

## ГЕОМЕТРИЯ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПОПЕРЕЧНОЙ ПРОКАТКЕ

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

Изучение вопроса геометрических параметров контактных поверхностей имеет существенный теоретический и практический интерес: от размера контактной поверхности, ее положения в пространстве зависит усилие деформирования, напряженное состояние в очаге деформации, условия устойчивого протекания процесса поперечной прокатки (ПП).

Рассмотрим ПП бесконечного цилиндра между двумя плоскими плитами. В этом случае в любом поперечном сечении прокатываемого цилиндра реализуется плоскодеформированное состояние. При степенях обжатия  $d=D/H$  больших 1,02 реализуется центрированное поле и геометрию поперечного сечения принято [1] изображать фигурой (рис. 1а), где все сечение заготовки условно разбивается на четыре зоны. В зонах  $KO_1L'$  и  $LO_2K'$  материал вращается вокруг центров  $O_1$  и  $O_2$  с угловой скоростью  $\omega$ . Пластическая деформация в этих зонах отсутствует. В зонах  $KO_1O_2L$  и  $L'O_1O_2K'$  металл пластически деформируется.

Для решения задачи определения усилия при ПП воспользуемся приближенным методом верхней оценки. Произвольно зададимся значениями  $j_1$  и  $j_2$ . Из условия равенства площади поперечного сечения и геометрического рассмотрения фигуры  $KO_1L'K'O_2L$  определяем геометрические параметры сечения. В заданном масштабе графически строим сечение (рис. 1а). Пластические области разделим на подобласти в виде треугольников. Точка  $M$  делит поверхность контакта  $KL$  пополам. Каждая подобласть предполагается жесткой; внутри подобластей скорости течения металла равны, на границах возможен разрыв скорости.

Строим годограф скорости (рис. 1б). От точки 0 откладываем вектора скоростей  $u_1$ ,  $u_3$ ,  $u_6$ ,  $u_7$  и получаем положение точек 1, 5, 6, 7. Из точки 1 проводим линию, параллельную линии  $KO_1$  (рис. 1а), из точки 6 – линию, параллельную линии  $KL$ ; пересечение двух линий образует точку 2. Вектор 0-2 является скоростью области  $KMO_1$ . Из точки 5 проводим линию, параллельную линии  $LO_2$ , из точки 7 – линию параллельную линии  $KL$ ; пересечением этих двух линий образует точку 4. Точку 3 получим пересечением линий параллельных линиям  $MO_1$  и  $MO_2$ , проведенными из точек 2 и 4 соответственно. Точку 9 получаем отложив на продолжении линии 3-0 в противоположную сторону от точки 0 величину отрезка 0-3. В полученном годогра-

фе скоростей вектора 0-1, 0-2, ... являются скоростями соответствующих областей, а вектора 1-2, 2-3, ... – разрывами скоростей на границах подобластей.

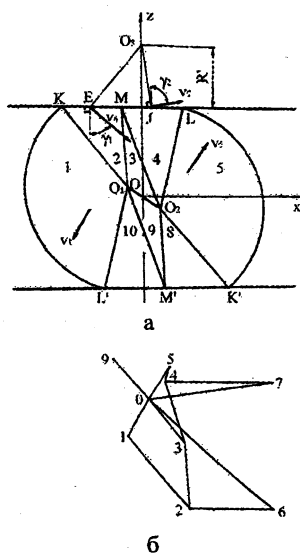


Рис.1. Схема разделения сечения на подобласти (а) и годограф скоростей (б)

Для процесса ПП бесконечного цилиндра между плитами метод верхней оценки при условии, что инструмент движется поступательно со скоростью  $u$ , а на контакте реализуется коэффициент трения  $\mu$ , выражается [1] в следующем неравенстве:

$$\frac{P_m}{2K} \leq \frac{0,5 \sum l_i v_i + \mu \sum l_n v_n}{B' u}, \quad (1)$$

где  $P_m$  – удельное контактное усилие;

$K$  – пластическая постоянная;

$l_i$  – длина отдельных границ подобластей;

$v_i$  – разрывы скоростей течения на границах подобластей;

$l_n$  – длина отдельных частей инструментальной плиты;

$v_n$  – скорость скольжения плиты по деформируемому металлу;

$B'$  – ширина проекции контактной поверхности на плоскость, перпендикулярную направлению движения инструмента.

