Т.В. Бровман
ФГБОУ ВПО «Тверской государственный технический университет»
г. Тверь, Россия
E-mail: brovman@mail.ru

УДК 621.771.001
Дата поступления 15.11.2021

РАЗРАБОТКА НОВЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ВОЛОЧЕНИЯ И ПРЕССОВАНИЯ

Аннотация

Характерной особенностью конструкции инструмента для волочения является необходимость обеспечения постоянной подачи смазки в зону деформации. Предложена конструкция волоки, в которой поверхность зоны деформации выполнена в виде спирали. При больших усилиях волочения вдоль всей матрицы остается зазор в форме винтовой полости, по которой прокачивают смазку. На основе теоретических расчетов получены критерии, позволяющие определить кинематически допустимое поле скоростей, совместимое с движением жестких зон.

Ключевые слова: волочение, прессование, мощность деформации, смазка волоки.

Введение

Волочение при некачественной смазке приводит к низкой стойкости инструмента, ограничивает скорость волочения и производительность волочильных станов. Использование в качестве материала волок сверхтвердых сплавов, для повышения их прочности, износостойкости и долговечности показало, что, такие сплавы чувствительны к нагреву и воздействию термических напряжений (их теплопроводность низкая, а внешнее охлаждение волок неэффективно для охлаждения контактной поверхности волоки и деформируемой заготовки). Для материалов высокой прочности, подвергаемых волочению, широко применяют волоки из сплавов вольфрама, кобальта (CoS -15%) при использовании интенсивного охлаждения внешней поверхности волоки. В процессе волочения имеет место значительное трение, которое приводит к нагреву и сдерживает увеличение скоростей волочения, а следовательно, и производительность волочильных станов.

Много конструкций инструмента разрабатывают таким образом, чтобы обеспечить нагнетание смазки и ее подачу в зону деформации. Инструмент, обычно, соединен с системой подачи в волоку смазки, однако, трудно добиться попадания смазки по всей поверхности контакта волоки и деформируемой заготовки, ввиду значительных контактных давлений.

Основная часть

При волочении, также как и при прессовании, происходит радиальное обжатие заготовки при одновременном ее движении вдоль своей оси [1-6]. На рисунке 1 показана схема деформации круглой заготовки радиусом R_0 до R_1.Очаг деформации находится между плоскостями AB и CD, а внешние жесткие зоны перемещаются со скоростями $V_z = -V_0$ и $V_z = -V_1$, причем $V_0\, R_0^2 = V_1\, R_1^2$; ($V_r = 0$ в жестких зонах).

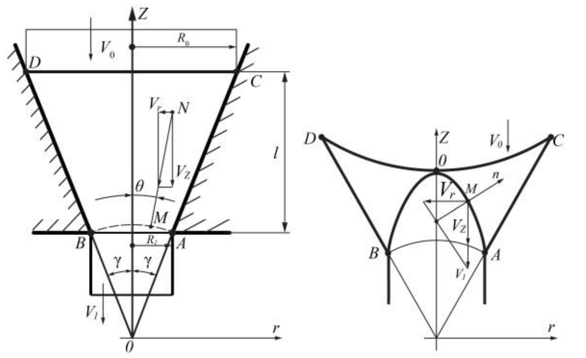
Кинематически допустимое поле скоростей определяет завышенную величину мощности и напряжения волочения. Обычно, кинематически допустимое поле скоростей определяют из условий:

а) условия несжимаемости, которое можно записать в виде [3]

$$\frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_r}{r} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0;$$

б) краевого условия для скоростей на поверхности матрицы $\frac{\partial Z}{\partial r} = \frac{V_z}{Vr}$, в частном случае, для прямолинейной образующей, рисунок 1, $\frac{V_z}{Vr} = ctg\gamma$ на поверхности AC.

Принципиальным фактором в задачах волочения (и прессования), является наличие жестких зон, с которыми должно быть согласовано любое принятое поле скоростей. Иногда за такие границы принимают сферические поверхности, проходящие через окружности AB и CD с центрами в точке O. То, что в общем случае эти сферы не могут быть границами внешних зон, отмечено в [3].



