

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОБИВКИ ОТВЕРСТИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ ПУАНСОНОМ

*Веремейчик А.И., Онысько С.Р., Хвусевич В.М., Сосновский А.А.*

Брестский государственный технический университет;  
г. Брест, Республика Беларусь

Пробивка отверстий на штампах при серийном и массовом производстве является высокопроизводительным методом [1]. Надёжная, стабильная и долговечная работа штампов напрямую зависит от его рабочих органов: пуансонов и матриц, так как они воспринимают значительные усилия и напряжения. Задача определения прикладываемых усилий и возникающих напряжений при пробивке отверстий пуансонами заслуживает особого внимания. Зная напряжения и деформации можно подобрать оптимальный материал пуансона, а также метод его упрочнения для увеличения срока службы.

Трудности проведения экспериментальных исследований по непосредственному определению причин выхода пуансонов из строя и напряжений при пробивке отверстий в листовом металле пуансонами цилиндрической формы привели к необходимости теоретического исследования напряжённо-деформированного состояния, т.е. разработки модели учитывающей особенности технологического процесса пробивки отверстий.

Решение данной задачи возможно при помощи вычислительного комплекса *ANSYS Workbench*, который позволяет создать геометрическую модель штампа, задать свойства материала рабочих органов, заготовки, смоделировать процесс пробивки отверстия, исследовать напряжённо-деформированное состояние в процессе пробивки, а также изменять характеристики материалов и параметры технологического процесса. В *ANSYS Workbench 2019 R2* для твёрдотельного динамического анализа используется среда *ANSYS Explicit Dynamics*, которая позволяет проводить расчёты быстропротекающих высоконелинейных процессов в постановках Лагранжа и Эйлера и предоставляет возможность решать все основные задачи явной динамики и быстропротекающих процессов. Программа проводит расчёты при помощи решателей *ANSYS Autodyn*, но в отличие от него использует тот же графический пользовательский интерфейс, что и широко распространённый решатель *ANSYS Mechanical* и другие аналитические системы платформы *ANSYS Workbench*. *Explicit Dynamics* является частью лицензии *ANSYS Mechanical Enterprise* [2].

Моделирование проводилось с учётом реальных условий процесса пробивки отверстия в листовом металле цилиндрическим пуансоном на кривошипном прессе марки КД2128. Пробивку производят в штампах, рабочими органами которых являются пуансон и матрица (рисунок 1), между которыми устанавливают определённый зазор  $z$ . Лист или полосу устанавливают на матрицу, а пуансон, опускаясь вместе с верхней частью штампа, внедряется в лист, при этом происходит относительное смещение металла листа в матрицу, которое заканчивается

разрушением металла в зазоре, т. е. пробивкой. Отделенная часть листа проваливается в отверстие матрицы, а отход при ходе пуансона вверх снимается с пуансона съёмником [3].

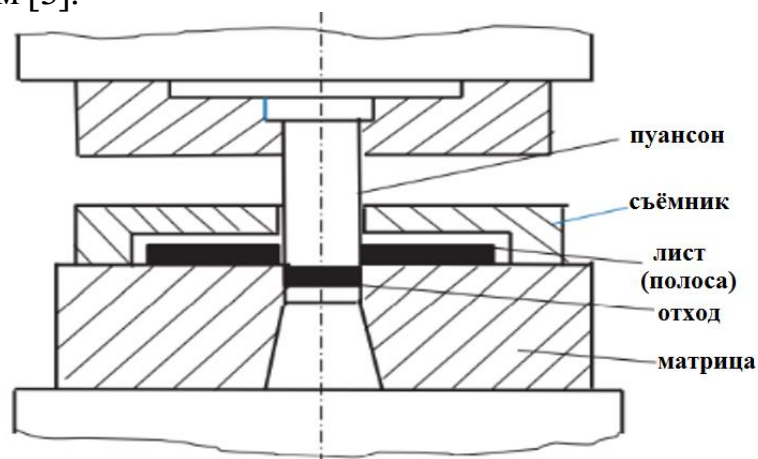


Рисунок 1 – Штамп для пробивки

Схема используемого пуансона представлена на рисунке 2.

