

УДК 539.373

А.Г. НАРЫЖНЫЙ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ПРЯМОЙ АНАЛИЗ НАКОПЛЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ТОЛСТОСТЕННОГО ЦИЛИНДРА ПРИ УДАРАХ ТОНКОСТЕННЫХ ОБОЛОЧЕК

С использованием компьютерного моделирования изучены закономерности изменений остаточных пластических деформаций, остаточных напряжений, размера внутренней поверхности толстостенного цилиндра конечной длины, вызванных циклическим ударно-контактным взаимодействием с последовательным рядом оболочек.

перемещения остаточные, деформации пластические, напряжения остаточные, удар оболочек

Введение

Ранее вопрос о накоплении пластических изменений в толстостенном цилиндре теоретически рассмотрен в связи с относительно малым количеством осесимметричных тонкостенных оболочек, ударяющих изнутри по поверхности цилиндра [1]. Показано, что радиальный размер контактной поверхности цилиндра монотонно растет с увеличением числа оболочек, следовательно, растет и первоначальный зазор между поверхностью цилиндра и очередной оболочкой.

С помощью аппроксимации и экстраполяции найденные закономерности развития перемещений распространены за пределы исследованного диапазона.

Использование экстраполяции неявно предполагает сохранение основных условий образования пластических деформаций, наблюдаемых при начальных циклах взаимодействия элементов системы, прежде всего постоянство скорости соударения оболочек и цилиндра. Правомерность и границы применимости экстраполяции не были изучены.

В работе [2] показано, что с ростом величины первоначального зазора между оболочкой и цилиндром контактные напряжения и интенсивности напряжений монотонно растут, что должно расширять область и интенсивность пластических деформаций цилиндра и, следовательно, остаточных перемеще-

ний границы, и, в свою очередь должно приводить к увеличению зазора для следующей оболочки.

1. Формулирование задачи

В настоящей работе вопрос об остаточном НДС цилиндра с учетом цепной зависимости величины зазора и интенсивности пластических изменений анализируется с использованием описанной в [1] осесимметричной модели механической системы, включающей цилиндр и 90 оболочек, по очереди взаимодействующих с цилиндром, что позволяет, с одной стороны, выявить особенности накопления пластических изменений цилиндра, с другой – показать границы применимости предложенного ранее экстраполяционного подхода анализа остаточных перемещений контактной поверхности цилиндра.

Схема механической системы показана на рис. 1. В рассматриваемой на рис. 1 системе тонкостенная оболочка с внутренним радиусом $r_1 = 68$ мм, толщиной $\delta = 1$ мм и высотой $H = 80$ мм нагружается изнутри импульсным давлением, характерным для гидродинамической штамповки

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

где t – время; $p_0 = 1,492 \times 10^8$ Па – расчетная амплитуда давления; $\lambda = 9,28 \times 10^3$ 1/с – расчетная постоянная времени; K – амплитудный множитель, принимающий значения 0,95; 1,00; 1,05.

На рисунке показан цилиндр высотой H , с внутренним и наружным радиусами $R_1 = 70$ мм и $R_2 = 102,2$ мм, соответственно. Между оболочкой и цилиндром установлен первоначальный радиальный зазор $\Delta = 1$ мм.

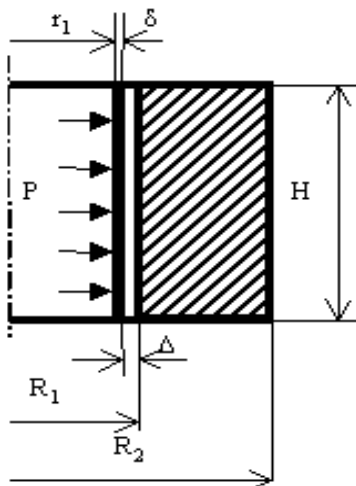


Рис. 1. Схема механической системы

Оболочки изготовлены из алюминиевого сплава, деформирующегося по упруго-идеальнопластическому типу, с плотностью $\rho = 2700$ кг/м³, модулем Юнга $E = 7 \times 10^{10}$ Па, коэффициентом Пуассона $\nu = 0,33$ и пределом текучести $\sigma_T = 1,19 \times 10^8$ Па. Цилиндр стальной, деформирующийся по упруго-идеальнопластическому типу, обладает следующими характеристиками: $\rho = 7850$ кг/м³; $E = 2,1 \times 10^{11}$ Па; $\nu = 0,27$; $\sigma_T = 7,984 \times 10^8$ Па.

2. Результаты решения и анализ

Ниже на рисунках показаны распределения НДС для симметричной половины области цилиндра (рис. 1). На рис. 2 показано распространение зоны остаточных пластических деформаций в цилиндре в зависимости от количества циклов (невозмущенная зона показана светлым тоном). Зона возмущения образуется уже при первом цикле и затем монотонно расширяется. Наряду со сплошной зоной деформаций в невозмущенной зоне образуются *очаги* остаточной деформации, обусловленные интерференцией волн напряжений, которые в дальнейшем сливаются со сплошной зоной пластичности. В конце

периода наблюдения пластическая деформация охватывает практически всю область, и остаются лишь островки, не захваченные пластичностью.