а б

Рисунок 1. Схема деформации при волочении

Если существует поле скоростей, согласованное с движением жесткой внешней зоны и в зоне пластического течения, в любой точке N, рисунок 1а, заданы компоненты V_r, V_z, то существует такая поверхность, проходящая через AB (или CD), на которой выполнено условие непрерывности нормальной компоненты скорости, т.е. проекции на нормаль «n» к поверхности BMA. В любой точке M скорости V_r и V_z должны быть равны проекции на нормаль скорости жесткой зоны V_1или V_0. Это означает, что если в кольцевой зоне AOC, рисунок 1б принято поле скоростей V_r и V_z то проекции на нормаль «n» в точке M должны быть равны проекции скорости V_1 для передней внешней зоны и V_0 для задней внешней зоны.

Поскольку в пластической зоне $V_z = const, \varepsilon_z = \frac{\partial V_z}{\partial Z} = 0$, то $V_r = \frac{\mathrm{C}}{r}$, где C – постоянная и условие равенства проекции на нормаль определяем в любой точке границы внешней зоны, перемещающейся со скоростью V_1, рисунок 2.

$$V_1 \cdot cos\alpha = \text{-}\, V_z\, cos\alpha + V_1 \cdot sin\alpha,$$

где α - угол наклона касательной к оси r. При $V_z = -V_1$; $V_r = \frac{\mathrm{C}}{r}$

$(V_1 - V)\, cos\alpha = -\frac{\mathrm{C}}{r}\, sin\alpha$ или $tg\alpha = \frac{\partial Z}{\partial r} = \frac{(V_1+V_z)}{V_r}$ - это дифференциальное уравнение линии $Z(r)$, вращение которой определяет граничную поверхность (вращение вокруг оси Z).

Подробный анализ приведен в [1,3,4], здесь отметим, что

$$\frac{\partial Z}{\partial r} = -\frac{(V_1 - V)\, r}{C};\ Z = C_1 - \frac{(V_1 - V)\, r^2}{2C};$$

где C_1 - постоянная, определяемая из граничных условий; если при $r = R, z = 0$, то $C_1 = \frac{(V_1 - V)\, R^2}{2C}$. Для границы задней внешней зоны получаем уравнение

$$\frac{\partial z}{\partial r} = \frac{(V_1 - V)\, r}{C};\ z = C_2 + \frac{(V_1 - V)\, r^2}{2C}.$$

Условие $z = \mathrm{l}$ при $r = R_0$ определит $C_2 = -\frac{(V_1 - V)\, {R_0}^2}{2C}$. Зная V_z, V_r можно определить линии тока.

$$\frac{\partial z}{\partial r} = \frac{V \cdot r}{C};$$

$$z = C_3 + \frac{V\, r^2}{2C} = \frac{V}{2C}(\mathrm{r}^2 - \mathrm{R}_1^2) \qquad (1).$$

Видно, что это параболы.

Для удовлетворения кинематических краевых условий на поверхности матрицы ее форма должна описываться также одной из кривых класса (1) и определяет постоянную

$$C_3 = \frac{V}{2C}\left({R_0}^2 - \mathrm{R}_1^2\right) = \frac{V \cdot \mathrm{R}_1^2}{2C}\ (\lambda - 1);$$

$$\lambda = \left(\frac{\mathrm{R}_0}{\mathrm{R}_1}\right)^2.$$

Схема поля скоростей приведена на рисунке 2. Здесь границами жестких зон являются: параболоид AOB с уравнением

$$z_1 = l\left[1 + \frac{(V - V_0)}{V(\lambda - 1)}\left(\frac{r^2}{R_1^2} - \lambda\right)\right] = \frac{l}{\lambda - 1}\left[\frac{V_1}{V} - 1 + \frac{(V\lambda - V_1)}{V\lambda}\left(\frac{r^2}{R_1^2}\right)\right]$$

и параболоид COD с уравнением

$$z_2 = \frac{l(V_1 - V)}{V(\lambda - 1\ )}\left(1 - \frac{r^2}{R_1^2}\right).$$

Здесь же показаны произвольные точки на границах OAB и COD.

