

УДК 621.77

С.В. Кузнецов

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ СИЛ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлен способ теоретического определения поперечных сил, возникающих при выполнении технологических операций объемной и листовой штамповки для обработки металлов давлением. Предлагается конструкция измерительного устройства для определения поперечных сил.

Ключевые слова: обработка металлов давлением, поперечные силы, определение сил в технологических операциях обработки давлением.

При выполнении операций обработки металлов давлением на любом из существующих видов оборудования кроме сил, действующих вдоль оси деформирования, отмечено возникновение поперечных (действующих в плоскости разъема штампа и перпендикулярных оси деформирования) сил. Их появление в основном отрицательно сказывается на прессовом оборудовании и штамповой оснастке: отмечается повышенный износ элементов привода и направляющих ползуна, увеличение вероятности поломки элементов пресса и штампа, смещение верхней и нижней частей поковки, ударные нагрузки, шум, вибрации, ухудшение качества и точности изготовления получаемых изделий.

В данной работе поперечные силы в рабочей зоне машины являются основным объектом исследований.

Целью работы является нахождение теоретических и экспериментальных способов определения поперечных сил.

В результате анализа литературных источников было установлено: 1) единая методика определения поперечных сил отсутствует; 2) при выполнении операций обработки металлов давлением возникает поперечная сила, величина и направление действия которой полностью не исследованы; 3) возникновение поперечной силы связано с особенностями выполнения конкретной технологической операции.

Было проведено теоретическое определение поперечных сил для операций объемной и листовой штамповки.

С целью определения сил произвольно выделялся элементарный участок dF_K на поверхности AB контакта (рис. 1) [1]. Считалось, что на такой поверхности присутствуют распределенные нормальные σ_H и касательные τ_K напряжения.

Для произвольно выделенного участка:

$$dF_B = \sigma_H dF_K \cos \alpha + \tau_K dF_K \sin \alpha = \sigma_H dF_B + \tau_K dF_\Gamma,$$

$$dF_\Gamma = \sigma_H dF_K \sin \alpha + \tau_K dF_K \cos \alpha = \sigma_H dF_\Gamma + \tau_K dF_B,$$

где dF_Γ и dF_B – площади проекций элементарного участка заготовки на плоскости, перпендикулярную и совпадающую с направлением движения инструмента; α – угол между направлением нормального напряжения σ_H и направлением движения инструмента.

Решение задачи, связанной с определением поперечных сил, требует выявления нормального напряжения σ_x , действующего со стороны инструмента. Появление контакта инструмента с заготовкой приводит к смене схемы деформируемого состояния (см. рис. 2), а именно, объемное деформированное состояние на поверхности переходит в плоское (т.е. в

рассматриваемой точке $\sigma_x = 0$ и $\epsilon_x \neq 0$ – до момента касания, $\sigma_x \neq 0$, $\epsilon_x = 0$ – после момента касания).

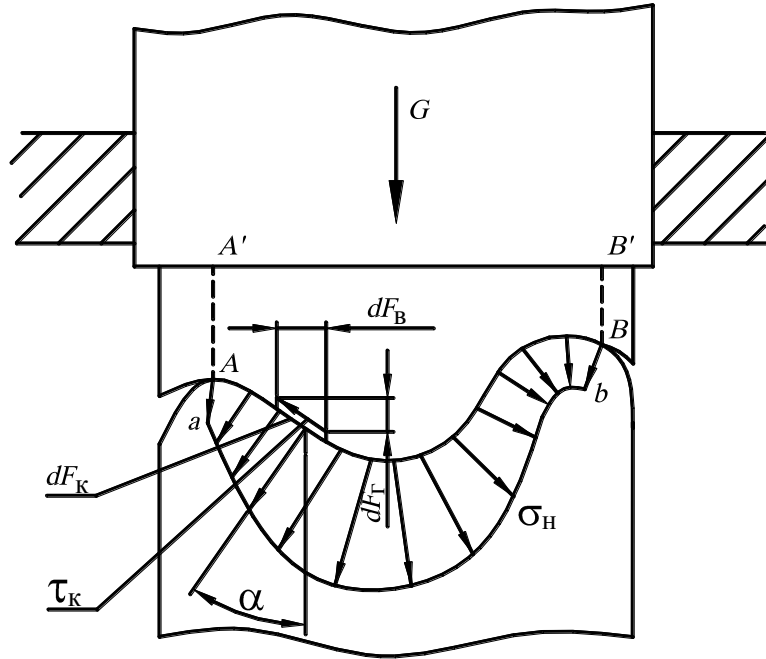


Рис. 1. Схема определения нормальных и касательных напряжений для нахождения сил для контактной поверхности

