиндрической или призматической заготовки, при котором уменьшается ее высота и увеличивается поперечное сечение. Напряженно-деформированное состояние в заготовке зависит от коэффициента трения на торцовых контактных поверхностях, а также от размеров заготовки. Силы трения на контактных поверхностях создают в деформируемом теле схему объемно напряженного состояния и влияют на характер распределения деформаций, как в осевом, так и в радиальном направлении.

Цель работы изучить напряженно-деформированное состояние заготовки при осадке, рассмотреть распределение контактных касательных напряжений на торце заготовки, показать влияние силы трения на процесс деформирования, проанализировать различные способы воздействия в процессе осуществления осадки. Математическое моделирование процесса осуществлялось в программе LS-DYNA.

Процесс осадки и твердотельная модель приведена на рис. 1. Цилиндрическая заготовка 1 (диаметр  $d_0 = 60$  мм, высота  $h_0 = 80$  мм) под воздействием плоских плит 2 и 3 будет сдвигаться в осевом направлении (Z) и расширяться в радиальном (X и Y).

Конечно-элементная модель представлена на рис. 2. В результате симметрии в расчет принимали  $1/2$  часть полной модели с соответствующими ограничениями. Материал заготовки – сталь 08кп, тип элемента Solid164, прижимные плоскости заданы твердым (Rigid) типом элемента Shell 163. Перемещение подвижной плиты заданы соответствующими массивами времени

и скорости. Конечно-элементная модель состояла из 9000 объемных элементов и 50 оболочных. Результаты моделирования приведены на рис. 3-6.

Результаты моделирования сравнивали с теоретическими расчетами процесса осадки.

$$1. \text{ Расчет деформаций: } \varepsilon_r = \frac{\Delta h}{2h}; \varepsilon_\theta = \frac{\Delta h}{2h}; \varepsilon_z = -\frac{\Delta h}{h};$$

где  $\Delta h$  – величина осадки по высоте образца,  $h$  – высота после деформации.

Исходные параметры:  $h = 66$ ;  $\Delta h = 14$

Результаты расчета:  $\varepsilon_r = 0.106$ ;  $\varepsilon_\theta = 0.106$ ;  $\varepsilon_z = -0.212$ .

$$2. \text{ Работа сил деформирования при осадке определяется как: } A_D = -\sigma_s \cdot \Delta h \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4};$$

где  $\sigma_s$  – напряжение текучести металла (с учетом упрочнения), МПа,  $d$  – диаметр образца после осадки, мм

$$A_D = 1,2e7 \text{ Дж}$$

3. Полное усилие осадки:

$$P = -\frac{\pi \cdot d^2}{4} \left( \sigma_s + \frac{\tau_k \cdot d}{3 \cdot h} \right);$$

где  $\tau_k$  – касательное напряжение, МПа

$$P = 0,994e6 \text{ Н}$$



Рис. 2. КЭ модель (1/2) цилиндрической заготовки между плоскопараллельными пластинами

Таблица 1. Сравнение результатов моделирования и теории

	Моделирование*	Теория	Различие, %
X-strain	0,1134	0,106	7
Y-strain	0,1134	0,106	7
Z-strain	-0,2366\	-0,212	11,6
Работа сил деформирования, Дж	1,094e7	1,2e7	9,7
Полное усилие осадки, Н	1,14e6	0,994e6	14,6

\*- значение для работы и усилия умножено на коэф. 2 для представления полной модели

Различие между результатами теории и моделирования (таблица 1) в первую очередь связаны с допущениями принятыми в теории осадки (не учитывается появление бочкообразности, неравномерной деформации по сечению образца и др.). Различие результатов между теорией и практикой в пределах (20-25)% в ОМД считается допустимым.

Характерно появления зон наибольших деформаций в середине образца (рис. 3). На рис. 4 представлены графики изменения величины деформации (по X, Y и Z) в процессе осадки. Характерно увеличение внутренней энергии и результирующей контактной силы в процессе деформирования (рис. 5). Представляет интерес график в, рис. 5 по крайвым элементам графика характерно увеличение (по модулю) осевых деформаций, что не описывается в теории осадки.

На рис. 7 приведены варианты различных воздействий в процессе осадки. Применение мягких прокладок (рис. 7.б) позволяет уменьшить бочкообразность образца в процессе осадки (в нашем случае при  $\epsilon_z = -0.5$  уширение заготовки уменьшилось на 15% по сравнению с первым вариантом). Приложение вращения на верхнюю плиту вызывает перераспределение деформаций по сечению и понижает прикладываемое усилие (в нашем случае при  $\epsilon_z = -0.5$  усилие уменьшилось на 22% по сравнению с первым вариантом).