Уравнение параболы

$$\mathrm{ACDB} z_3 = \frac{l}{\lambda - 1}\left(\frac{r^2}{R_1^2} - 1\right)$$

Полная мощность включает мощности среза на параболоидах COD - N_1, AOB -

N_2; мощность формоизменения N_3 в кольцевой зоне, ограниченной параболоидами, а также мощности сил трения на BD.

При этом

$$N_1 = 2\pi k(V_1 - V)\int_0^{R_1} r\left[1+\left(\frac{\partial z_1}{\partial r}\right)^2\right]\left(\frac{\partial z_1}{\partial r}\right)^{-1}\partial r;$$

$$N_2 = 2\pi k(V - V_0)\int_0^{R_1} r\left[1+\left(\frac{\partial z_2}{\partial r}\right)^2\right]\left(\frac{\partial z_2}{\partial r}\right)^{-1}\partial r;$$

$$N_3 = 2\pi k\int_0^{R_1} r\left[\frac{VR_1^2(\lambda-1)}{lr^2}\right](z_1 - z_2)\,\partial r +$$

$$+2\pi k\int_{R_1}^{R_0} r\left[\frac{VR_1^2(\lambda-1)}{lr^2}\right](z_1 - z_3)\,\partial r$$

Здесь интенсивность тензора скорости деформации

$$H = \frac{2C}{r^2} = \frac{VR_1^2(\lambda-1)}{lr^2} \text{ при } V_r = \frac{C}{r};$$

$$V_z = const = V.$$

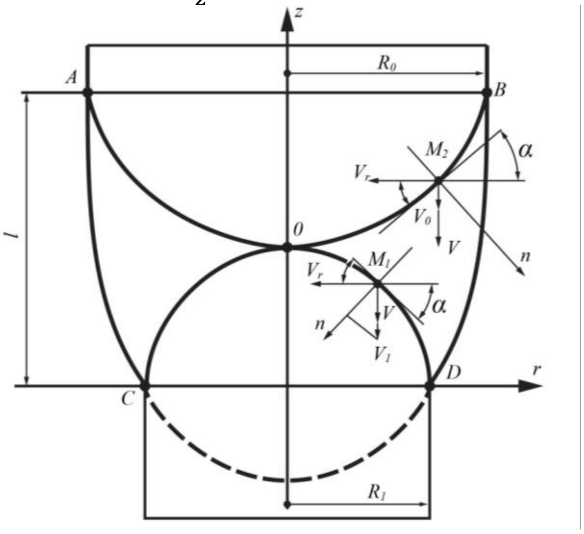


Рисунок 2. Схема кинематически допустимого поля скоростей

Мощность трения N_4 при скорости скольжения $\sqrt{V_r^2 + V^2} = V\sqrt{1 + \frac{(\lambda-1)^2 R_1^4}{4l^2 r^2}}$ и напряжении трения, равном (ψk), где $0 \le \psi \le 1$, ψ - постоянная, определяющая трение,

$$N_4 = 2\psi kV\int_{R_1}^{R_0} r\sqrt{1 + \frac{(\lambda-1)^2 R_1^4}{4l^2 r^2}}\sqrt{1 + \frac{4l^2 r^2}{(\lambda-1)^2 R_1^4}}\,\partial r.$$

Необходимо учесть мощность сил противонатяжения:

$$N_5 = \sigma_0 \frac{V_1}{\lambda}\pi R_0^2 = \sigma_0 \pi V_1 R_1^2.$$

Приравняем полную мощность мощности внешних сил

$$N = \sigma_1 \pi V_1 R_1^2 = N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5.$$

В результате расчетов получаем

$$\frac{\sigma_1}{2k} = \frac{\sigma_0}{2k} + 0{,}5ln\boldsymbol{\lambda} - \frac{4\alpha}{\mathbf{3}(\sqrt{\lambda}-\mathbf{1})} + \boldsymbol{A_1 x} + \frac{\boldsymbol{A_2}}{\boldsymbol{x}}, \quad (2)$$