Для решения нашей задачи приведем выражение (1) к следующему виду:

$$\left(\frac{P_K}{2K}\right)_i = 0,5 \frac{\sum I_i v_i}{\sum B'v} + \left(\frac{P_\mu}{2K}\right)_{i-1} \mu \frac{\sum I_n v_n}{\sum B'v}, \quad (2)$$

где  $\sum I_i v_i = KO_1 v_{1-2} + MO_1 v_{2-3} + MO_2 v_{3-4} + LO_2 v_{4-5} + \frac{1}{2} O_1 O_2 v_{3-9}$ ,

$$\sum I_n v_n = KM v_{6-2} + ML v_{7-4};$$

$$\sum B'v = 0,5B(v_6 \cos \gamma_1 \pm v_7 \cos \gamma_2 + v_6 \mu \sin \gamma_1 + v_7 \mu \sin \gamma_2);$$

$g_1, g_2$  – углы между векторами скорости частей инструмента и перпендикуляром к контакту;

$v_{1,2}$  – разрыв скорости на границе  $KO_1$ .

Оставляя параметры  $D, j_2, i, m, d$  постоянными варьируем величину  $j_1$  и определяем такое значение  $j_{1\text{opt}}$ , при котором удельное контактное усилие минимально. Согласно теореме о верхнеграницной оценке, действительными будут те параметры, при которых мощность прокатки минимальна, т.е. для рассматриваемой задачи соответствует минимальному нормальному усилию.

Рассмотрим процесс ПП бесконечного цилиндра плоскими плитами с малыми степенями обжатия, когда в поперечном сечении реализуется местное поле. При малых степенях обжатия деформации в сечении цилиндра не проникают на ось, поэтому вращение цилиндра возможно только вокруг центра  $O$ . Величину площадки контакта представим состоящей из двух отрезков, один из которых зависит от степени обжатия образца, а величину второго представим как функцию от угла  $q$ , и найдем такую его величину, при которой удельное контактное усилие будет минимально.

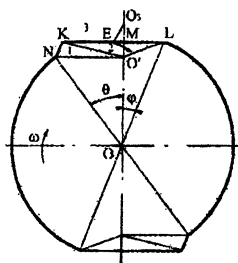


Рис. 2. Схема сечения образца при поперечной прокатке с местным очагом деформации

Зададим степеням обжатия  $d = 1,004 + 1,026$  и найдем промежуток возможных значений угла  $q$ . Используя метод верхней оценки для процесса ПП бесконечного

цилиндра между плитами найдем ряд значений удельного контактного усилия  $\frac{P_m}{2K}$  для возможных величин  $q$ . В сечении образца выделим две зоны NKLO' (рис. 2), где металл пластически деформируется, остальная часть сечения вращается вокруг центра образца O с угловой скоростью  $\omega$ . Аналогично строим годограф скоростей: зону NKLO' разделим на две подобласти, каждая подобласть предполагается жесткой; внутри подобластей скорости течения равны, на границах возможен разрыв скорости.

Для построенного годографа скоростей местного поля деформаций члены выражения (2) будут равны:

$$\begin{aligned} S \text{ li} V_i &= NO' V_{0,1} + LO' V_{0,2} + KO' V_{1,2}, \\ S \text{ lu} V_u &= KL V_{2,3}, \\ S B' V &= 0,5 KL V_{0,3} (\cos \gamma + m \sin \gamma), \end{aligned} \quad (3)$$

Были рассчитан ряд значений удельного контактного усилия в зависимости от степени обжатия и различных значений угла  $q$ . По одному из положений теории пластичности: из множества теоретически допустимых решений на практике реализуется только то его значение, которое обеспечивает минимальную мощность формоизменения; определим истинные геометрические характеристики поперечного сечения по минимальному значению удельного контактного усилия. Из анализа результатов расчета видно, что на практике должна реализоваться схема, когда линия НК приближается к касательной к поверхности цилиндра, причем минимум находится на небольшом отдалении от верхнего граничного значения угла  $q$ .