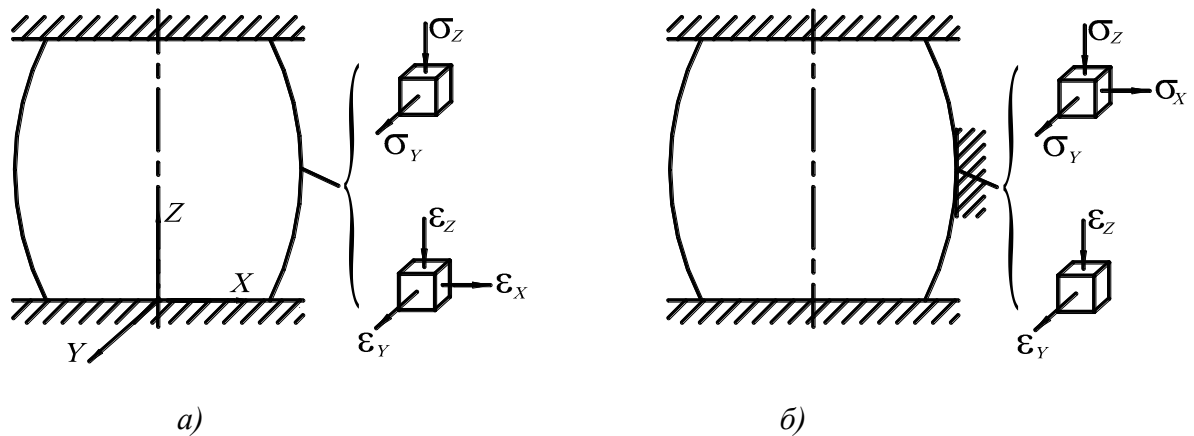


Рис. 2. Схемы напряженно-деформированного состояния образца: a – при его осадке; b – при боковом касании заготовкой инструмента

Для такого состояния справедливы выражения [1]:

$$\sigma_y = \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2}; \tau_{xy} = \tau_{zy} = 0.$$

Определение численных значений напряжений проводилось с учетом методики, предложенной М.В. Сторожевым и Е.А. Поповым [1]. Предполагалось, что процессы, протекающие на торцах заготовки и в зоне бокового контакта с инструментом, имеют схожий характер.

Вследствие этого, определение τ_{xz} проводилось по указанной методике, применяемой в расчетах на торцах заготовки. На основании этого полагалось: 1) что при касательном напряжении τ_K на контактной поверхности $\tau_K \leq 0,7k$ (где $k = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s = 0,577 \sigma_s$ – постоянная

пластичности) напряжения определяются соотношением $\sigma_x - \sigma_z = \pm \sigma_s$, и точное значение σ_x определено быть не может; 2) при $0,7k \leq \tau_k \leq k$: $\sigma_x = \sigma_z = -\frac{\sigma_s}{3}$.

Было предложено производить определение напряжения σ_x без нахождения касательных напряжений на поверхности заготовки на основании уравнения связи между напряженным и деформированным состояниями заготовки при пластическом деформировании [1]:

$$v_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} = \frac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} = v_\varepsilon,$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – соответственно главные напряжения и главные деформации.

При этом вводились следующие допущения: а) относительные сдвиги γ отсутствуют, и направления удлинений совпадают с главными осями деформаций; б) направления напряжений совпадают с главными осями нормальных напряжений.

Для рассматриваемой задачи значение коэффициента v_σ находится в диапазоне $-1 \leq v_\sigma \leq 0$. В результате было получено, что значения искомого напряжения находятся в

диапазоне $-\frac{\sigma_s}{3} \leq \sigma_x \leq 0$. Для рассмотренной схемы в предельном случае $\sigma_x = \sigma_z = -\frac{\sigma_s}{3}$.

Таким образом, максимально возможное значение напряжения в зоне контакта заготовки с препятствием $\sigma_x \leq \left| \frac{\sigma_s}{3} \right|$.

