

# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.97

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-2-35-39>

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ШТАМПОВКИ ГОЛОВОК БОЛТОВ С ТОРЦЕВОЙ ЛУНКОЙ

Железков О.С.<sup>1</sup>, Галиахметов Т.Ш.<sup>2</sup>, Стеблянко В.Л.<sup>1</sup><sup>1</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия<sup>2</sup> Белебеевский завод «Автономаль», Белебей, Россия

### Аннотация

Доля импорта в потреблении крепежных изделий в Российской Федерации в 2014 г. составила 46%. В основном, это стержневые изделия с головками (болты и винты). Расширение производства крепежных изделий с головками является важной задачей отечественной промышленности. Повысить эффективность производства болтов возможно за счет совершенствования конструкции изделий и применения малоотходных технологий. Цель работы – разработка математической модели и расчет энергосиловых параметров малоотходного процесса штамповки головок болтов с торцевой лункой. Используя вариационный метод, решена задача определения энергосиловых параметров процесса штамповки головок болтов с торцевой лункой. Реологические свойства штампуемого металла задавались в виде модели жесткопластической среды с нелинейным упрочнением. Кривая упрочнения описывалась экспоненциальной зависимостью. Рассматривался конечный этап деформирования, когда производится окончательная штамповка с перемещением инструмента на малую величину. Деформируемый на конечном этапе штамповки объем разбивался на жесткую и пластическую области. Задавались функции перемещений и составлялся функционал полной работы деформации. Поиск минимума полной работы деформации осуществляли численными методами с использованием специально разработанной программы. По результатам расчетов построена номограмма, позволяющая определять удельные усилия штамповки головок с торцевой лункой в зависимости от относительных размеров головки для марок стали, наиболее широко применяемых при изготовлении болтов. Результаты исследования использовались при разработке малоотходных технологий изготовления опытных партии болтов М 16×50 (ГОСТ 7798-70) и путевых шурупов ЦП-54 (ТУ 1293-165-0112432-2003) с торцевой лункой. Применение разработанных технологий обеспечивает экономию металла 3–6%.

**Ключевые слова:** штамповка головок болтов, торцевая лунка, вариационный метод, функции перемещений, энергосиловые параметры, усилия штамповки.

### Введение

По данным Министерства промышленности и торговли РФ, доля импорта в потреблении крепежных изделий в 2014 г. составила 46%, причем, в основном, это стержневые изделия с головками (болты и винты) [1]. Поэтому расширение производства крепежных изделий с головками является важной задачей отечественной промышленности. При этом повысить эффективность производства возможно за счет совершенствования конструкции изделий и применения малоотходных технологий.

Цель работы – разработка математической модели и расчет энергосиловых параметров процесса штамповки головок болтов с торцевой лункой для реализации малоотходной технологии на высокопроизводительном автоматическом оборудовании.

### Материалы и методы исследования

В нормативно-технической документации на стержневые крепежные изделия с многогранными головками (ГОСТ 7798-70, ГОСТ 7805-70 и др.) заложены варианты исполнения, в которых предусмотрено выполнение на торце головки лунки цилиндрической формы с диаметром (0,7–0,8) размера «под ключ» и глубиной (0,2–0,4) высоты головки [2–3]. В основном такие болты изготавливаются с использованием безоблойной штамповки. Однако качество болтов, изготовленных по такой технологии, низкое в связи с плохим оформлением ребер шестигранника. С целью снижения расхода металла и металлоемкости изделий без ухудшения качества предложено вначале штамповать головку цилиндрической формы с углублением на торце, а затем обрезать её на шестигранник. Процессы штамповки головок с углублением на торце по сравнению с традиционными технологиями связа-

ны с ростом технологических усилий, что необходимо учитывать при выборе оборудования и проектировании инструмента.