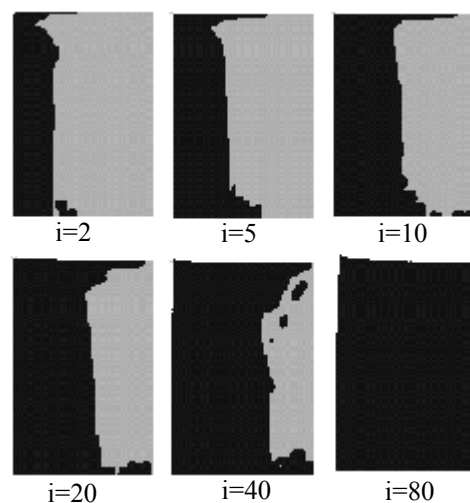


Рис. 2. Распространение остаточных пластических деформаций в цилиндре при $K = 1$

На рис. 3 показано распространение границы сплошной возмущенной области вдоль радиуса при осевой координате $z = 20$ мм в зависимости от количества циклов при трех уровнях нагрузки: $K = 0,95$; $K = 1,0$; $K = 1,05$). Видно, что с ростом нагрузки пластическая область в цилиндре расширяется быстрее.

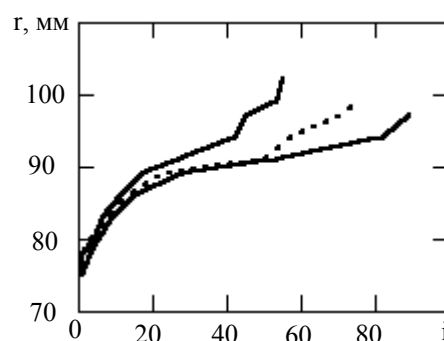


Рис. 3. Зависимость положения границы сплошной области возмущения

На рис. 4 показано развитие поля интенсивностей остаточных напряжений в связи с ростом количества циклов. Плотность тона соответствует величине интенсивности, максимальное значение интенсивности при $i = 90$ равно $4,9 \times 10^8$ Па, что более половины значения предела текучести и более 60%

уровня допускаемых напряжений. Видно, что значения интенсивности растут, причем не только со стороны контактной поверхности, но и со стороны наружной поверхности цилиндра, так что наименее напряженной оказывается средняя по толщине часть цилиндра.

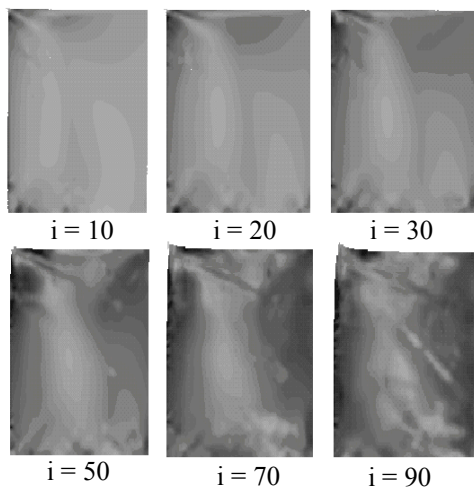


Рис. 4. Зависимость распределения интенсивностей остаточных напряжений от количества циклов

Следует отметить возрастающую с увеличением количества действовавших оболочек неоднородность поля интенсивностей остаточных напряжений.

Рост интенсивностей остаточных напряжений позволяет предположить возможность разрушения цилиндра вследствие суммирования остаточных и вызванных ударом очередной оболочки напряжений.

Поля остаточных пластических деформаций и остаточных напряжений (рис. 2, 4 соответственно) показаны на деформированных областях. Видно, что остаточные перемещения при большом количестве циклов существенно изменяют размеры и форму цилиндра, особенно вблизи свободного торца, где действие оболочек особенно сильно.

На рис. 5 показана зависимость остаточных радиальных перемещений контактной поверхности цилиндра от осевой координаты после 90 циклов при различных амплитудах давления (кривая 1 – $K = 0,95$; 2 – $K = 1,0$; 3 – $K = 1,05$). Максимальные

значения перемещений справа соответствуют зоне удара свободного торца заготовки с наибольшими скоростями удара, где наблюдаются и максимальные приращения перемещений за один цикл [2]. Величины перемещений нелинейно растут вместе с ростом амплитуды и импульса давления.