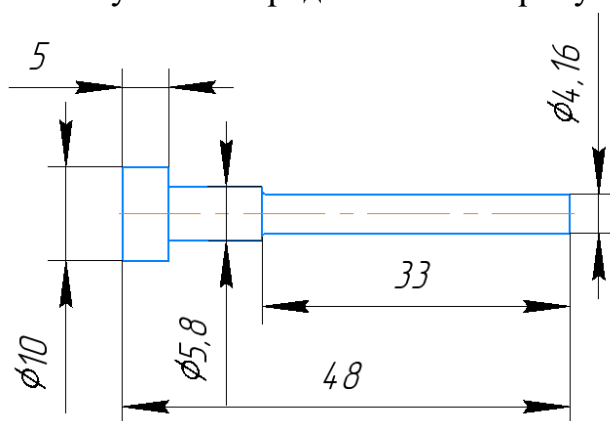


Рисунок 2 – Схема цилиндрического пуансона

На основании технологического процесса пробивки отверстий в разделе «Geometry» вычислительного комплекса ANSYS создаём геометрическую модель штампа (рисунок 3а). Зазор между пуансоном и матрицей варьировался в пределах 5–1 % от толщины пробиваемого металла на сторону. При моделировании толщина листа принималась равной  $t = 4$  мм, материал – сталь 20 ГОСТ 1050-88. Материал пуансона – сталь X12МФ ГОСТ 5950-2000, твёрдость 57–60 HRC.

Одной из причин выхода из строя пуансонов является потеря ими продольной устойчивости, вследствие чего создается опасность потери их прямолинейной формы. Пуансон можно рассматривать как стержень, имеющий закрепленный конец и подвергающийся осевому сжатию. Как известно, такое напряженное состояние представляет продольный изгиб. При определенном значении приложенной силы пуансон приобретает состояние неустойчивого равновесия. Эта сила является критической. Если сжимающая сила больше критической (при значениях  $(0,5-0,6) < d$ ), то пуансон изгибается и получает необратимую деформацию в наиболее опасном сечении. На практике при ориентации пуансона на поверхности изделия имеет место его перекося, к тому же сжимающая сила действует, как правило, не строго по оси. Вследствие этого пуансон может иметь

некоторое начальное продольное искривление оси. Таким образом, в действительности пуансон находится в сложном напряженном состоянии, подвергаясь одновременно сжатию и изгибу.

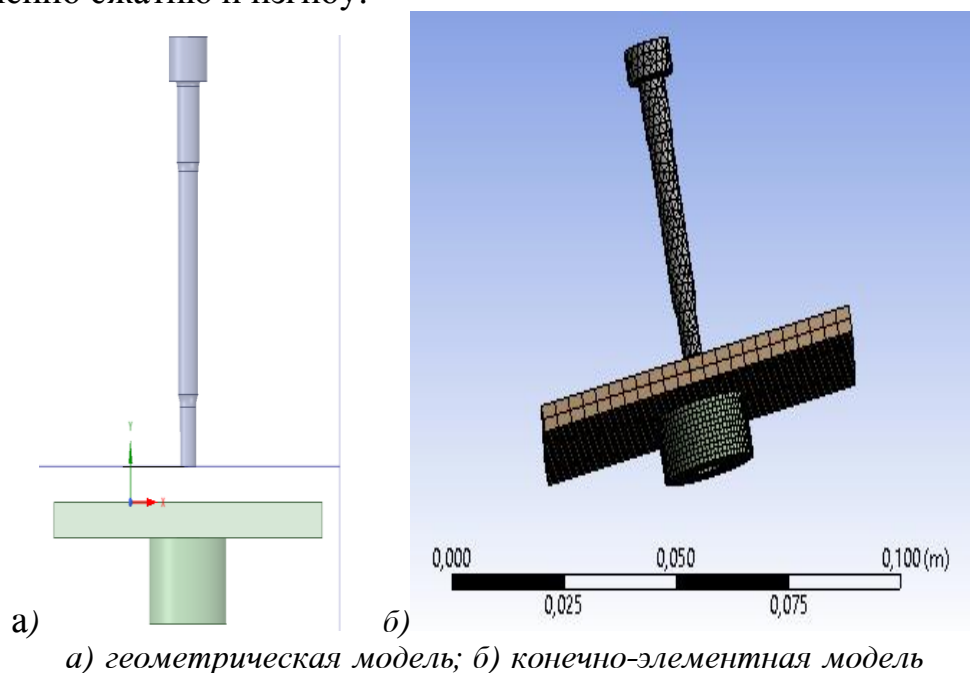


Рисунок 3 – Расчётная модель штампа

В разделе «*Model*» на основе геометрической модели штампа создаём её конечно-элементную модель, которую закрепляем по нижней цилиндрической части матрицы (рисунок 3б).

В разделе «*Engineering Data*» задаём свойства материала пуансона и листа. Скорость движения пуансона задается исходя из размеров пробиваемого отверстия и пуансона, а также времени движения.

В разделах «*Setup*» и «*Solution*» комплекса *ANSYS Workbench* запускаем компьютерную модель штампа с заданными параметрами и характеристиками, производим расчёт.

В разделе «*Result*» получаем итог моделирования пробивки отверстий в листовом металле пуансонами цилиндрической формы. С помощью данной модели можно анализировать возникновение и изменение с течением времени в процессе проникновения пуансона в металл компонент перемещений, напряжений и деформаций (рисунки 4–7).