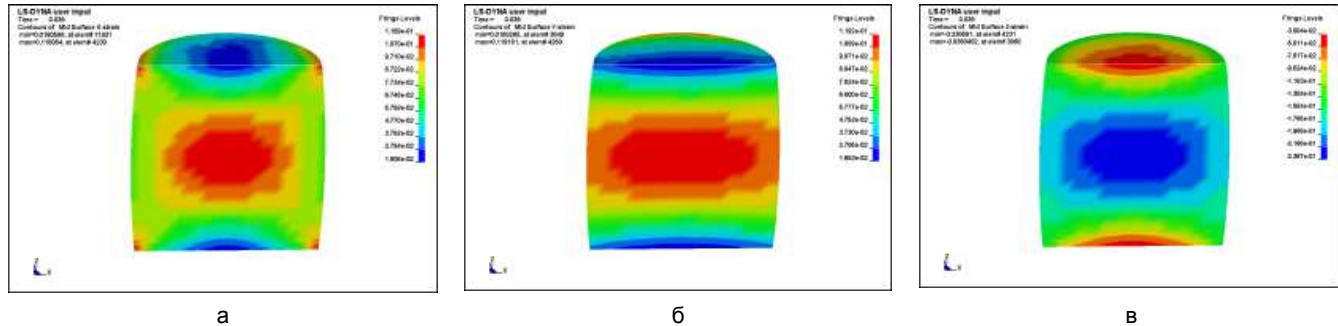


Рис. 3. Распределение деформаций вдоль центральной плоскости образца и по торцам в направлении X (а), Y (б) и Z (в) при  $\Delta h = 14$  ( $t=0.039$ )

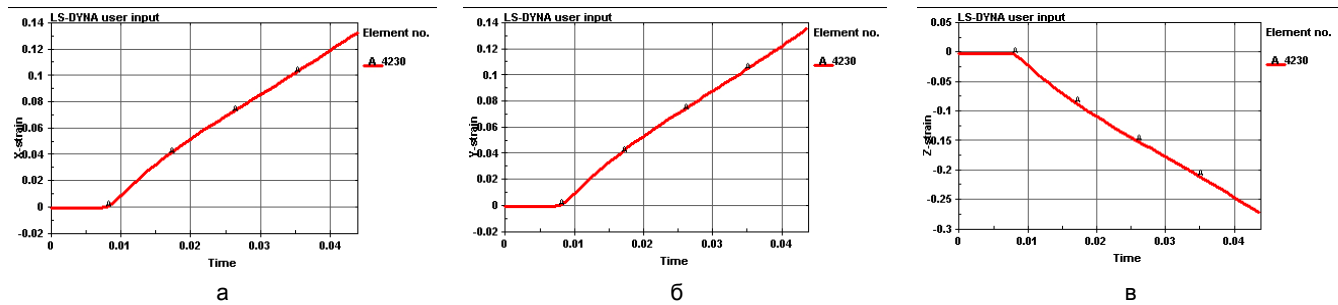


Рис. 4. Графики изменения величины деформации в процессе деформирования от  $\Delta h = 0$  до  $\Delta h = 15$  для элемента (E-4230) по направлениям X (а), Y (б) и Z (в)

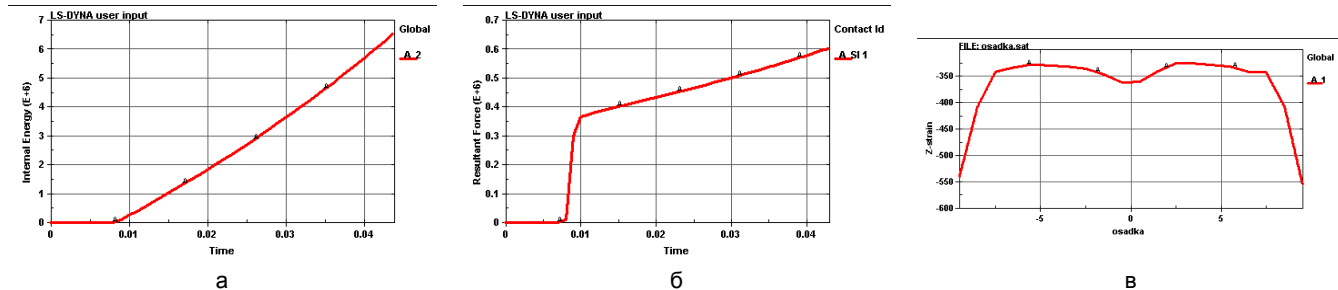


Рис. 5. Графики изменения величины внутренней энергии (а), результирующих контактных сил (б) и осевых деформаций вдоль оси X по торцу образца

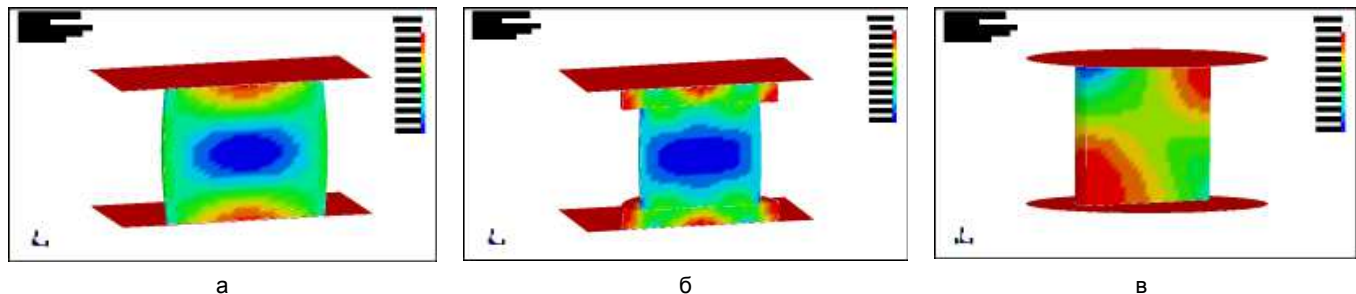


Рис. 6. Распределение осевой деформации (по оси Z) при различных способах воздействий при осадке: а – стандартная осадка, б – осадка с использованием мягких проставок, в – осадка с вращением верхней подвижной плиты