В данной работе было предложено определять напряжения σ_x приближенно по значению коэффициента v_σ , который, в свою очередь, определяется на основе экспериментальных значений для рассматриваемого участка, и дает более точные значения напряжения:

$$\sigma_x = \sigma_s \frac{2v_\sigma}{3\sqrt{3+v_\sigma^2}}.$$

В результате, был предложен алгоритм расчета поперечных сил для заготовки произвольной пространственной формы: 1) криволинейная контактирующая поверхность штампа и заготовки в рассматриваемый момент времени разделяется на совокупность элементарных поверхностей (плоскость, цилиндр, сфера и т.д.), причем шаг разбиения зависит только от сложности рассматриваемой формы; 2) для каждой выделенной элементарной поверхности производится определение ее положения относительно базовой плоскости; 3) для каждой выделенной элементарной поверхности вычисляется определение площади контакта; 4) для каждой выделенной элементарной поверхности осуществляется расчет нормальных напряжений; 5) для каждой выделенной элементарной поверхности производится определение касательных напряжений; 6) определяется значение элементарной поперечной силы для каждой выделенной поверхности; 7) определяется результирующее значение поперечной силы путем векторного сложения соответствующих элементарных сил, действующих во всех выделенных участках заготовки.

Для операций листовой штамповки определение поперечных сил, возникающих при выполнении технологической операции, также проводилось с использованием метода, представленного в работе [1].

На основании рис. 3 были определены основные уравнения равновесия выделенного элемента:

а) при проецировании на нормаль к поверхности (см. рис. 3):

$$\sigma_n f_3 - 2\sigma_p f_1 (d\alpha/2) - 2\sigma_\theta f_2 (d\beta/2) = 0, \quad (1)$$

б) при проецировании на касательную к поверхности заготовки в меридиональном сечении (см. рис. 3):

$$\sigma_p f_1 + d(\sigma_p f_1) - \sigma_p f_1 - 2\sigma_\theta f_2 (d\theta/2) - \mu \sigma_n f_3 = 0. \quad (2)$$

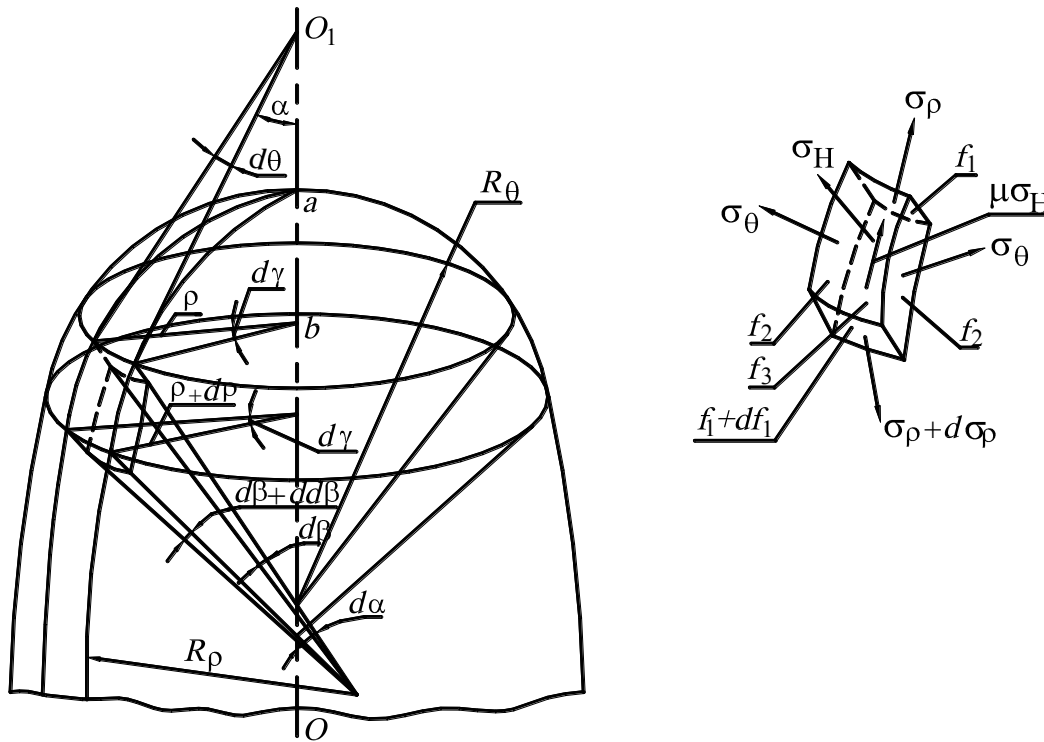


Рис. 3. Схема для определения элементарной силы трения на поверхности исходной заготовки

С учетом уравнений (1)–(2), получено:

$$dF_{Ti} = s \, d\gamma \, d\rho \left[(\sigma_\rho - \sigma_\theta) + d\sigma_\rho \cdot \frac{\rho}{d\rho} \right] \quad (3)$$

где dF_{Ti} – поверхностная сила трения; действующая в выделенном i -м элементарном участке; β – переменный коэффициент, являющийся функцией главных нормальных напряжений; s – толщина заготовки; $d\gamma$ – угол; ρ – параметр, определяющий положение выделенного элемента заготовки относительно оси симметрии.