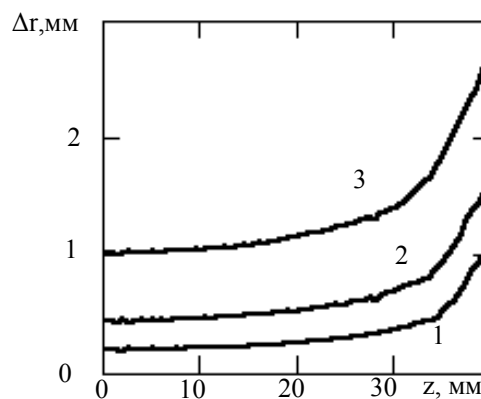


Рис. 5. Зависимость остаточных радиальных перемещений контактной поверхности цилиндра от осевой координаты

На рис. 6 показаны зависимости радиальных остаточных перемещений различных точек контактной поверхности цилиндра от количества циклов взаимодействия с оболочками.

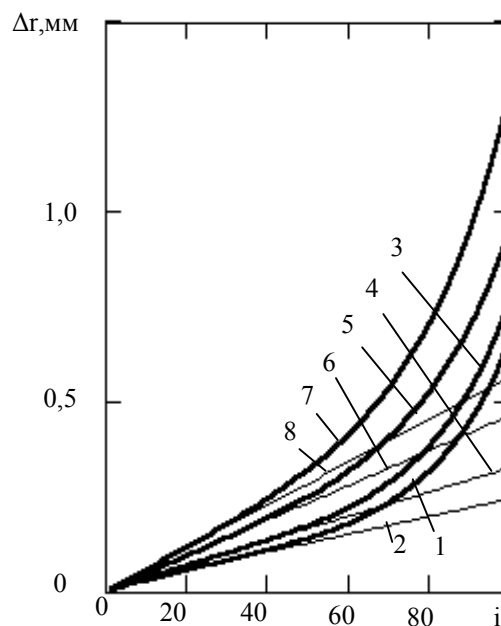


Рис. 6. Зависимости изменения перемещений от количества циклов по интерполяционным и экстраполяционным выражениям

Кривые 1, 3, 5 и 7 построены по результатам прямого расчета для точек с координатами 5, 20, 30 и 35 мм соответственно. Кривые 2, 4, 6 и 8 построены для тех же точек по экстраполяционным формулам [1]. Видно, что вначале (до $i = I = 30 - 50$ циклов) кривые, построенные по экстраполяционным формулам, совпадают с кривыми, построенными по результатам прямого расчета. При дальнейшем увеличении количества циклов кривые 1, 3, 5 и 7 интенсивно растут в сравнении с 2, 4, 6 и 8, отношение максимальных значений прямого расчета и экстраполяционных значений при $i = 100$ лежит в диапазоне 2,1 – 2,8. С учетом отмеченных в [1] особенностей на кривых 1, 3, 5 и 7 можно выделить три участка. Начальный (первый) участок ($i \leq 6$), характеризуется *уменьшением* приращения перемещений за один цикл. Второй участок стационарного роста ($6 < i < I$), характеризуется *постоянством* приращения перемещений за один цикл. К анализу перемещений на этом участке вполне применим экстраполяционный подход. Третий участок интенсивного роста перемещений ($i \geq I$), характеризуется *прогрессирующим* ростом не только перемещений, но и приращений перемещений за один цикл.

Кривые изменения перемещений, определенных прямым расчетом, хорошо аппроксимируются выражением вида

$$\Delta r(z, i) = P1(z) + \frac{P2(z)}{i - P3(z)} + P4(z) \times i^2, \quad (2)$$

где i – номер цикла взаимодействия, $P1, P2, P3, P4$ – параметрические функции осевой координаты z , определяемые по методу наименьших квадратов.

Предложенные аппроксимации могут быть использованы определения предельного (по допуску на изменение размера контактной поверхности) количества циклов взаимодействия подобно [3].

Заключение

Рассмотренные результаты позволяют сделать выводы:

– с ростом количества циклов растут величины интенсивностей остаточных напряжений, величины накопленных пластических деформаций, а также остаточные перемещения контактной поверхности цилиндра;

– рост величин интенсивностей остаточных напряжений может быть условием потери общей прочности при большом количестве циклов взаимодействия; целесообразно провести специальное изучение возможности, условий и характера такого разрушения;

– использование экстраполяционных формул [1] для определения и анализа остаточных перемещений контактной поверхности цилиндра возможно и обеспечивает высокую точность на участке стационарного роста перемещений;

– при большом числе циклов взаимодействия цилиндра и оболочек рост остаточных перемещений контактной поверхности имеет прогрессирующий характер.

Литература

1. Нарыжный А.Г. Накопление перемещений в толстостенном цилиндре, обусловленное ударами оболочек // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2004. – Вып. 3 (11). – С. 33 – 37.
2. Нарыжный А.Г. Напряженно-деформированное состояние технологической системы импульсной гидродинамической штамповки осесимметричных деталей // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением*. – 2004. – № 8. – С. 10 – 18.
3. Нарыжный А.Г., Сапрыкин В.Н. Прогноз формы и размеров детали при импульсной штамповке // *Вісник двигунобудування*. – 2004. – № 2. – С. 223 – 227.

Поступила в редакцию 6.12.2004

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Я. Мовшович, Харьковский НИИ технологии машиностроения, Харьков.