

УДК 621.7.044

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИМПУЛЬСНОЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ШТАМПОВКИ

*А.Г. Нарыжный, В.Н. Сапрыкин, канд. техн. наук*

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

Рассмотрены особенности механических процессов в элементах технологической системы импульсной гидродинамической штамповки, полученные при численном решении соответствующей динамической контактной задачи механики деформируемых твердых тел.

\*\*\*

Розглянуто особливості механічних процесів в елементах технологічної системи імпульсного гідродинамічного штампування, які отримані при числовому вирішенні відповідної динамічної контактної задачі механіки деформівних твердих тіл.

\*\*\*

Particularities of mechanical processes is considered in elements technological system for pulsed hydrodynamical stampings, got under numerical decision corresponding to dynamic contact problem of deformable bodies mechanic.

Импульсные методы обработки металлов, применяемые в производстве изделий аэрокосмической техники, имеют как свои достоинства (штампование габаритных деталей из труднодеформируемых материалов, упрощенная техоснастка и др.), так и недостатки, главным из которых является высокий уровень действующих на конструкцию технологического оборудования динамических нагрузок [1]. По своей природе эти нагрузки являются реактивными внутрисистемными и могут исследоваться только в составе конкретной технологической системы.

При теоретическом анализе механических процессов в технологической системе импульсной штамповки принято по отдельности рассматривать процессы раздачи заготовки и деформирования матрицы [2]. Методика прочностного проектировочного и поверочного расчетов матриц основана на модели плоского осесимметричного деформированного состояния [3,4].

Цель настоящей работы – моделирование и анализ технологического процесса как единого и непрерывного, включающего в себя процесс свободной раздачи заготовки в технологическом зазоре, затем первое соударение и дальнейшее совместное

движение заготовки и матрицы на основе использования осесимметричной модели, решаемой по методу Уилкинса [5]. По результатам решения нестационарной задачи прогнозируют окончательное асимптотическое состояние системы.

Модель технологической системы показана на

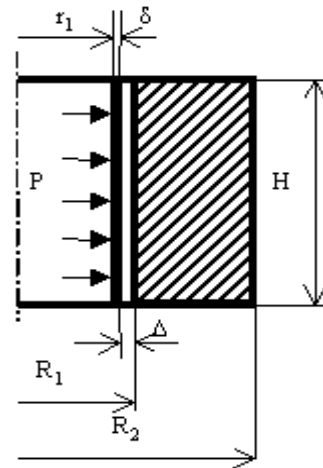


Рис. 1. Модель технологической системы

рис. 1.

Цилиндрическая тонкостенная заготовка с внутренним радиусом  $r_1=25$  мм, толщиной  $\delta = 1$  мм и высотой  $H=100$  мм нагружена изнутри импульсным давлением жидкости вида [2]

$$P(t) = \begin{cases} p_0 \sin \lambda t, & 0 \leq t \leq \pi / \lambda, \\ 0, & t > \pi / \lambda, \end{cases} \quad (1)$$

где  $p_0 = 1.38 \times 10^8$  Па - расчетная амплитуда давления в жидкости, наполняющей заготовку, при ударе снаряда,  $\lambda = 5.4 \times 10^3$  с<sup>-1</sup> - расчетная постоянная времени. Матрица представляет собой полый цилиндр высотой  $H$  с внутренним и наружным радиусами  $R_1=27$  мм и  $R_2=52$  мм, соответственно. Между заготовкой и матрицей установлен технологический радиальный зазор  $\Delta = 1$  мм. Заготовка и матрица закреплены от осевых перемещений.

Заготовка изготовлена из алюминиевого сплава, деформирующегося по упругопластическому типу, с плотностью  $\rho = 2700$  кг/м<sup>3</sup>, модулем упругости  $E = 7 \times 10^{10}$  Па, коэффициентом Пуассона  $\nu = 0.33$  и предельной кривой

$$\sigma = 3 \times 10^8 \times \varepsilon^{0.145}, \quad (2)$$

где  $\sigma$  - интенсивность напряжений,  $\varepsilon$  - интенсивность деформаций.

Матрица стальная, обладает следующими характеристиками-  $\rho = 7850$  кг/м<sup>3</sup>,  $E = 2.1 \times 10^{11}$  Па,  $\nu = 0.3$ . Предельная кривая для стали

$$\sigma = 9.05 \times 10^8 \times \varepsilon^{0.145}. \quad (3)$$

Рассмотрено осесимметричное (ОС) упругопластическое деформирование матрицы и заготовки в симметричной половине системы. Для сравнения решены задачи с учетом упругого ОС деформирования матрицы и упругопластической матрицы в состоянии плоского ОС деформирования. В дальнейшем заготовку рассматривают как тело общего вида (без использования оболочечных моделей и гипотезы прямых нормалей).