где $\alpha = \frac{l_1}{R_1}$, а $x = \frac{V}{V_1}$ - варьируемый параметр, определяемый условием

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\sigma_1}{2k}\right) = 0;\ x_0 = \sqrt{\frac{A_2}{A_1}};$$

$$\frac{\sigma_1}{2k} = \frac{\sigma_0}{2k} + 0{,}5ln\boldsymbol{\lambda} - \frac{4\alpha}{\mathbf{3}(\sqrt{\lambda}-1)} + 2\sqrt{A_1 A_2};$$

$$A_1 = \frac{\sqrt{\lambda}-1}{2\alpha}\left[\sqrt{\lambda} + 1 + \psi(\sqrt{\lambda}-1)\right] +$$

$$+\frac{2\alpha}{3(\lambda-1)}\left[\lambda\sqrt{\lambda} + 1 + \psi(\lambda\sqrt{\lambda}-1)\right];$$

$$A_2 = \frac{2\alpha}{3\sqrt{\lambda}(\sqrt{\lambda}-1)}.$$

Можно перейти от параметров α, λ к параметрам $m = \frac{l}{R_0 + R_1} = \frac{\alpha}{\sqrt{\lambda}+1}$.

Как показывают сравнительные расчеты, можно принять не $x_0 = \sqrt{\frac{A_2}{A_1}}$, а $x = \frac{1}{\lambda}$, что не более, чем на 10% завышает результаты.

Тогда

$$\frac{\sigma_1}{2k} = \frac{\sigma_0}{2k} + 0{,}5\,ln\lambda + 0{,}5\ln\lambda + \frac{(\lambda-1)}{2\alpha\lambda}\left[\sqrt{\lambda} + 1 + \psi(\sqrt{\lambda}-1)\right]$$

$$+\frac{2}{3}\frac{\alpha}{\lambda}\left|\lambda - 1 + \frac{\psi(\lambda + \sqrt{\lambda} + 1)}{\sqrt{\lambda}+1}\right|;$$

или

$$\frac{\sigma_1}{2k} = \frac{\sigma_0}{2k} + f_1\ (\lambda) + \frac{f_2(\lambda)}{m} + f_3(\lambda)m; \quad (3),$$

где $f_1(\lambda) = 0{,}5\ ln\lambda$; $f_2(\lambda) = \frac{(\lambda-1)}{2\lambda}\left[1 + \right.$ $\left. + \frac{\psi(\lambda-1)}{\sqrt{\lambda}+1}\right]$;

$$f_3\ (\lambda) = \frac{2}{3\lambda}\left[(\lambda-1)(\sqrt{\lambda}+1) + \psi(\lambda + \sqrt{\lambda} + 1)\right].$$

Графики функций $\frac{\sigma_1}{2k}(\lambda)$ при $\psi = 0$ согласно формуле (2) приведены на рисунке 3, а по формуле (3) – на рисунке 4.

Все расчеты выполнены при $\sigma_0 = 0$, а участки кривых $\frac{\sigma_1}{2k}(\lambda)$ при $\frac{\sigma_1}{2k} \ge 1{,}0$ показаны тонкими линиями, так как они не отражают реально возможного процесса (внешняя жесткая зона не может выдержать напряжений растяжения, превышающих $2\,k$).

На рисунках 5 и 6 приведены графики функций $\frac{\sigma_1}{2k}(\lambda)$ по формуле (3) при $\psi = 0{,}1$ и $\psi = 0{,}2$.

Анализ большего количества расчетов показывает возможность упростить формулу (3), в частности, пренебречь влиянием ψ на функцию f_2 и записать

$$f_3\ (\lambda) = 2\psi + (\lambda - 1)(1 - 0{,}7\psi).$$

Тогда получаем основную расчетную формулу

$$\frac{\sigma_1}{2k} = \frac{\sigma_0}{2k} + \frac{\psi l_0}{R_1} +$$
$$+0,5\ln\lambda + \frac{\lambda - 1}{2\lambda m} + \qquad (4)$$
$$+m\left[2\psi + \left(1 - 0,7\psi\right)\left(\lambda - 1\right)\right]$$

Здесь учтено и наличие калибрующего пояска длиной l_0, на котором действует трение, равное (ψk).