Анализ известных методов и методик определения усилий пластического деформирования [4, 5] показал, что для определения энергосиловых параметров процесса штамповки головок болтов с торцевой лункой можно использовать вариационный метод в дискретной постановке [6, 7]. Сущность метода заключается в том, что процесс деформирования условно разбивается на два этапа. При этом считается, что на начальном этапе деформации имеют конечную величину, а в деформируемом теле возникает неравномерность деформации, которая определяется экспериментально или аналитически. На конечном этапе штамповки деформации малы, что позволяет использовать соотношения деформационной теории пластичности. Реология свойств штампуемого металла [8] задавалась в виде модели жесткопластической среды с нелинейным упрочнением, а кривая упрочнения описывалась экспоненциальной зависимостью по Г.А. Смирнову-Аляеву [9]

$$\sigma_s = M - Ce^{-e_i} - Be^{-Ne_i}, \quad (1)$$

где  $e_i$  – степень деформации;  $M$ ,  $C$ ,  $B$ ,  $N$  – параметры, определяемые из опытов на растяжение или сжатие.

При штамповке головки с углублением на торце заготовка, установленная в отверстии матрицы 1 (радиус отверстия  $R_0$ ), деформируется пуансоном 2, у которого на торце выполнены цилиндрический выступ 3 (радиус  $R$  и высота  $h_1$ ) и коническая поверхность 4 для формирования фаски (рис. 1). В соответствии с используемым вариационным методом в дискретной постановке рассматривался конечный этап деформирования, когда практически сформирована головка, требуемых формы и размеров, и производится доштамповка с перемещением инструмента на малую величину  $\Delta h$ . При этом в выбранной системе осей координат ( $r$ ,  $z$ ,  $\varphi$ ) (начало координат т.  $O$  находится посередине расстояния между торцевой рабочей поверхностью матрицы 1 и торцом выступа 3 пуансона 2) принято, что пуансон перемещается вниз на величину  $\Delta h/2$ , а матрица – вверх на величину  $\Delta h/2$ .

Весь деформируемый на конечном этапе штамповки объем разбивался на жесткую и пластическую области. Жесткая область, в которой на конечном этапе деформирования металл не течет, находится между боковой поверхностью выступа 3 и конической поверхностью 4 пуансона 2. Граница раздела между жесткой и пластической зонами в принятой системе осей координат

$$h_r = \frac{H-h}{(R_1^2 - R^2)}(r^2 - R^2) + h. \quad (2)$$

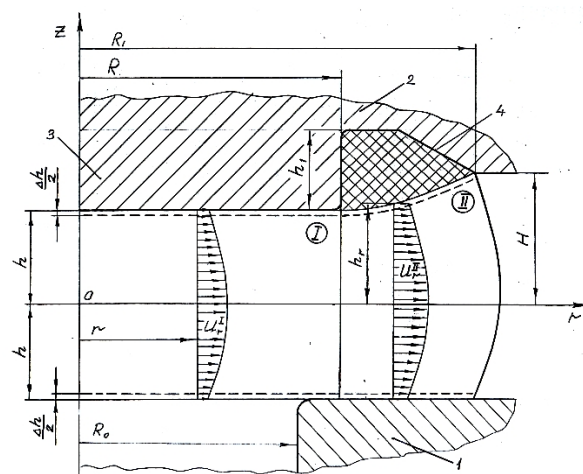


Рис. 1. Схема течения металла на конечном этапе штамповки головки с лункой

Вся пластическая область, в свою очередь, разбивалась на две зоны. Пластическая зона I находится под выступом 3 пуансона и представляет собой цилиндрическую поверхность с радиусом  $R$  и высотой  $2h$ . Границы зона I  $r = 0 \div R$ ,  $z = -h \div h$ .

Пластическая зона II ограничена цилиндрическими поверхностями с радиусами  $R$  и  $R_1$ , торцевой плоскостью матрицы и параболической поверхностью границы раздела жесткой и пластической зон конической поверхностью пуансона и параболической поверхностью (1) раздела с жесткой областью. То есть границы пластической зоны II  $r = R \div R_1$ ,  $z = -h \div h_r$ .