При численном решении задач использованы равномерные сетки с прямоугольными элементами. Вдоль радиуса в заготовке – четыре слоя элементов, в матрице - 50 слоев. Вдоль осевой или окружной координаты использовано по 50 слоев элементов как в заготовке, так и в матрице. Всего в дискретной модели 2700 элементов, 2856 узлов и 5712 узловых переменных. Временной интервал исследования

механических процессов составляет 0.001 с от начала действия нагрузки. Шаг дискретизации по времени колеблется в пределах  $3.1 \dots 3.3 \times 10^{-8}$  с для обеспечения численной устойчивости процесса решения.

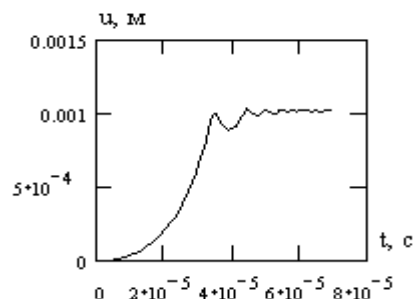


Рис. 2. Изменение зазора между заготовкой и вкладышем

На рис. 2 показан начальный этап движения точки, расположенной в середине контактной поверхности заготовки, включая свободную раздачу в технологическом зазоре и первые восемь колебаний с соударениями. Первое соударение происходит в момент времени  $3.5 \cdot 10^{-5}$  с со скоростью 92.6 м/с. Амплитуды колебаний заготовки быстро затухают. В конце периода расчета наблюдаются упругие односторонние колебания заготовки, модулируемые колебаниями матрицы, как показано на рис. 3 (пунктиром показаны перемещения точки на контактной поверхности матрицы, сплошной линией – перемещения точки заготовки).

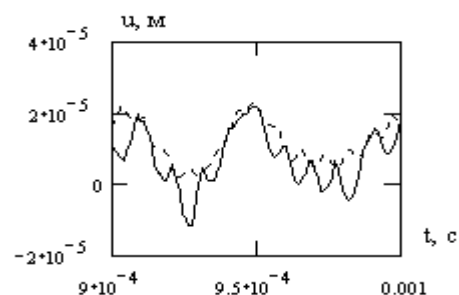


Рис. 3. Изменение зазора между вкладышем и обоймой

По результатам расчета перемещений точек после установления упругих колебаний элементов системы определены математические ожидания средних асимптотических перемещений заготовки и

матрицы, которые равны соответственно  $u_3 = (\Delta + 7.2 \cdot 10^{-6})$  м и  $u_m = 1.2 \cdot 10^{-5}$  м. Другими словами, радиальный размер детали больше номинального размера формующей поверхности матрицы, внутренний размер матрицы увеличивается на указанную величину за один технологический цикл, а между матрицей и заготовкой ожидается зазор величиной  $4 \cdot 10^{-6}$  м. Изменение размера формующей поверхности матрицы связано с возникновением локализованной пластической волны напряжений, возбуждаемой ударом заготовки. Стойкость матриц, определяемую как предельное количество циклов  $N$ , изменяющих внутренний размер на величину допуска  $D$ , можно определить как

$$N = D/u_{\max} \quad (4)$$

Расчеты с использованием упругой модели материала матрицы дают следующие оценки остаточных перемещений заготовки и матрицы от номинального внутреннего размера матрицы:  $6.58 \cdot 10^{-6}$  и  $1.527 \cdot 10^{-8}$  м, соответственно, т.е. ожидаемый размер заготовки всегда меньше номинала, а изменение размера матрицы – в пределах ошибки мантиссы машинного представления реального числа.

В процессе деформирования контактная поверхность заготовки принимает, как показано на рис. 4, сложную непрямолинейную форму. По оси абсцисс отложен номер граничного узла в осевом направлении, по оси ординат – величина перемещений. Сплошной линией показано распределение радиальных перемещений вдоль осевого направления на половине заготовки в момент времени  $3.998 \cdot 10^{-5}$  с на этапе свободной раздачи перед соударением. Видно, что деформация свободного края заготовки опережает деформацию основной части, соответственно выглядит график радиальных скоростей, среднее значение которых составляет 11.7 м/с, а максимальное значение на свободном торце вдвое больше – 22.5 м/с. Свободный торец первым соударяется с поверхностью матрицы, причем амплитуда контактного давления выше за счет более высокой

скорости, в результате чего возникает неоднородное по длине поле контактных давлений и волны изгиба заготовки, распространяющиеся со свободного торца к середине заготовки, как показано на рис. 4 штриховой линией, соответствующей моменту времени после первого соударения  $4.997 \cdot 10^{-5}$  с.

