

УДК 621.77.011

Бровман М. Я.

ОСОБЕННОСТИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРОШИВКЕ

Процессы деформации при прошивке пуансоном постоянного диаметра были рассмотрены в ряде работ, в частности Е. П. Унксовым, И. Я. Тарновским, О. А. Ганаго и другими учеными, см. работы [1–3], где приведены и библиографические ссылки.

Целью работы является исследование процессов пластической деформации при прошивке.

По аналогии с задачами о плоской деформации, можно построить кинематически допустимое поле скоростей, как это было сделано в [4], включающее жесткую зону ABC , движение совместно с пуансоном со скоростью $V_z = \text{const} = -V_0$, (оси координат приведены на рис. 1, а).

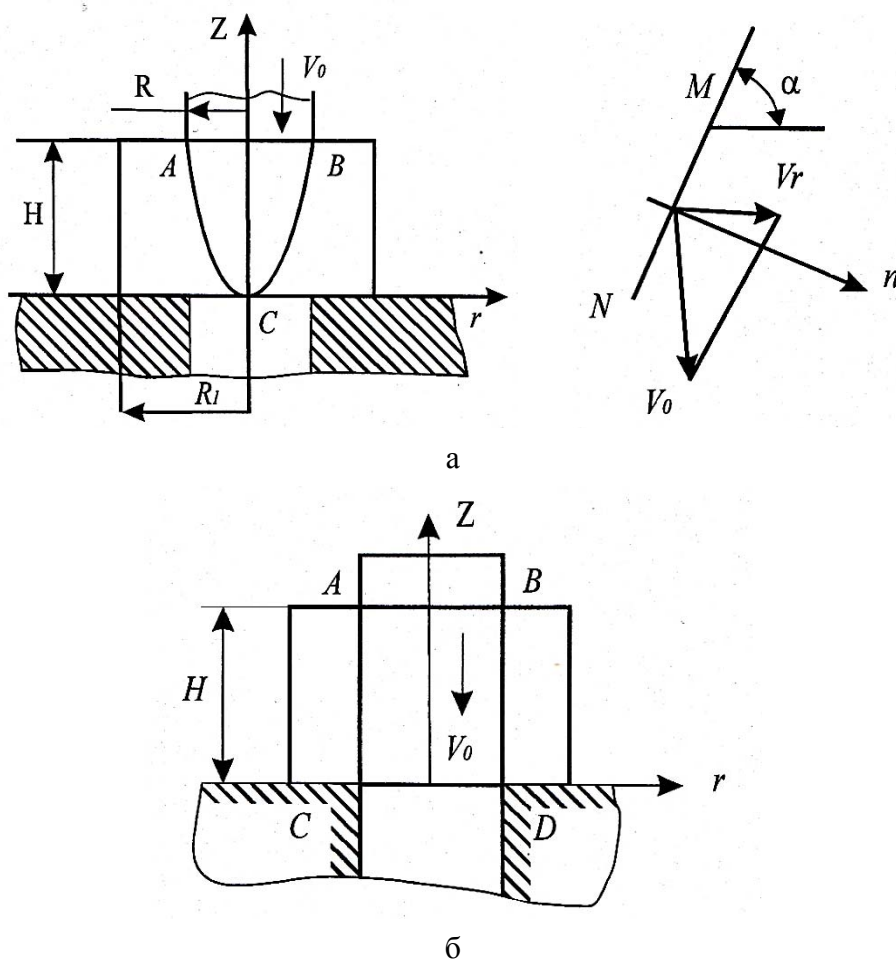


Рис. 1. Схема кинематически допустимых полей скоростей:
а – при деформации сжатия; б – при деформации среза

При этом металл, расположенный правее BC и левее AC , имеет скорости V_z и V_r такие, чтобы на границе внешних зон нормальные (к поверхности ACB) компоненты скорости были равны. На рис. 1, а приведена также схема скоростей на малом участке граничной поверхности MN . Здесь пунктиром показана нормаль « n » и нормальная компонента скорости равна $V_n = V_r \sin \alpha + V_z \cos \alpha$ и она же равна проекции на нормаль скорости жесткой зоны:

$$V_n = V_0 \cos \alpha ,$$

где α – это угол наклона отрезка MN к оси r .

В работе [4] показано, что граничной поверхностью может быть параболоид вращения.