Величина поперечной силы, действующей в выделенном сегменте, в конечном итоге, определялась:

$$F_{Ti} = \int_{r_1}^{r_2} \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} (\pm\beta \sigma_s \, d\rho + d\sigma_\rho \, \rho) \cdot s \cdot d\gamma, \quad (4)$$

$$F_{Ti} = (\sigma_\rho \pm \beta \sigma_s \ln \rho) \cdot s \cdot \rho \cdot \gamma + C, \quad (5)$$

где r_1 и r_2 – соответственно внутренний и наружный радиусы рассматриваемого сегмента относительно оси симметрии заготовки; γ_1 и γ_2 – начальное и конечное значения угла, в пределах которого рассматривается выделенный сегмент; C – постоянная интегрирования.

Общее уравнение для определения поперечных сил в приближенном виде, полученное с использованием неравенства $\sigma_\rho = \sigma_s - |\sigma_\theta| < \sigma_s$, представленного в работе [1], рассматривалось как случай с предельными по величине поперечными силами. Оно имеет вид:

$$F_{Ti} = (\sigma_s \pm \beta \sigma_s \ln \rho) \cdot s \cdot \rho \cdot \gamma + C. \quad (6)$$

На основе уравнения (5) могут быть получены уравнения определения исследуемых сил для любых операций листовой штамповки.

В результате, был предложен алгоритм расчета поперечных сил для операций листовой штамповки: 1) определяется ось симметрии заготовки; 2) поверхность заготовки разбивается на участки (сегменты), ограниченные радиусами r_1 и r_2 и углом в диапазоне от γ_1 до γ_2 ; 3)

для каждого из выделенных сегментов экспериментально определяются значения величин s , ρ , γ ; на основе справочных данных σ_s ; 4) находятся величины деформаций ε_ρ , ε_θ , ε_z для каждого рассматриваемого участка заготовки экспериментально (например, при помощи метода координатных сеток), либо расчетными способами (например, на основе МКЭ); 5) на основе полученных значений деформаций определяется значение σ_θ по уравнению $\sigma_\theta = \sigma_s \frac{-(\varepsilon_\rho + 2\varepsilon_z)}{\varepsilon_z + 2\varepsilon_\rho}$; 6) находится σ_ρ путем подстановки полученного значения напряжения σ_θ в уравнение пластичности $\sigma_\rho - \sigma_\theta = \pm\beta \sigma_s$; 7) на основе уравнения (5) в зависимости от рассматриваемой технологической операции, условий ее проведения и граничных условий, определяется постоянная интегрирования C ; 8) на основе полученного уравнения устанавливается величина поперечной силы в пределах выделенного сектора; 9) аналогично определяются поперечные силы во всех выделенных секторах заготовки; 10) находится результирующее значение поперечной силы путем векторного сложения сил, действующих в каждом выделенном сегменте, по всей поверхности заготовки.

Экспериментальные исследования поперечных сил проводились для ряда операций объемной и листовой штамповки. С этой целью было спроектировано, изготовлено и опробовано измерительное устройство (см. рис. 4).

