

УДК 621.7: 593.3

Г.Л. Колмогоров, А.О. Уткин

Пермский национальный исследовательский политехнический
университет, Пермь, Россия

МЕХАНИКА ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И ОПТИМИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ

Рассмотрены условия пластического деформирования при гидромеханическом прессовании как одной из разновидностей процесса прессования. Отличительной характеристикой гидромеханического прессования от других его видов является возможность контролировать движение заготовки и предотвращать ее выстреливание в конечной стадии прессования, что характерно для других видов прессования. Получены формулы составляющих общего напряжения гидромеханического прессования и оптимального угла конусности матрицы прессового инструмента. Проведена оптимизация углов матрицы для гидромеханического прессования. Построены зависимости отношения напряжения прессования к сопротивлению деформации прессуемого материала от вытяжки, из которых следует наличие оптимальных углов конусности прессовых матриц.

Ключевые слова: гидромеханическое прессование, оптимизация, геометрия прессового инструмента, минимальное трение, вытяжка.

G.L. Kolmogorov, A.O. Utkin

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

MECHANIC OF PLASTIC DEFORMATION AND OPTIMIZATION OF HYDRO-PRESSING CONDITIONS

In work conditions of plastic deformation are considered at hydromechanical pressing, as one of versions of process of pressing. An excellent condition of hydromechanical pressing from other types of pressing is the possibility to supervise movement of preparation and to prevent it flying in a final stage of pressing that is characteristic for other types of pressing. Formulas of components of the general pressure of hydromechanical pressing and optimum angle cone matrixes a press the tool are received. Optimization of angles of a matrix for hydromechanical pressing is lead. Dependences of the attitude of a pressure of pressing to resistance of deformation of a pressed material from an extract from which availability of optimum angles cone a press matrixes follows are constructed.

Keywords: hydro-mechanical pressing, optimization, geometry of press tool, minimum friction, extrusion.

Введение

При производстве прутковых изделий из труднодеформируемых металлов и сплавов, к которым относится ряд цветных металлов, находит применение гидромеханическое прессование как одна из разновидностей процесса прессования. Как и для других видов прессования, для гидромеханического характерна благоприятная схема напряженного состояния с преобладающим действием сжимающих напряжений, что способствует повышению пластических свойств обрабатываемого материала и росту возможности реализации значительных пластических деформаций без опасности разрушения заготовки [1–7].

Положительным моментом гидромеханического прессования является возможность контролировать движение заготовки и предотвращать ее выстреливание в конечной стадии прессования, что характерно для других видов прессования [3–4].

Данные преимущества позволяют деформировать такие материалы и сплавы на их основе, как молибден, вольфрам, тантал, ниобий и др., которые имеют низкую пластичность при традиционных методах обработки металлов давлением. Преимуществом гидропрессования применительно к тугоплавким металлам является возможность формирования новой структуры, обеспечивающей комплекс высоких физико-механических и эксплуатационных свойств [2].

При гидропрессовании, происходящем при комнатной температуре или незначительном подогреве, обеспечивается дробление зерен металла на мельчайшие блоки размером до 0,2–0,3 мкм [8], что приближает данные технологии к современным нанотехнологиям. Актуальной задачей при этом является обеспечение минимальных усилий деформирования.

1. Методика исследования

Одной из актуальных проблем гидромеханического прессования является оптимизация геометрии технологического инструмента, обеспечивающей минимальные энергозатраты при прессовании. Схема гидромеханического прессования приведена на рис. 1.

Прутковая заготовка 1 с диаметром d_0 помещается в контейнер 2 с внутренним диаметром d_k и прессуется с помощью пуансона 3 через коническую матрицу 4 до диаметра d_1 усилием P . Зазор 5 между заго-

товкой и контейнером заполняется рабочей средой, выполняющей одновременно и роль смазки. Наличие данного зазора, заполненного смазкой, также является весьма перспективным, поскольку заполненный смазкой зазор может выполнять функцию нагнетателя смазки в зону деформации, обеспечивая при определенных условиях гидродинамический режим смазки с минимальным коэффициентом трения [9].