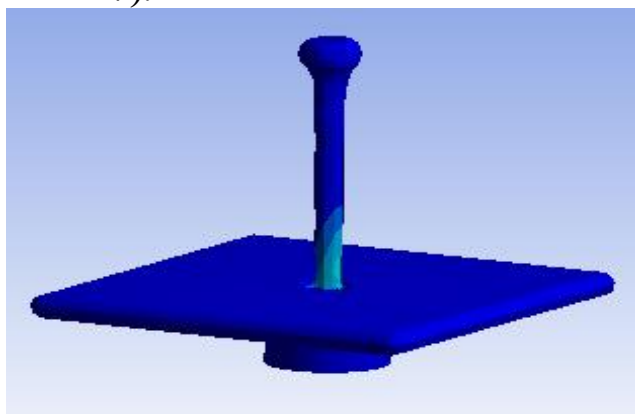


Рисунок 4 – Промежуточное состояние процесса пробивки отверстия

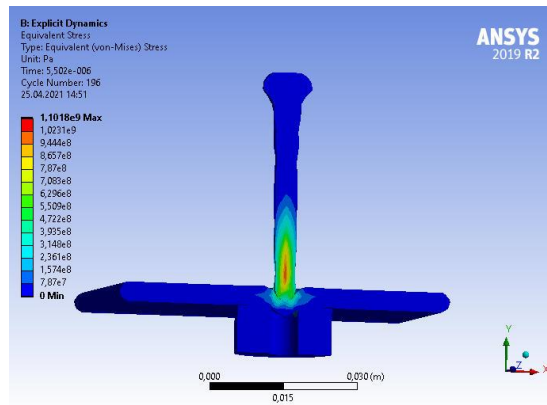
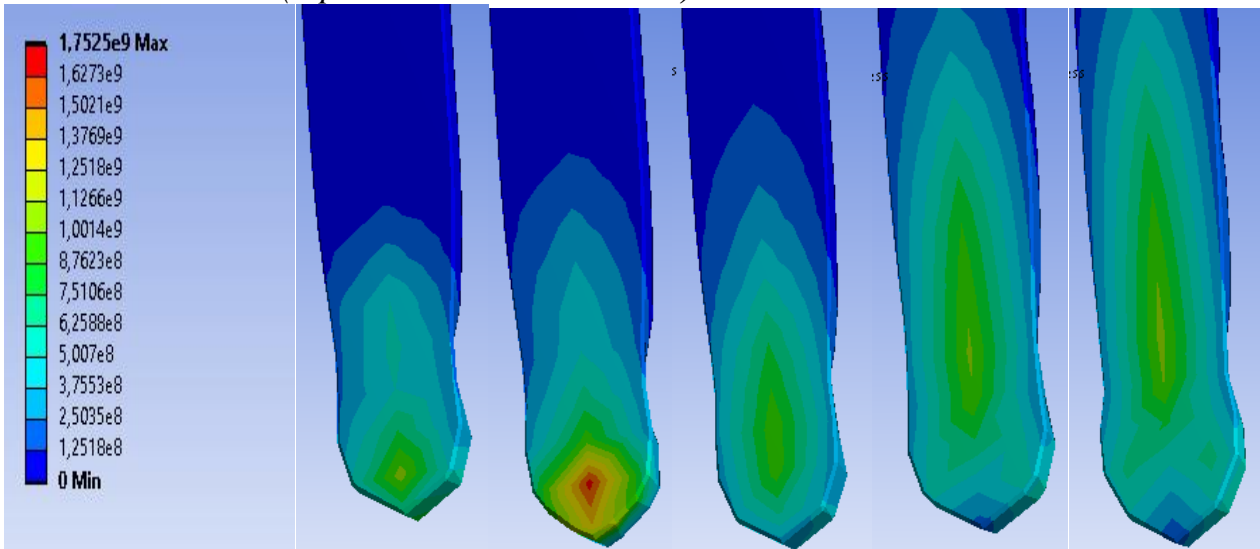


Рисунок 5 – Типичное распределение эквивалентных напряжений по Мизесу (Equivalent von Mises Stress) в сечении системы



$t = 3,16e-04$  c  $t = 3,69e-04$  c  $t = 4,22e-04$  c  $t = 5,27e-04$  c  $t = 6,32e-04$  c  
Рисунок 6 – Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в сечении пуансона в различные моменты времени при  $v = 15$  м/с