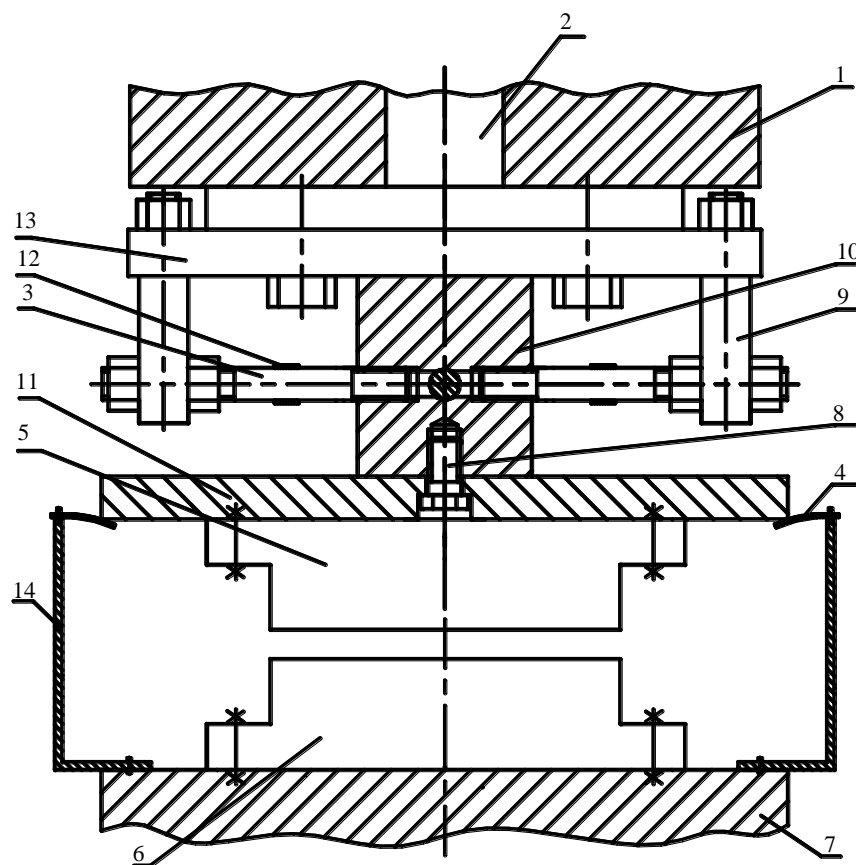


Рис. 4. Схема измерительного устройства:

1 – ползун пресса; 2 – узел крепления; 3 – стержни силоизмерительные; 4 – датчики малых перемещений; 5 – верхняя половина штампа; 6 – нижняя половина штампа; 7 – стол пресса; 8 – узел крепления; 9 – держатель вспомогательный; 10 – держатель основной; 11 – плита промежуточная; 12 – тензодатчики; 13 – плита опорная; 14 – устройства фиксации датчиков малых перемещений

Принцип действия измерительного устройства основан на разрыве жесткой связи между верхней плитой штампа и ползуном пресса. Для передачи нагрузок, действующих в плос-

кости разъема штампа, вводятся четыре силоизмерительных стержня 3 и четыре вспомогательных держателя 9. Силоизмерительные стержни расположены в плоскости разъема штампа под углом 90° друг относительно друга. На силоизмерительных стержнях расположены тензодатчики 12. Вспомогательные держатели жестко зафиксированы на опорной плите 13, которая, в свою очередь, жестко крепится к ползуну прессы 1, например, посредством хвостовика 2. Верхняя половина штампа крепится к держателю основному 10 либо непосредственно при помощи специального узла крепления 8, либо через промежуточную плиту 11. Определение поперечных сил производится по величинам деформаций силоизмерительных стержней с тензодатчиками при помощи регистрирующей аппаратуры (аналого-цифровой преобразователь с выводом на ЭВМ). Также имеется возможность измерения перекоса ползуна 1 путем определения расстояния между неподвижными устройствами фиксации датчиков малых перемещений 14 и ползуном.

Выводы

1. Подтвержден факт возникновения поперечных сил при выполнении технологической операции.
2. Предложены аналитические зависимости для определения поперечных сил для определенных технологических операций обработки металлов давлением.
3. Разработаны алгоритмы для определения поперечных сил в зависимости от выполняемых технологических операций объемной и листовой штамповки.
4. Установлено теоретически и экспериментально подтверждено, что величина поперечных сил может достигать $\sim 20 \div 100\%$ от силы деформирования.

-
1. **Сторожев, М.В.** Теория обработки металлов давлением / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.

*Дата поступления
в редакцию 30.03.2010*

S.V. Kuznesov

RESEARCH OF CROSS-SECTION FORCES AT PERFORMANCE OF TECHNOLOGICAL OPERATIONS OF PROCESSING OF METALS BY PRESSURE

In article the way of theoretical definition of the cross-section forces arising at performance of technological operations of volume and sheet punching of processing of metals by pressure is presented. The design of the measuring device for definition of cross-section forces is offered.

Key words: processing of metals by pressure, cross-section forces, definition of forces in technological operations of processing by pressure.