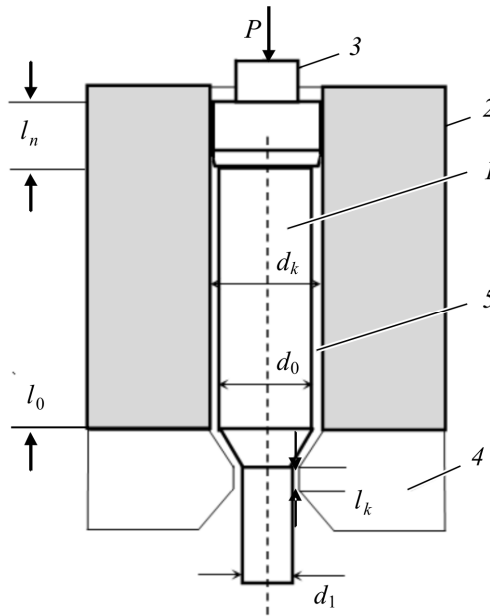


Рис. 1. Схема гидродинамического прессования

Основными параметрами, определяющими энергосиловые характеристики гидродинамического прессования, являются усилие прессования, коэффициенты вытяжки и трения в зоне деформации, угол наклона образующей матрицы к оси прессования, сопротивление деформации материала заготовки.

Усилие прессования приводится при этом к среднему напряжению прессования:

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{P}{F_0}, \quad (1)$$

где F_0 – площадь сечения исходной заготовки.

Полное усилие прессования определяется суммой отдельных составляющих [10]:

$$P = T_{\text{кр}} + T_{\text{м}} + T_{\text{пл}} + T_{\text{к}}, \quad (2)$$

где $T_{\text{кр}}$ – результирующая сил трения на поверхности контейнера; $T_{\text{м}}$ – результирующая сил трения в зоне деформации на поверхности контакта прессовой матрицы и заготовки; $T_{\text{пл}}$ – усилие, затраченное на пластическую деформацию; $T_{\text{к}}$ – результирующая сил трения на поверхности калибрующего пояса матрицы.

Рассмотрим по отдельности составляющие уравнения (2). Результирующая сил трения на поверхности контейнера равна

$$T_{\text{кр}} = \pi d_0 \tau_{\text{кр}} l_{\text{п}}, \quad (3)$$

где $l_{\text{п}}$ – длина рабочей части пуансона; $\tau_{\text{кр}}$ – касательные напряжения трения на контакте пуансон – контейнер.

Между пуансоном и контейнером существуют некоторый зазор, через который при прессовании будет выдавливаться излишний объем рабочей среды. Для рабочей среды, описываемой уравнением ньютоновской среды, среднее касательное напряжение будет равно

$$\tau_{\text{кр}} = \mu \frac{v}{h_{\text{п}}}, \quad (4)$$

где μ – динамическая вязкость рабочей среды; v – скорость перемещения пуансона; $h_{\text{п}}$ – зазор между пуансоном и контейнером.

Тогда из соотношения (3) с учетом выражения (4) имеем:

$$T_{\text{кр}} = \pi d_0 \mu \frac{v}{h_{\text{п}}} l_0,$$

где l_0 – свободная длина заготовки.

Данному значению $T_{\text{кр}}$ соответствует напряжение

$$\sigma_{\text{кр}} = \mu \frac{v}{h_{\text{п}}} \frac{l_0}{d_0}. \quad (5)$$

Напряжение, затрачиваемое на пластическую деформацию заготовки, составит [10]

$$\sigma_{\text{пл}} = \sigma_s \int_0^{\varepsilon} d\varepsilon, \quad (6)$$

где σ_s – сопротивление деформации прессуемого материала; ε – степень деформации при прессовании.

Средняя по сечению степень деформации в коническом прессовом инструменте определяется коэффициентом вытяжки и дополнительными деформациями сдвига на входе и выходе заготовки из конического инструмента [9]:

$$\varepsilon_{\text{ср}} = Ln\lambda + \frac{4}{3\sqrt{3}} \text{tg}\alpha_m, \quad (7)$$

где $\lambda = \frac{d_0^2}{d_1^2}$ – коэффициент вытяжки; d_0 и d_1 – диаметры заготовки на входе и выходе соответственно; α_m – угол наклона образующей конического канала матрицы к оси прессования.

Для усредненного значения сопротивления деформации обрабатываемого материала определяется напряжение, связанное с пластической деформацией. С учетом соотношения (7) напряжение пластического деформирования будет равно

$$\sigma_{\text{пл}} = \sigma_s (Ln\lambda + 0,77 \text{tg}\alpha_m). \quad (8)$$

В свою очередь, проекция результирующей силы трения на ось прессования для конической поверхности рабочей части матрицы выглядит так:

$$T_M = \tau_M F_M \cos \alpha_m = F_M f \sigma_s \cos \alpha_m, \quad (9)$$

где τ_M – среднее напряжение трения на контакте заготовка – матрица; F_M – площадь поверхности конической части матрицы, контактирующей с поверхностью заготовки; f – коэффициент трения в зоне деформации.

