

линейным упрочнением, со следующими характеристиками $\sigma_T = 1.2 \cdot 10^8$ Па, $E = 0.7 \times 10^{11}$ Па, $\nu = 0.33$, $\rho = 2700$ кг/м³ и предельной кривой вида

$$\sigma_i = \begin{cases} E\varepsilon, \sigma_i < \sigma_T, \\ 3 \cdot 10^8 \cdot \varepsilon^{0.145}, \sigma_i \geq \sigma_T \end{cases} \quad (2)$$

Заготовка нагружена изнутри импульсным давлением жидкости вида

$$P(t) = \begin{cases} p_0 \sin \lambda t, 0 \leq t \leq \pi/\lambda, \\ 0, t > \pi/\lambda, \end{cases} \quad (3)$$

где $p_0 = 1.492 \times 10^8$ Па - расчетная амплитуда давления в жидкости, наполняющей заготовку, при ударе снаряда;

$\lambda = 9.28 \times 10^3$ с⁻¹ - расчетная постоянная времени.

Заготовка претерпевает большие пластические деформации, особенно при формировании кольцевого рифта, поэтому для заготовки использована модель НДС объемного тела (не оболочки) с учетом конечных деформаций, так же как и для матрицы. Между поверхностями заготовки и матрицы, а также частями матрицы предполагаются условия неклассического контакта, допускающие трение и непрерывность нормальной компоненты тензора напряжений при контакте и совместном движении либо раздельное независимое движение и нулевые граничные напряжения при отсутствии контакта. Ниже рассмотрены два варианта взаимодействия заготовки и матрицы - без трения и с трением (коэффициент трения равен 0.4) с длительностью 0.0001 с каждый. Силы сжатия половин матрицы образуют поле начальных напряжений, на фоне которого в дальнейшем развивается динамическое волновое НДС. С учетом формы, материальных свойств, нагружения, закрепления и связей элементов технологической системы НДС модели обладает осевой симметрией и симметрией относительно плоскости технологического разреза, что позволяет упростить процедуру решения задачи определения НДС и уменьшить область определения функций НДС. В дальнейшем задачи решаются в осесимметричной постановке для половины области, показанной на рис. 1 с дополнительными условиями на линии

материальной симметрии. Для заготовки это условие скольжения, а для половины матрицы - условие симметричного контакта с жесткой стенкой.

В целом задача существенно физически (ввиду упругопластического характера деформирования и неклассического контакта элементов) и геометрически (ввиду конечности перемещений и деформаций) нелинейна, поэтому она не может быть решена аналитически. Процедура численного решения задач описана ранее [3].

На рис. 2 на фоне фрагментов заготовки (слева) и матрицы (справа), изображенных в начальный момент времени, показаны траектории точек А - З, лежащих на внешней (контактной) поверхности заготовки и определенных без учета трения между заготовкой и матрицей.

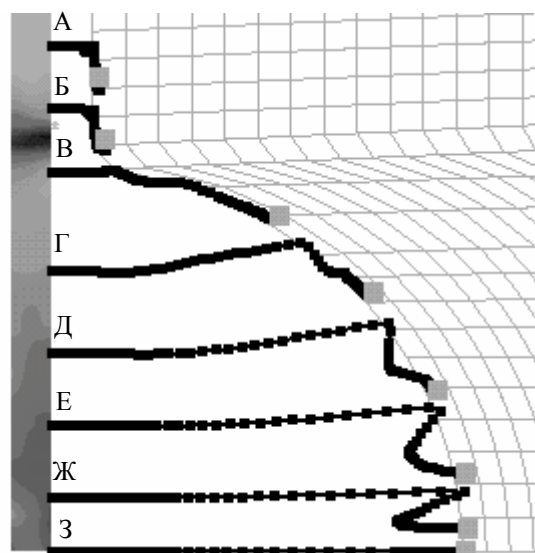


Рис. 2. Траектории движения точек заготовки при отсутствии трения

На каждой траектории можно сначала выделить участок свободного деформирования до первого соударения с матрицей, а затем участок ударно-колебательного движения. Серый квадрат - маркер, показывающий положение точки в конце периода расчета. Точки А, Б имеют практически одинаковые траектории. На первом участке движение происходит вдоль радиуса, а на втором - вдоль оси, что говорит о течении материала заготовки в сторону ребра матрицы. Траектории точек Г - Ж имеют искривленную форму на участке свободного движения, что связано с изгибом заготовки на ребре матрицы. Точка З, лежащая в

плоскости механической симметрии, имеет прямолинейную траекторию, направленную вдоль радиуса.