Все полученные результаты относятся и к прессованию, если принять, рисунок 7, наличие в углу контейнера жесткой кольцевой зоны сечением BED, в которой $V_r = V_z = 0$. Форма зоны OBD пластического течения и ее граница BD в этом случае определяется не формой контейнера, соответствующей линии BED, а линией BD, являющейся при используемом поле скоростей параболой. Размер «l» не задан, в этом случае, как обычно при волочении, а определяется при расчетах из условия $\frac{\partial}{\partial l}(N) = 0$ или $\frac{\partial}{\partial l}\left(\frac{\sigma_1}{2k}\right) = 0$.

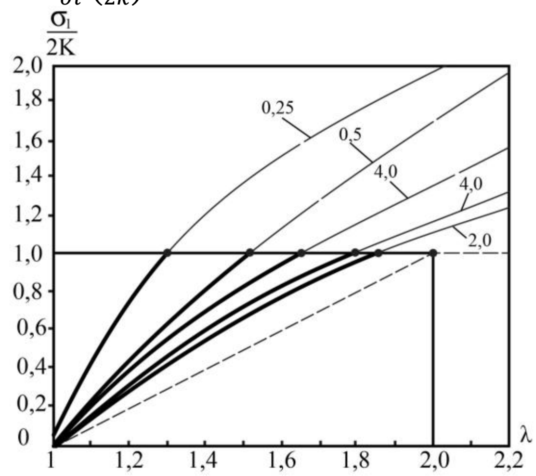


Рисунок 3. Графики $\frac{\sigma_1}{2k}(\lambda)$ для волочения при Ψ = 0 по формуле (2)

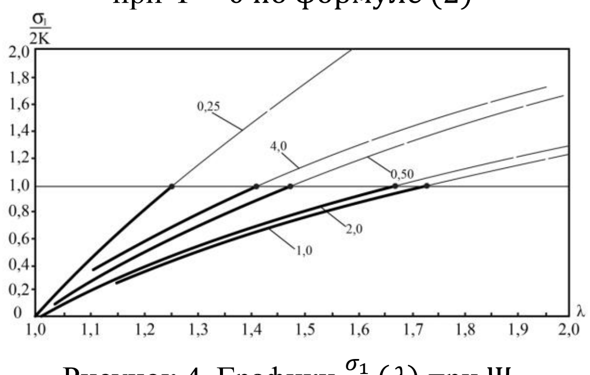


Рисунок 4. Графики $\frac{\sigma_1}{2k}(\lambda)$ при Ψ_0 по формуле (3)