Построена зависимость удельного контактного усилия от степени обжатия для местного и центрированного поля деформации по данным, вычисленным нами методом верхнеграничной оценки. С уменьшением степени обжатия величина удельного контактного усилия возрастает. При степени обжатия  $d = 1,02$  оба решения дают один и тот же результат. Это подтверждает известное положение теории ПП [1] о том, что при степенях обжатия меньше 1,02 в образце реализуется местное деформационное поле, а при степенях обжатия больше 1,02 деформации достигают оси заготовки.

Решим задачу определения удельного контактного усилия с учетом деформационного упрочнения металла, т. е. рассмотрим задачу расчета усилий для упрочняющегося материала, что позволит реализовывать решения для холодной прокатки, а также для прокатки при пониженных температурах нагрева, так называемой "теплой" прокатки. Удельное контактное усилие с учетом накопленной металлом деформации рассчитаем следующим образом:

$$\left( \frac{P_m}{2K_\Lambda} \right)_i = \frac{0,5 \sum I_i v_i k_i}{\sum B' v} + \left( \frac{P_m}{2K_\Lambda} \right)_{i-1} \mu \frac{\sum I_n v_n}{\sum B' v}, \quad (4)$$

где  $k_i = \frac{K_{\Delta}}{K} = 1 + aL_i$  - коэффициент, учитывающий увеличение пластической постоянной от деформационного упрочнения;

$a$  - коэффициент пропорциональности;

$L_i$  - средняя накопленная деформация на отдельной границе подобластей.

По результатам расчета для ПП бесконечного цилиндра с учетом накопленной деформации видно, что для процессов холодной прокатки, а также прокатки при пониженных температурах нагрева, пренебрежение величиной накопленной металлом деформации при расчете усилия прокатки может привести к существенной ошибке. При малых степенях обжатия поверхностный слой металла получает значительное деформационное упрочнения. Причем, чем меньше степень обжатия, тем выше накопленные поверхностные деформации. Предложенная схема позволяет также определить глубину проникновения деформаций  $h = O'M$  (рис. 2) в сечении образца при ПП с малыми степенями обжатия. Возможность расчета значений накопленных металлом деформаций и глубины проникновения деформации позволяет контролировать процесс поверхностного упрочнения деталей методом ПП плоскими плитами с малыми степенями обжатия, не допуская выработки ресурса пластичности металла.

Рассмотрено также влияние распределения температуры по сечению цилиндра, коэффициента трения и коэффициента скольжения цилиндра по плите на геометрию сечения.

Рассматриваемое изменение распределения температуры по сечению прокатываемого цилиндра не ведет к изменению геометрических характеристик сечения, так как линейный коэффициент не изменяет минимума функции  $\frac{P_{11}}{2K}(j)$  [1]. Снижение температуры внутри цилиндра ведет к увеличению среднего температурного коэффициента  $\mu$ , следовательно, к увеличению значения удельного контактного усилия.

Рассчитаем значение удельного контактного усилия при коэффициенте трения  $m$ , равным 0,4; 0,5 и 0,6. В формулах расчета усилия ПП по вышеописанному методу последовательно изменяем значение величины  $m$ . По результатам расчета видно, что увеличение коэффициента трения между контактной поверхностью прокатываемого цилиндра и инструментальной плитой ведет к снижению величины удельного контактного усилия и не влияет на геометрию поперечного сечения цилиндра.

Аналогично рассчитывалось значение удельного контактного усилия при различных коэффициентах скольжения цилиндра по плоской плите. Результаты расчетов показали, что изменение величины коэффициента скольжения также не влияет на геометрию поперечного сечения цилиндра.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Щукин В.Я. Основы поперечно-клиновой прокатки. Минск: Наука и техника, 1986.-223с.