Заметное различие имеют вторые участки траекторий точек В - З после соударения с матрицей. На траекториях точек в порядке сверху вниз все более отчетливо виден отскок заготовки от поверхности матрицы, достигающий величины 1.8 мм для точки З.

На траектории точки В, попадающей на ребро матрицы, практически отсутствует отскок, зато движение вдоль образующей матрицы, напротив, наиболее выражено и соответствующее перемещение равно 3.6 мм. Неудивительно, что величина деформации в районе между точками Б и В достигает максимальной величины - 2.32 единицы. Разумеется, такое большое значение деформации является следствием принятой модели материала и непредусмотренного в ней разрушения заготовки при больших деформациях.

На рис. 3 показан фрагмент сеточной конфигурации системы в конечный расчетный момент времени. Между точками Б и В видно утонение заготовки вследствие интенсивного течения материала заготовки вдоль образующей матрицы. Между точками Е и З, напротив, наблюдаются накопление материала и утолщение заготовки, в результате которого жесткость заготовки на изгиб возрастает и между заготовкой и матрицей образуется зазор. Такие значительные изменения толщины заготовки являются дефектами детали. Участок заготовки между точками В и Г скользит по поверхности матрицы целиком, практи-

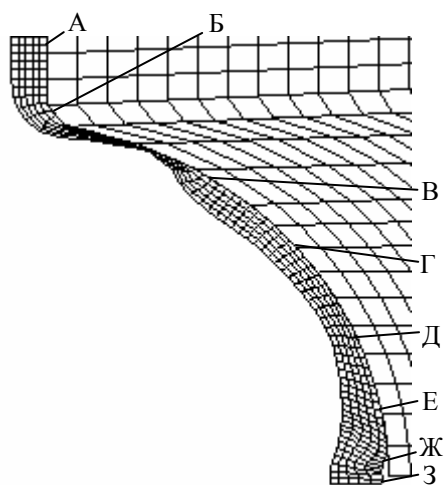


Рис. 3. Конфигурация элементов в системе без трения в момент времени 0.0001 с

чески не меняя толщины.

На этом же рисунке видно, что несмотря на действие сжимающих сил половина матрицы как целое перемещается вверх, в результате чего происходит раскрытие стыка между половинами матрицы. Такое изменение положения матрицы приводит к изменению формы детали по сравнению с теоретической.

На рис. 4 и 5 представлены результаты расчета деформирования заготовки и матрицы с учетом сил контактного трения с коэффициентом трения 0.4.

На траекториях точек (рис. 4), как и при отсутствии трения, виден отскок заготовки от поверхности матрицы, достигающий величины 1.8 мм для самой нижней точки З. Заметное отличие по сравнению с вариантом расчета без трения имеют вторые участки траекторий точек В - З после соударения с матрицей.

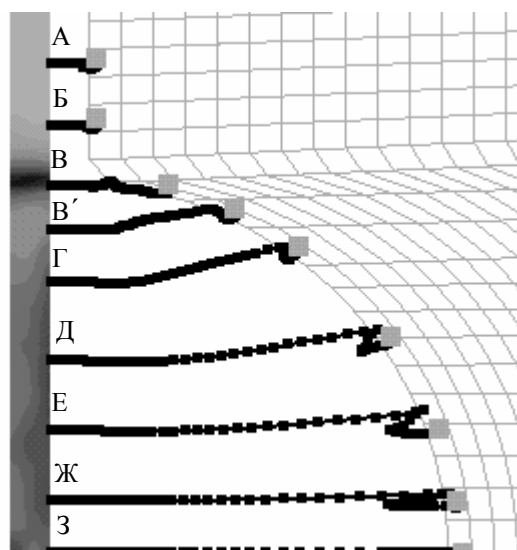


Рис. 4. Траектории движения точек заготовки при коэффициенте трения, равном 0.4

На траектории точки В, попадающей на ребро матрицы, практически отсутствует отскок, одновременно движение вдоль образующей матрицы наиболее выражено и соответствующее перемещение равно 1.2 мм (что значительно меньше, чем при отсутствии трения). Величина деформации в районе точки В достигает максимальной величины - 1.72 единицы. На рис. 5 видно утонение заготовки вблизи точки В. Видно также, что течение материала заготовки вдоль образующей матрицы имеет локальный характер, в рядом расположенных точках Б и В' скольжение зна-

чительно меньше. Для ниже расположенных точек Г - З движение вдоль образующей затухает вплоть до его отсутствия в точке З. Величины перемещений точек заготовки вниз вдоль образующей матрицы заметно меньше, чем при отсутствии трения, причем в рассматриваемом случае траектории точек А - Ж в конце повернуты вверх, что говорит об общем движении материала заготовки в сторону свободных торцов из середины в конце технологического акта.