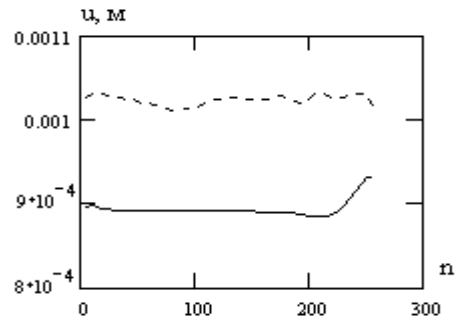


Рис. 4. Форма образующей заготовки

В конце интервала времени расчета изгибные волны "замерзают" и формируется остаточная картина, описывающая дефекты формы контактной поверхности заготовки, достигающие 0.02 мм. Следовательно, НДС заготовки и технологической системы в целом присуща генетическая неоднородность в осевом направлении, поэтому применение одномерных моделей НДС, например, плоского деформированного осесимметричного состояния, должно быть ограничено. На сетке элементов в процессе деформирования, в особенности в зонах контакта с матрицей, наблюдаются значительные искажения, что свидетельствует о невыполнении гипотезы прямых нормалей, лежащей в основе технической теории оболочек.

Многочисленные соударения заготовки с матрицей являются важным фактором НДС и прочности последней. Поле напряжений носит волновой характер. На рис. 5 показана тоновая картина интенсивностей напряжений в элементах системы в момент времени  $3.498 \cdot 10^{-6}$  с (после первого удара заготовки); где обозначены: 1 - невозмущенная зона в матрице, 2 - волна сжатия, имеющая серповидную форму благодаря неодновременному удару (рис. 5), 3 - слабая отраженная от торца волна растяжения, 4

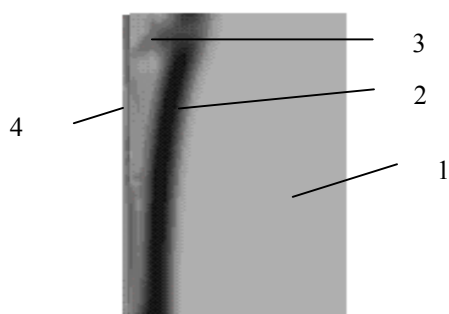


Рис. 5. Волновая картина напряженного состояния системы

- заготовка, видна ее утяжка в осевом направлении. С течением времени волновая картина напряжений быстро деградирует и НДС переходит в режим колебаний. Максимальные значения интенсивностей напряжений в вариантах расчетов с учетом и отсутствием заготовки в осесимметричных моделях равны  $3.903 \cdot 10^8$  и  $3.287 \cdot 10^8$  Па соответственно. При учете заготовки максимальные интенсивности напряжений выше на 18.7 % при зазоре 1 мм и скорости соударения 92.6 м/с, указанная разница растет с ростом скорости соударения. При использовании модели плоского деформированного состояния максимальные интенсивности напряжений равны  $3.272 \cdot 10^8$  Па, следовательно, использование в расчетах НДС матрицы моделей плоского деформированного состояния, а равно неучет заготовки в осесимметричной модели занижают уровень напряжений, что может повлечь за собой ошибки при проектировании матриц на прочность.

Расчет НДС матрицы, деформирующейся по упругому типу, дает величину максимальных значений интенсивностей напряжений от удара заготовки  $6.8449 \cdot 10^8$  Па, превосходящую на 75.4 % таковые значения для упругопластической матрицы. Применение в расчетах упругой модели поведения матрицы приводит к нерациональному использованию прочности материала.

#### Заключение

Радиальные перемещения и скорости заготовки неоднородны вдоль образующей, наряду с радиальными наблюдаются и изгибные колебания. В связи с

такой особенностью деформирования контактное взаимодействие с матрицей и само НДС матрицы также неоднородны в осевом направлении. Изгибные "замерзшие" деформации представляют собой неустраняемый дефект формы заготовки.

Удар заготовки является значительным фактором НДС, прочности и стойкости матриц.

С точки зрения НДС и прочности матриц необходимо применять осесимметричную модель НДС с упругопластическим типом деформирования материала.

#### Литература

1. Кривцов В.С. Концепция создания технологических систем производства деталей летательных аппаратов с использованием импульсных методов обработки: Дис... докт. техн. наук: 05.07.04. – К., 1998. – 312 с.
2. Лепихин П.П. Численное определение напряжений в толстостенных коаксиальных цилиндрах с зазором, заполненным жидкостью // Проектирование и оптимизация элементов, устройств и систем летательных аппаратов с использованием ЭВМ. Харьков, 1977. С. 134-141.
3. ОСТ 1.41177-78. Расчет на прочность матриц для штамповки импульсными нагрузками листовых замкнутых осесимметричных обечаек. НИАТ, 1978.
4. Lepikhin P.P., Romashchenko V.A., Beiner O.S., Demenko V.F., Narizhnyi A.G., Ivashchenko K.B. On applicability of the one-dimensional models for the evaluation of the dynamic strength of axisymmetric solids. // 4-th International Symposium Strength and Fracture of Materials and Structural Members under Impuls Loading. Abstracts. Kiev, 2001. P.108-109.
5. Уилкинс М.Л. Расчет упругопластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике. – М.: Мир, 1967. С. 232-263.

*Поступила в редакцию 18.03.03*

**Рецензент:** д-р техн. наук, профессор Борисевич В.К., Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", г. Харьков; д-р техн. наук, профессор Мовшович А.Я., Харьковский НИИ технологии машиностроения, г. Харьков.