Если во внешней зоне $V_z = 0$, то из условия несжимаемости:

$$V_r = \frac{c}{r}, \quad (1)$$

где c – постоянная и из уравнения $V_0 \cos \alpha = \frac{c}{r} \sin \alpha$, $\operatorname{tg} \alpha = \frac{dz}{dr} = \frac{V_0}{c}$ получим уравне-

ние, см. [4] $Z = \frac{V_0 r^2}{2c}$, а из условия $z = H$ при $r = R$:

$$z = \frac{HR^2}{r^2}. \quad (2)$$

Разрыв тангенциальной компоненты скорости на граничной поверхности равен:

$$\Delta V = V_0 \sin \alpha + V_r \cos \alpha = V_0 \sin \alpha + \frac{V_0 \cos^2 \alpha}{\sin \alpha};$$

$$\Delta V = \frac{V_0}{\sin \alpha}.$$

Мощность среза на поверхности параболоида равна:

$$N_c = \int_0^R \int_0^H 2\pi r \kappa \Delta V \frac{dr}{\cos \alpha} dz;$$

$$N_c = \int_0^R \int_0^H \frac{2\pi r \kappa V_0 dr dz}{\sin \alpha \cos \alpha},$$

заменив $\sin \alpha$ и $\cos \alpha$ на величины $\frac{dz}{dr} \left[1 + \left(\frac{dz}{dr} \right)^2 \right]^{-0,5}$ и $\left[1 + \left(\frac{dz}{dr} \right)^2 \right]^{-0,5}$, определим величину:

$$N_c = \kappa V_0 \pi R^2 \left(\frac{R}{H} + \frac{4}{3} \frac{H}{R} \right). \quad (3)$$

Здесь κ – предел текучести при деформации сдвига:

$$\kappa = \frac{\sigma_T}{\sqrt{3}},$$

где σ_T – предел текучести при одноосном растяжении-сжатии.

Мощность формоизменения во внешней зоне равна:

$$N_\phi = \int_0^H dz \int_0^{R_1} 2\kappa H_0 \pi r dr dz = 2\pi R^2 \kappa V_0 \left(0,5 + \ln \frac{R_1}{R} \right),$$

где H_0 – интенсивность скорости деформации, равная в данном случае:

$$H_0 = \frac{2c}{r^2} = \frac{V_0 R^2}{H r^2}.$$

Величина $r_0 = R\sqrt{\frac{z}{H}}$ – это граничная поверхность *ACB*.

В результате расчетов определяем полную мощность:

$$N = PV_0 = N_\phi + N_c = \pi R^2 \kappa V_0 \left[1 + 2 \ln \left(\frac{R_1}{R} \right) + \frac{R}{H} + \frac{4}{3} \frac{H}{R} \right]. \quad (4)$$

Мощность (и усилие деформации P) имеет минимум при $\frac{H_\kappa}{R} = \frac{\sqrt{3}}{2}$, когда:

$$P = \kappa \pi R^2 \left(1 + \frac{4}{\sqrt{3}} + 2 \ln \frac{R_1}{R} \right) = 2 \kappa \pi R^2 \left(1,65 + \ln \frac{R_1}{R} \right). \quad (5)$$

Поэтому, если только $H > H_\kappa$, то деформация может не проникать по всей высоте заготовки. Однако, если $H > H_\kappa$, то в плоскости $z = H - H_\kappa$ происходит скольжение деформируемого металла при $z = H - H_\kappa$ относительно неподвижной части заготовки и мощность:

$$N_1 = \int_0^{R_1} 2\pi r \kappa V_r dr = \frac{\pi \kappa V_0 R^2 R_1}{H}.$$

(Если $H = H_\kappa$ то происходит трение относительно поверхности инструмента и в этой формуле следует подставить вместо « κ » величину ($\psi\kappa$), где $0 \leq \psi \leq 1,0$ – характеристика сил трения на контактной поверхности).

С учетом мощности N_1 вместо (4) получим:

$$P = \kappa \pi R^2 \left(1 + 2 \ln A + \frac{R}{H} + \frac{4}{3} \frac{H}{R} + A \frac{R}{H} \right),$$

где $A = \frac{R_1}{R}$ – отношение наружного и внутреннего радиусов заготовки.

В этом случае экстремум имеет место при $\frac{H_\kappa}{R} = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{1+A}$ и вместо (5) получаем формулу:

$$P = 2 \kappa \pi R^2 \left(0,5 + \ln A + \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{1+A} \right), \quad (6)$$

например, при $A = 2$: $P = (2 \kappa \pi R^2) 3,2$; $\frac{H_\kappa}{R} = 1,5$.