На рис. 5 показан фрагмент сеточной конфигурации системы в конечный расчетный момент времени для системы с трением. В общем повторяются особенности, отмеченные для рис. 3, хотя изменение толщины менее выражено, чем в системе без трения, кроме того заготовка прилегает к матрице без зазора.

На поле заготовки (рис. 2 и 4) показана тоновая картина пластических деформаций в конечный момент времени, плотность серого света пропорциональна величине деформации. Полю остаточных пластических деформаций заготовки присуща сильная неоднородность. Вблизи точки В деформации изменяются в осевом направлении, достигая максимальных значений 2.32 и 1.72, соответственно, в темной зоне напротив ребра матрицы. Ниже точки Г пластические деформации изменяются по толщине заготовки, увеличиваясь в направлении изнутри к наружу.

Полученные максимальные значения деформаций имеют недостижимый для реальных материалов уровень, что, по-видимому, связано с несовершенством ме-

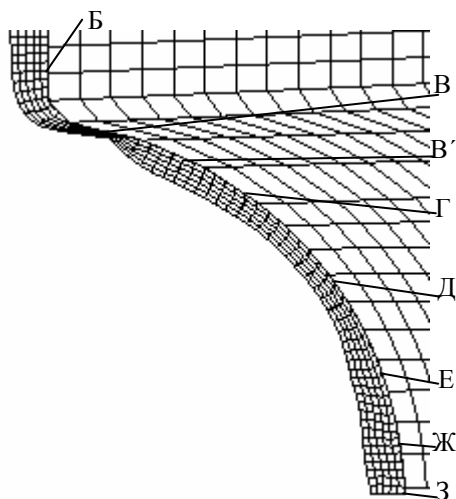


Рис. 5. Конфигурация элементов в системе с трением ($\kappa_{\text{тр}}=0.4$) в момент времени 0.0001 с

ханико-математической модели технологической системы. В частности, расчетные значения скоростей точек заготовки в районе точки З достигают шестисот с лишним метров за секунду. При таких скоростях следует учитывать скоростное упрочнение материала заготовки.

Трение оказывает положительное влияние на качество штампуемой детали. Во-первых, трение препятствует утонению в зоне ребра матрицы, во-вторых, трение препятствует накоплению материала в районе точки З, в-третьих, трение препятствует образованию зазора между заготовкой и матрицей в районе точки З.

Практически на всем протяжении рифта (рис. 3 и 5) наблюдается сильное искажение сетки в заготовке, которое показывает невыполнение гипотезы прямых нормалей и неприменимость соответствующих оболочечных теорий для моделирования подобных технологических систем.

Удар заготовки приводит к раскрытию стыка половин матрицы, что ухудшает качество детали.

Литература

1. Нарьжний А.Г. Особенности НДС и прочности осесимметричных матриц для импульсной штамповки // Проблемы математического моделирования современных технологий (ПММ-2002): Міжнар. наук.-техн. конф.– Хмельницький, 2002.- С. 96.
2. ОСТ 1.52766-86. Матрицы для штамповки импульсными нагрузками листовых полусферических оболочек и замкнутых осесимметричных обечаек. Расчет на прочность.– М.: НИИД, 1986.– 48 с.
3. Моделирование напряженно-деформированного состояния матриц для импульсного формообразования осесимметричных тонкостенных деталей / В.С. Кривцов, П.П. Лепихин, В.Ф. Деменко, А.Г. Нарьжний // Авиационно-космическая техника и технология: Сб. науч. тр.– Харьков: ХАИ, 2002.- Вып. 32.- С. 8-19.

Поступила в редакцию 22.05.03

Рецензенты: д-р техн. наук, профессор М.Е. Тараненко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков; д-р техн. наук, профессор В.В. Буланов, ХНАДУ, г. Харьков.