Из геометрических соотношений для конической части матрицы имеем:

$$F_M = \frac{\pi d_1^2}{\sin \alpha_m} (\lambda^2 - 1), \quad (10)$$

что после подстановки в соотношение (8) дает

$$\sigma_M = f\pi\sigma_s d_1^2 (\lambda - 1) \operatorname{ctg} \alpha_M. \quad (11)$$

Составляющая напряжения от сил трения в матрице в общем напряжении прессования при этом будет равна

$$\sigma_{\text{пр}} = f\sigma_s \frac{\lambda - 1}{\lambda} \operatorname{ctg} \alpha_M. \quad (12)$$

Результирующая сил трения на поверхности калибрующего пояска матрицы равна

$$T_K = \pi d_1^2 f \sigma_s l_K,$$

где l_K – длина калибрующего пояска матрицы, откуда следует, что

$$\sigma_K = f\sigma_s \frac{l_K}{\lambda}. \quad (13)$$

В итоге среднее напряжение гидродинамического прессования будет определяться суммой выражений (5), (8), (11) и (13).

При пластической деформации в конических инструментах (волочение, прессование) существуют оптимальные углы конусности инструмента, при которых энергозатраты будут минимальны. При гидромеханическом прессовании углы конусности матрицы входят в напряжения $\sigma_{\text{пл}}$ и σ_M , поэтому для определения оптимальных углов используем условие

$$\frac{\partial}{\partial \operatorname{tg} \alpha_M} (\sigma_{\text{пр}} + \sigma_M) = 0. \quad (14)$$

Продифференцировав выражения (8) и (11) по $\operatorname{tg} \alpha_M$, получим после преобразований следующие:

$$\alpha_M^{\text{опт}} = \operatorname{arctg} \left(1,14 \sqrt{\frac{f(\lambda - 1)}{\lambda}} \right). \quad (15)$$

Из выражения (15) следует, что оптимальный угол конусности матрицы не зависит от сопротивления деформации прессуемого материала и определяется лишь коэффициентом трения в зоне деформации и коэффициентом вытяжки.

Соотношение (15) положено в основу патента РФ «Способ прессования заготовок»¹.

2. Результаты исследования и их обсуждение

По формуле (15) рассчитаны оптимальные значения углов при гидромеханическом прессовании. На рис. 2 приведены результаты расчета отношения $\frac{\sigma_{пл}}{\sigma_s}$ в зависимости от вытяжки для различных коэффициентов трения. Из рис. 2 следует наличие оптимальных углов конусности прессовых матриц.

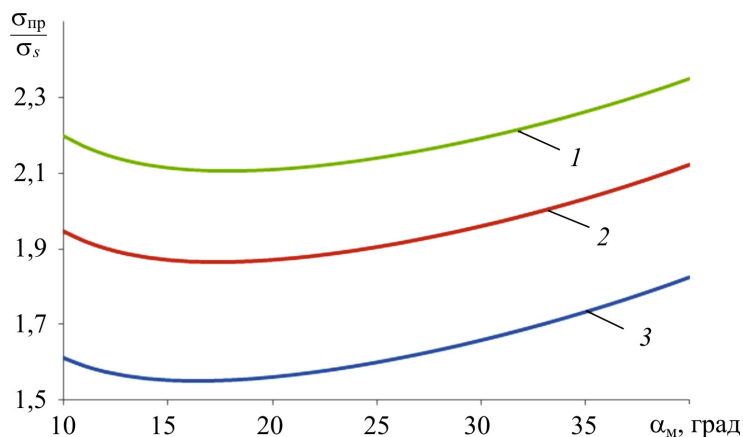


Рис. 2. Зависимость $\frac{\sigma_{пл}}{\sigma_s}$: 1 – $\lambda = 5$; 2 – $\lambda = 4$; 3 – $\lambda = 3$

Заключение

В данной работе получена аналитическая зависимость удельного давления при гидромеханическом прессовании, учитывающая основные параметры технологического процесса. Предложена формула для определения оптимального угла конусности технологической матрицы, защищенная патентом Российской Федерации.

¹ Способ прессования заготовок: пат. № 2526346 Рос. Федерация / Г.Л. Колмогоров, Н.А. Кошелева, В.Н. Трофимов, Т.В. Чернова. Заяв. 20.08.2014.