Но возможным является и другое кинематически допустимое поле скоростей, которое иллюстрируется рис. 1, б. В этом случае весь цилиндр *ABCD* движется. Как жесткое тело со скоростью $V_z = -V_0$ и мощность равна мощности среза по цилиндрической поверхности

$$N = PV_0 = 2\pi R \kappa H V_0:$$

$$P = \pi R^2 2\kappa \left(\frac{H}{R} \right). \quad (7)$$

Для заготовок малой толщины, для которых усилие, определенное по формуле (7) меньше, чем усилие, определенное по формуле (6), реализуется именно такое поле скоростей (т. е. оно является предпочтительным, т. к. определяет меньшие величины усилия и мощности деформации).

Допустим осуществляется прошивка поковки, у которой высота в 2 раза больше диаметра отверстия и $\frac{H}{R} = 4$. Если при этом $A = \frac{R_1}{R} = 2$, то поле скоростей, представленное на рис. 1, а, дает меньшую величину усилия.

Но по мере движения пуансона величина высоты центральной части поковки будет уменьшаться и при $\frac{H}{R} \leq 3,2$ меньшее усилие будет иметь место, если реализуется поле скоростей согласно рис. 1, б, т. е. со срезом по всей толщине заготовки. Поэтому происходит изменение кинематики процесса деформации и следствием этого является то, что длина удаленной части поковки L (см. рис. 2) не равна ее высоте H .

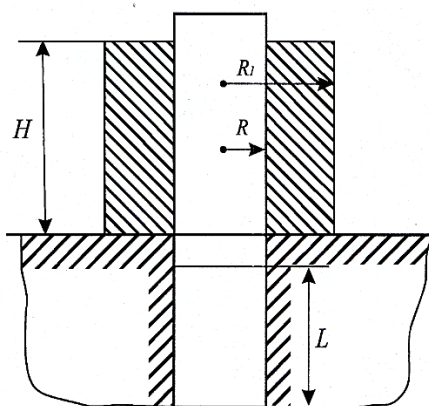


Рис. 2. Схема деформации при прошивке с удалением центральной части заготовки длиной L

Это обнаружил еще А. Треска 145 лет тому назад. Изучая процесс деформации, он при проведении экспериментального исследования установил, что длина L может быть определена по приближенной эмпирической формуле [5]:

$$\frac{L}{R} = 1 + \ln A. \quad (8)$$

Какова бы ни была высота исходной заготовки H (рис. 2), длина удаленной части заготовки L от нее не зависит.

Докладывая во Французской Академии об этой работе, А. Треска «выразил большое удивление в связи с тем, что из выбитой части исчезла столь значительная доля металла, который первоначально занимал область отверстия» (см. [5] стр. 18).

Видимо он сначала предполагал, что произошло уплотнение металла при высоких напряжениях сжатия, и провел измерения, показавшие, что плотность металла (свинца, меди) не изменилась.

Длина удаленной части металла L не зависит от начальной высоты H , а зависит только от соотношения $A = \frac{R_1}{R}$ (разумеется, это не относится к заготовкам малой толщины $H < H_k$ для которых $L = H$).

На рис. 3 показана схема опыта А. Треска по сжатию заготовки, образованной 16 листами свинца толщиной 4 мм каждый (сторона квадратных листов 120 мм) стальным пуансоном на гидравлическом прессе (рис. 3 заимствован из работы Дж. Белла [5]).