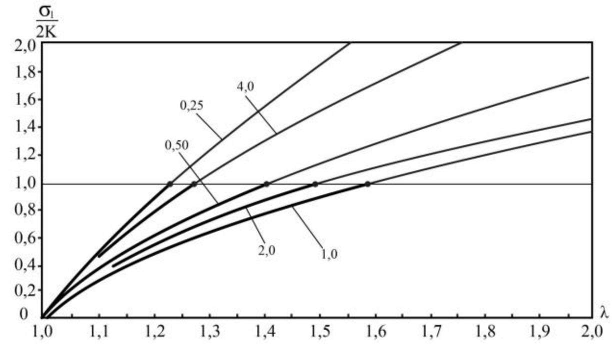


Рисунок 5. Графики $\frac{\sigma_1}{2k}(\lambda)$ при $\Psi = 0,1$

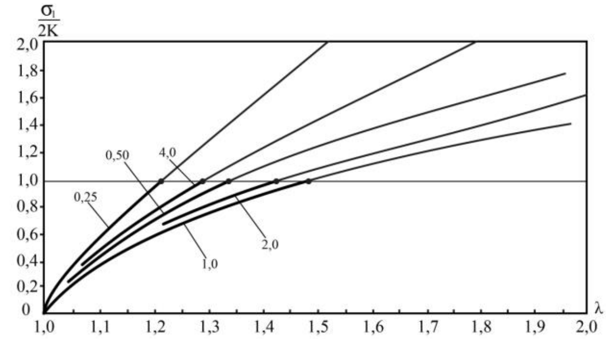


Рисунок 6. Графики $\frac{\sigma_1}{2k}(\lambda)$ при $\Psi = 0,2$

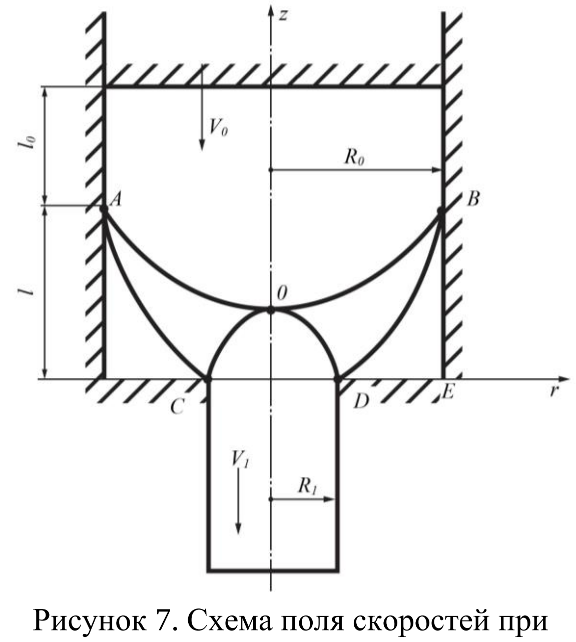


Рисунок 7. Схема поля скоростей при прессовании

При этом касательные напряжения на AC (BD), рисунок 7 равны «k» и надо принять $\psi = 1,0$, когда с учетом (4)

$$\alpha = \frac{\sqrt{3}}{2}(\sqrt{\lambda} + 1)\sqrt{\frac{\lambda - 1}{\sqrt{\lambda}\,(\sqrt{\lambda} + 2)}} \text{ и}$$

при $\sigma_1 = 0$

$$\left|\frac{\sigma_0}{2k}\right| = 0,5ln\lambda + 2\sqrt{\frac{2}{3}}\sqrt{\frac{(\lambda - 1)(\sqrt{\lambda} + 2)}{\sqrt{\lambda}}}$$

Согласно проведенным расчетам, можно использовать формулу, рисунок 8

$$\left|\frac{\sigma_0}{2k}\right| = \psi\frac{l_0}{R_0} + 2\sqrt{\lambda - 1} \qquad (5)$$

где l_0 - длина внешней зоны, рисунок 7.

Для получения нижней границы желательно построить статически допустимые поля напряжений. Такие поля представлены на рисунке 9. При волочении, рисунок 9а в цилиндре $0 < r \leq R$ ($-\infty < z < +\infty$) действуют напряжения $\sigma_z = \sigma_1$; $\sigma_r = 0$, а в кольцевом цилиндре $R_1 < r \leq R_0$; $\sigma_z = -\sigma_2, \sigma_r = 0$; ($\tau_{rz} = 0$ всюду).

Условия равновесия требуют (сумма сил, действующих на заднюю внешнюю зону, должна быть равна нулю),

$$\sigma_1 \pi R_1^2 = \sigma_2 \pi (R_0^2 - R_1^2), \sigma_1 = \sigma_2 (\lambda - 1).$$

Если $\lambda < 2{,}0$, что всегда имеет место при волочении, то $\sigma_1 < \sigma_2$ и наибольшее возможное значение $\sigma_2 = 2k$, откуда следует, что

$$\frac{\sigma_0}{2k} = \lambda - 1 \qquad (6).$$

При $\lambda > 2$ надо принять $\frac{\sigma_1}{2k} = 1$.