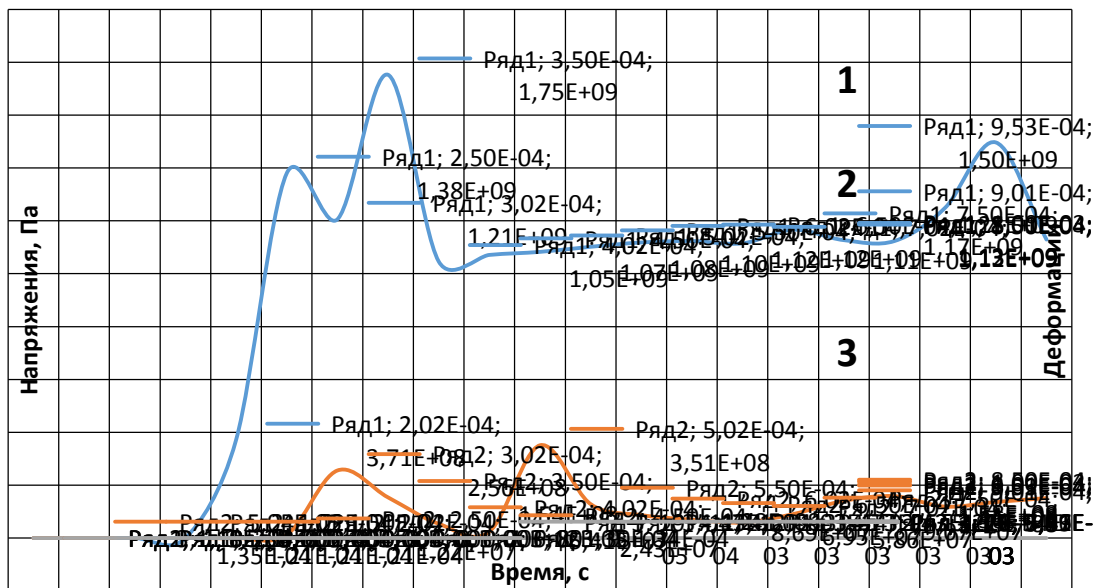


Рисунок 7 – Зависимость суммарных деформаций (Total Deformation) (1), эквивалентных напряжений по Мизесу (2) и нормальных напряжений (Normal Stress) (3) в пуансоне от времени при  $v=15$  м/с

Выполнен расчёт предельно допускаемой нагрузки в зависимости от длины рабочей части пуансона. Установлена предельная длина рабочей части, при которой возможно осуществлять процесс пробивки. Исследовано влияние скорости движения пуансона на возникающие в нём напряжения. Моделирование пробивного пуансона с изменённой формой рабочей части не выявило существенных скачков напряжений по длине инструмента в процессе пробивки, что свидетельствует о том, что изменения в конфигурации пуансона не окажут негативного воздействия на его прочность [4].

Проведённые исследования позволяют оптимизировать форму и размеры рабочей зоны пуансона, зазор между матрицей и пуансоном в зависимости от их материалов и толщины листа.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Металлообработка в современном машиностроении [Электронный ресурс] : Пробивка отверстий. – Режим доступа : <http://metall-work.ru/obr-met/38.html>. – Дата доступа : 29.05.2021.
2. Мухутдинов, А. Р. Основы применения ANSYS Autodyn для решения задач моделирования быстропротекающих процессов: учебное пособие / А. Р. Мухутдинов. – Казань: КНИТУ, 2016. – 244 с. – ISBN 978-5-7882-2115-1.
3. Бурдуковский, В. Г. Технология листовой штамповки : учебное пособие / В. Г. Бурдуковский. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2019.– 224 с.
4. Веремейчик, А. И. Напряженно-деформированное состояние цилиндрического пуансона при пробивке отверстия / А. И. Веремейчик // Перспективные материалы и технологии : материалы международного симпозиума, Минск, 23–27 августа 2021 г. / под ред. чл.-корр. НАН Беларуси В. В. Рубаника. – Минск : Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации. – 2021. – С. 379–381.

УДК 539.3

### **К ОПРЕДЕЛЕНИЮ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОДКРЕПЛЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ, ПОДВЕРЖЕННЫХ ВНЕШНЕМУ ДАВЛЕНИЮ**

*Игнатюк В. И.*

Брестский государственный технический университет,  
г. Брест, Республика Беларусь

Тонкостенные цилиндрические элементы, являющиеся по своей работе оболочками, находят широкое применение в элементах машиностроительных конструкций. Учитывая высокую прочность оболочечных конструкций, несущую способность таких элементов при действии внешнего давления определяет чаще всего их способность сохранять исходную форму, то есть их устойчивость. Повышение устойчивости таких элементов возможно путем их подкрепления ребрами жесткости. При этом следует стремиться к наиболее рациональному варианту подкрепления, отвечающему наименьшему расходу материала элемента.

Подкрепленный цилиндрический элемент рассматривается как ребристая круговая тонкостенная цилиндрическая оболочка, которая представляет собой