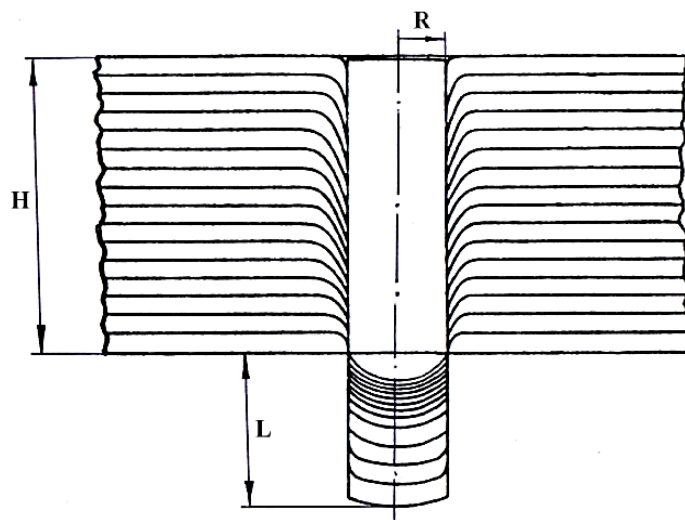


Рис. 3. Схема деформации многослойной свинцовой заготовки при прошивке

Кажущееся «исчезновение» части металла из центральной части заготовки объясняется тем, что в первой стадии прошивки происходит не срез, а сжатие верхней части заготовки при радиальном течении металла. И только тогда, когда высота оставшейся части металла центральной зоны уменьшается до критической величины H_k , происходит срез и удаление центральной зоны длиной $L = H_k$. Поэтому она и не зависит от начальной толщины. Как видно из рис. 3, верхние листы свинца подвергнуты интенсивному сжатию (их толщина существенно ниже начальной), а нижние листы практически не подвергались деформации сжатия.

При прошивке тонких заготовок $H < H_k$ толщина удаленной части равна первоначальной толщине: в этом случае реализуется только деформация среза.

На рис. 4 приведены графики величины $\frac{L}{R}$ в функции от безразмерного параметра

$A = \frac{R_1}{R}$. Линия 1 соответствует эмпирической формуле (8), предложенной А. Треска, а линия 2 – формуле (5). Линия 2 может быть получена из линии 1 сдвигом вдоль оси ординат на величину равную 0,65. Кинематически допустимые поля скоростей дают завышенные величины мощности и усилия (в данном случае мощность определена величиной усилия).

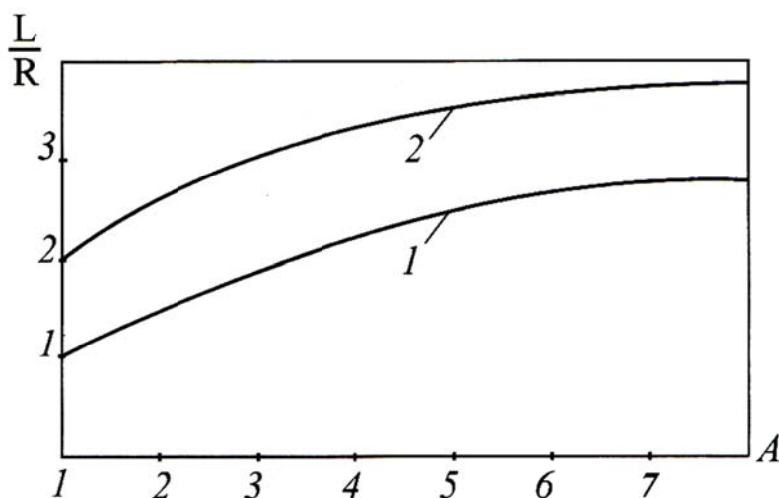


Рис. 4. Графики функций $\frac{L}{R}(A)$:

1 – согласно формуле (8); 2 – по формуле (5)

Можно построить и статически допустимое поле напряжений, которое определяет нижнюю границу мощности и усилия.

Для схемы по рис. 1, б можно принять:

а) в центральной зоне при $0 \leq r \leq R$, $0 \leq z \leq H$:

$$\sigma_r = -\sigma_{r0}; \quad \sigma_z = p; \quad |p| - |\sigma_r| = 2K;$$

б) во внешней зоне при $R \leq r \leq R_1$, $0 \leq z \leq H$, $\sigma_0 = 2K + 2K \ln \frac{R}{r}$:

$$\sigma_r = 2K \ln \frac{R_1}{r}; \quad \sigma_z = 0,$$

здесь p – давление в штампе.

Эти напряжения удовлетворяют уравнениям равновесия и условию текучести (и крайевым условиям $\sigma_r = 0$, при $r = R_1$).

При $r = R$, $\sigma_r = -\sigma_{r0} = 2K \ln \frac{R_1}{R}$, поэтому $\sigma_z = p = 2K + 2K \ln \frac{R_1}{R} = 2K(1 + \ln A)$, следовательно, формула А. Треска совпадает с нижней границей величины усилия.

Например, для заготовки из меди при $H = 50$ мм, $R_1 = 25$ мм, $R = 10$ мм, $A = 2,5$ согласно опытам А. Треска $L = 22$ мм, $\frac{L}{R} = 2,2$, несколько выше расчетного значения, равного согласно (8) 1,916. Для железа при $H = 38,5$ мм, $R_1 = 40$ мм, $R = 17,5$ мм, $L = 32,5$ мм, $\frac{L}{R} = 1,856$, что почти совпадает с расчетной величиной [5].