В случае прессования в цилиндре радиусом R_1 примем $\sigma_z = 0$,

$$\sigma_r = \sigma_\theta = \rho = const,$$

а в кольцевом цилиндре, при $R_1 \leq r \leq R_0$; $\sigma_r = \sigma_\theta = \rho = const, \sigma_z \neq 0$.

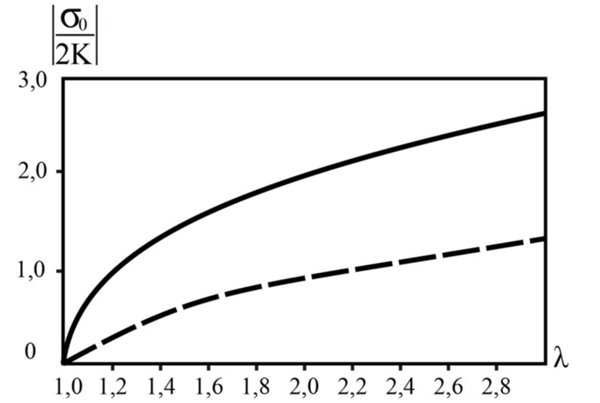
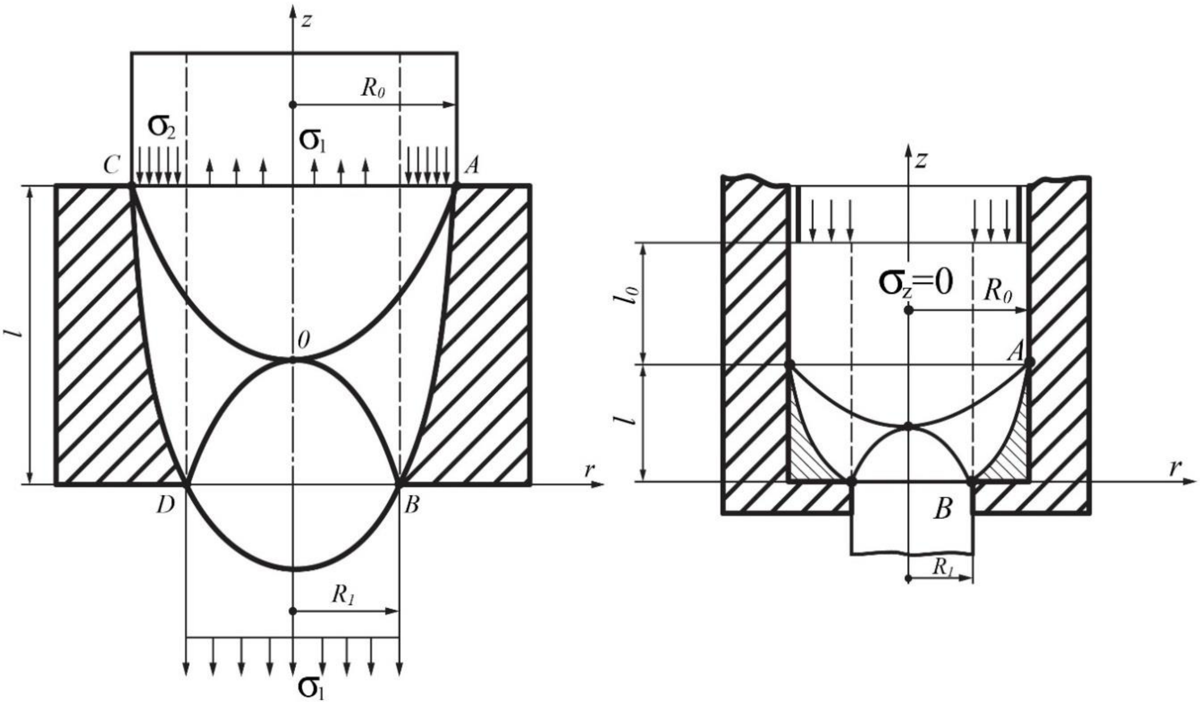