Список литературы

1. Уральский В.И., Плахотин В.С., Шефтель Н.И. Деформация металлов жидкостью высокого давления. – М.: Metallurgiya, 1976.
2. Гидропрессование труднодеформируемых тугоплавких материалов и сплавов / Г.Л. Колмогоров, В.Г. Михайлов, Ю.А. Барков, В.Л. Карлинский. – М.: Metallurgiya, 1991.
3. Береснев Б.И., Езерский К.И., Трушин Е.В. Физические основы и практическое применение гидроэкструзии. – М.: Metallurgiya, 1981.
4. Гидропрессование / Б.И. Береснев, А.Т. Гайворонский, В.К. Замараев, А.А. Хаматов. – Екатеринбург, 1998.
5. Колпашников А.П., Вялов В.А. Гидропрессование металлов. – М.: Metallurgiya, 1973.
6. Джонсон В., Кудо Х. Механика процесса выдавливания металла. – М.: Metallurgiya, 1965.
7. Агапитова О.Ю., Залазинский А.Г. Моделирование и оптимизация процесса гидромеханического выдавливания труднообрабатываемых металлов // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2015. – № 5. – С. 44–49.
8. Мальцев М.Е., Доронькин Е.Д., Езерский К.М. Гидростатическая обработка тугоплавких металлов. – М.: Metallurgiya, 1978.
9. Колмогоров Г.Л. Гидродинамическая смазка при обработке металлов давлением. – М.: Metallurgiya, 1986.
10. Перлин И.Л., Райтбарг Л.Х. Теория прессования металлов. – М.: Metallurgiya, 1964.

References

1. Ural'skii V.I., Plakhotin V.S., Sheftel' N.I. Deformatsiia metallov zhidkost'iu vysokogo davleniia [Deformation of metals by a liquid of a high blood pressure]. Moscow: Metallurgiiia, 1976.
2. Kolmogorov G.L., Mikhailov V.G., Barkov Iu.A., Karlinskii V.L. Gidropressovanie trudnodeformiruemykh tugoplavkikh materialov i spлавov [Hydropressing of difficultly deformable refractory materials and alloys]. Moscow: Metallurgiiia, 1991.
3. Beresnev B.I., Ezerskii K.I., Trushin E.V. Fizicheskie osnovy i prakticheskoe primeneniye gidroekstruzii [Physical bases and practical pressing application]. Moscow: Metallurgiiia, 1981.
4. Beresnev B.I., Gaivoronskii A.T., Zamaraev V.K., Khamatov A.A. Gidropressovanie [The hydropressing]. Ekaterinburg, 1998.
5. Kolpashnikov A.P., Vialov V.A. Gidropressovanie metallov [The hydropressing of metals]. Moscow: Metallurgiiia, 1973.

6. Dzhonson V., Kudo H. Mekhanika protsessa vydavlivaniia metalla [Mechanics of process of expression of metal]. Moscow: Metallurgiiia, 1965.

7. Agapitova O.Iu., Zalazinskii A.G. Modelirovanie i optimizatsiia protsessa gidromekhanicheskogo vydavlivaniia trudnoobrabatyvaemykh metallov [Modelling and optimization of process of hydromechanical expression of difficultly processable metals]. Izvestiia vuzov. Tsvetnaia metallurgiiia, 2014, no. 8. pp. 44-49.

8. Mal'tsev M.E., Doron'kin E.D., Ezerskii K.M. Gidrostatischeiskaia obrabotka tugoplavkikh metallov [Hydrostatic processing of refractory metals.]. Moscow: Metallurgiiia, 1978.

9. Kolmogorov G.L. Gidrodinamicheskaia smazka pri obrabotke metallov davleniem [Hydrodynamical greasing at processing metals by pressure]. Moscow: Metallurgiiia, 1986.

10. Perlin I.L., Raitbarg L.H. Teoriia pressovaniia metallov [The theory of pressing of metals]. Moscow: Metallurgiiia, 1964.

Получено 16.08.2016

Об авторах

Колмогоров Герман Леонидович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Динамика и прочность машин», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, заслуженный работник высшей школы, действительный член РАЕН (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: dpm@pstu.ru).

Уткин Андрей Олегович (Пермь, Россия) – магистрант кафедры «Динамика и прочность машин», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: Flaymel@yandex.ru).

About the authors

German L. Kolmogorov (Perm, Russian Federation) – Ph.D. Engineering Sciences, Department of Dynamics and Strength of Machines, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: dpm@pstu.ru).

Andrei O. Utkin (Perm, Russian Federation) – Master Student, Department of Dynamics and Strength of Machines, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: flaymel@yandex.ru).