Для свинцовых образцов при $H = 30$ мм, $R_1 = 60$ мм, $R = 5$ мм, $A = 12$, $L = 15$ мм, $\frac{L}{R} = 3$,

а при $H = 30$ мм, $R_1 = 60$ мм, $R = 5$ мм, $A = 12$, $L = 15$ мм, $\frac{L}{R} = 3$.

Приведем далее краткие сведения о работах А. Треска.

Анри Эдуард Треска (Tresca) родился в Дюнкерке в 1814 г. После окончания в 1833 г. политехнической школы занимался проектированием сооружений и гидравлических машин, работал инженером и помощником директора в высшем ремесленном училище. С 1864 г. он провел опыты по исследованию процессов пластической деформации металлов (а также глины, воска).

Эти вопросы интересовали его в течение всей дальнейшей жизни (А. Треска умер в 1885 г.) [5].

А. Треска впервые установил, что пластическая деформация происходит, когда наибольшие касательные напряжения достигают определенной величины, являющейся характеристикой сопротивления пластической деформации данного металла (сплава) и, следовательно, именно деформации сдвига определяют процесс пластической деформации. При увеличении деформации за зоной упругости реализуется зона упрочнения, а за ней пластическое течение при постоянном (или незначительно имеющемся) напряжении. Также А. Треска пришел к выводу о том, что пластическая деформация происходит без изменения объема. Это «условие несжимаемости» широко используют при анализе различных процессов обработки давлением до настоящего времени.

В настоящее время уточнены условия, при которых пластическое изменение объема надо учитывать (при деформации порошков, некоторых сплавов, полученных литьем и т. д.).

Барре Сен-Венан (B. Saint-Venant) опубликовал в 1871 г. статью [6], в которой привел формулу для максимального касательного напряжения в виде:

$$\tau_{xy}^2 + \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 = K^2,$$

где K – предел текучести (сопротивление деформации) при сдвиге, (если $\sigma_x = \sigma_y = 0$, то $|\tau_{xy}| = K$);

$\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ – компоненты тензора напряжений в координатах x, y , причем σ_x, σ_y – нормальные, а τ_{xy} – касательное напряжения.

Также Сен-Венан установил соотношение между тензорами напряжений и скорости деформации:

$$\frac{\sigma_x - \sigma_y}{\tau_{xy}} = 2 \frac{\partial V_x}{\partial x} \left[\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right]^{-1},$$

где V_x, V_y – компоненты вектора скорости течения, причем условие несжимаемости принято в виде:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0.$$

ВЫВОДЫ

Фактически, на основании работ А. Треска, Б. Сен-Венана и М. Леви в 1870–1871 гг. во Франции была создана теория пластичности [5–7]. Заслуги А. Треска быстро получили высокую оценку (он был награжден в 1867 г. премией по механике фонда МОНТИ в размере 1000 франков [5]). После 1870 г. происходит интенсивное развитие теории пластичности, которая является основой для разработки технологии процессов обработки металлов давлением.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Унксов Е. П. *Инженерные методы расчета усилия при обработке металлов давлением* / Е. П. Унксов. – М. : Машигиз, 1955. – 280 с.
2. Щерба В. Н. *Технология прессования металлов* / В. Н. Щерба, Л. Х. Райтбарг. – М. : Металлургия, 1955. – 336 с.
3. Хилл Р. *Математическая теория пластичности* / Р. Хилл. – М. : Гостехтеориздат., 1956. – 407 с.
4. Бровман М. Я. *Кинематически допустимые поля скоростей при осесимметричной деформации* / М. Я. Бровман. – *Известия ВУЗов. Черная металлургия.* – 1970. – № 7. – С. 44–46.
5. Белл Д. Ф. *Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел* / Д. Ф. Белл. – М. : Наука, 1984. – Т. 2. – 431 с.
6. Сен-Венан Б. *Об установлении уравнений внутренних движений, возникающих в твердых пластических телах за пределами упругости* / Б. Сен-Венан // В сб. *Теория пластичности под ред. Ю. Н. Работнова.* – М. : Гос. Издательство иностранной литературы, 1948. – С. 11–19.
7. Леви М. *К вопросу об общих уравнениях внутренних движений, возникающих в твердых пластических телах за пределами упругости* / М. Леви // В сб. *Теория пластичности под ред. Ю. Н. Работнова.* – М. : Гос. Издательство иностранной литературы, 1948. – С. 20–23.

Бровман М. Я. – д-р техн. наук, проф., ООО «Модуль инжиниринг», г. Тверь, Россия.

E-mail: brovman@mail.ru

Статья поступила в редакцию 17.06.2013 г.