Рисунок 8. Графики функций $\frac{\sigma_0}{2k}$ для прессования



а б

Рисунок 9. Схемы полей напряжений:
а – при волочении; б – при прессовании

Из условия текучести Мизеса

$$(\rho - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \rho)^2, \sigma_z = -\left(\rho + k\sqrt{3}\right).$$

Из этого же условия Мизеса максимальное значение ρ (при $0 \leq r < R_1$) $\rho = 2k\sqrt{3}$, что определяет нижнюю границу напряжения прессования

$$\sigma_0 \pi R_0^2 = \sigma_z \pi (R_0^2 - R_1^2);$$

$$\left|\frac{\sigma_0}{2k}\right| = \frac{\sqrt{3}}{\lambda}(\lambda - 1) \qquad (7).$$

Линия, соответствующая (7), на рисунке 8 показана пунктиром.

Например, при $\lambda = 2{,}0$, согласно (6) (при $l_0 = 0$), $\frac{\sigma_0}{2k} = 2{,}0$, а согласно (7)

$\frac{\sigma_0}{2k} = \frac{\sqrt{3}}{2}$ =0,87, т.е. фактически величина 0,87≤ $\frac{\sigma_0}{2k} \leq 2{,}0$.

Получены критерии, позволяющие определить для любого кинематически допустимого поля скоростей, совместимо ли оно с движением жестких зон. Показано, что для прямолинейных образующих матриц существует кинематически допустимое поле скоростей с линиями тока в виде гипербол. Однако, здесь эти данные не приводим, поскольку различия, а следовательно, и влияние формы матрицы невелики, поэтому можно применять формулу (4), как для матриц параболической формы, так и для конических с прямолинейными образующими.

Заключение

Теоретическое исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Получены формулы для определения верхней (и нижней) оценки усилий при волочении и прессовании.

2.ля практических расчетов может быть использована простая формула (4).Из нее следует, что влияние трения при волочении очень существенно. Так, например, если m=1,0;$\lambda = 1{,}2$; ψ =0, то $\frac{\sigma_1}{2k} = 0{,}375$. А при увеличении в этих же условиях трения до ψ =0,1 $\frac{\sigma_1}{2k} = 0{,}547$, т.е. напряжения возрастут в 1,45 раз.

Поэтому, одним из важных направлений совершенствования технологии является усовершенствование системы смазки и снижение сил трения.

Библиографический список

1. Brovman T.V. *Proektirovanie svarnux dwusloinux truboprovodov* [Design of welded double layer pipelines] *Svarka.Mejdunarodnay* [Welding International], 2012, no. 26, № 7, pp. 553-554.
2. Константинов И.Л., Сидельников С.Б. Основы технологических процессов обработки металлов давлением. Учебник.– Красноярск: СФУ, 2015. - 488 С.
3. Хилл Р.Математическая теория пластичности. М.:Гостехтеориздат, 1956. 467с.
4. Кохан Л.С., Морозов Ю.А. Исследование кинематических и деформационных параметров безоправочного волочения // Строительная механика конструкций и сооружений. 2014. №1. С. 39-44.
5. Орлов, Г. А. Основы теории прокатки и волочения труб: учебное пособие / Г. А. Орлов. - Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. - 204 с.
6. Основы технологических процессов обработки металлов давлением: учебное пособие / Г. В. Шимов, С. П. Буркин; под общ. ред. С. П. Буркина. − Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014.− 160 с.

Information about the paper in English

T.V. Brovman
Tver State Technical University
E-mail: brovman@mail.ru
Received 15.11.2021

DEVELOPING NEW METHODS TO CALCULATE POWER PARAMETERS OF DRAWING AND PRESSING

Abstract

A drawing tool design is characterized by the required constant supply of lubrication to the deformation zone. The paper describes a die design, where the deformation zone surface is spiral. At high drawing force there is a screw-type gap along a total matrix, where lubrication is pumped. The theoretical calculations provided criteria used to determine a kinematically admissible velocity field compatible with movement of rigid zones.

Keywords: drawing, pressing, deformation load, die lubrication.