В соответствии с применяемым методом Ритца функция радиальных перемещений для пластической зоны I задавалась в виде

$$U_r = \frac{\Delta h}{4 \cdot h} \cdot r + a \cdot r \cdot \left( \frac{1}{3} - \frac{z^2}{h^2} \right). \quad (3)$$

Выбранная функция отвечает граничным условиям, близка к реальному течению металла на конечном этапе деформирования. Используя соответствующие уравнения Коши и условие несжимаемости, определяли функцию вертикальных перемещений

$$U_z = \left[ \frac{\Delta h}{2 \cdot h} \cdot z + \frac{2}{3} \cdot a \cdot z \left( 1 - \frac{z^2}{h^2} \right) \right]. \quad (4)$$

Для пластической зоны II функции радиальных и вертикальных перемещений задавались в виде

$$U_r = \frac{\Delta h}{4 \cdot h_r} \cdot r + a \cdot r \cdot \left( \frac{1}{3} - \frac{z^2}{h_r^2} \right); \quad (5)$$

$$U_z = - \left\{ \frac{\Delta h z}{2 \cdot h_r} - \frac{\Delta h \cdot r z}{2 h_r^2} D + \frac{2}{3} a z \left( 1 - \frac{z^2}{h_r^2} \right) + \frac{2}{3} a \cdot r \cdot \frac{z^3}{h_r^3} D \right\}, \quad (6)$$

$$\text{где } D = \frac{dh_r}{dr} = 2r \frac{H-h}{R_1^2 - R^2}.$$

По известным  $U_r$ ,  $U_z$  для каждой зоны определялись компоненты тензора деформации  $\varepsilon_r$ ,  $\varepsilon_z$ ,  $\varepsilon_\varphi$ ,  $\gamma_{rz}$  и интенсивность деформации  $\varepsilon_i$  на конечном этапе штамповки.

Работа внутренних сил для пластической зоны I на конечном этапе штамповки определялась как

$$A_{b1} = \int_0^{2\pi} \int_0^R \int_{-h}^h W r d\varphi dr dz. \quad (7)$$

Для пластической зоны II

$$A_{b2} = \int_0^{2\pi} \int_R^{R_1} \int_{-h}^{h_r} W r d\varphi dr dz. \quad (8)$$

Для пластической зоны III

$$A_{b3} = \int_0^{2\pi} \int_R^{R_2} \int_{-h}^h W r d\varphi dr dz. \quad (9)$$

В уравнениях (7)–(9)  $W$  – удельная работа внутренних сил, которая определялась по формуле

$$W = \left[ M \varepsilon_i - C e^{-\varepsilon_{i0}} (1 - e^{-\varepsilon_i}) - \frac{B}{N} e^{-N \varepsilon_{i0}} (1 - e^{-N \varepsilon_i}) \right]. \quad (10)$$

Работа сил трения на поверхности контакта металла с пуансоном

$$A_{t1} = \int_0^{2\pi} \int_0^R U_{|F_1} \tau r d\varphi dr, \quad (11)$$

где  $U_{|F_1} = U_{r|z=h}$  – перемещение металла по поверхности контакта с пуансоном.

Работа сил трения на поверхности контакта металла с матрицей

$$A_{t2} = \int_0^{2\pi} \int_0^{R_1} U_{|F_2} \tau r d\varphi dr, \quad (12)$$

где  $U_{|F_2} = U_{r|z=-h}$  – перемещение металла по поверхности контакта с матрицей.

В уравнениях (11), (12)  $\tau = \psi \tau_s$ , где  $\tau_s$  – предел текучести при сдвиге, который определялся по методике [10].

Полная работа деформации на конечном этапе штамповки определялась как сумма работ внутренних сил  $A_{b1}$ ,  $A_{b2}$  и сил трения  $A_{t1}$ ,  $A_{t2}$ . Поиск минимума полной работы деформации  $A^{\min}$  осуществлялся численными методами с использованием специально разработанной программы. По найденным значениям минимальной полной работы деформации  $A^{\min}$  определялись усилия штамповки  $P$  и удельные усилия  $p = P/F_0$ , где  $F_0 = \pi R_1^2$ . По результатам расчетов построена номограмма (рис. 2), позволяющая определять удельные усилия  $p$  штамповки головок с торцевой лункой в зависимости от относительных размеров изделий для марок стали (10, 10кп, 20, 35, 40Х), наиболее широко применяемых при изготовлении болтов.

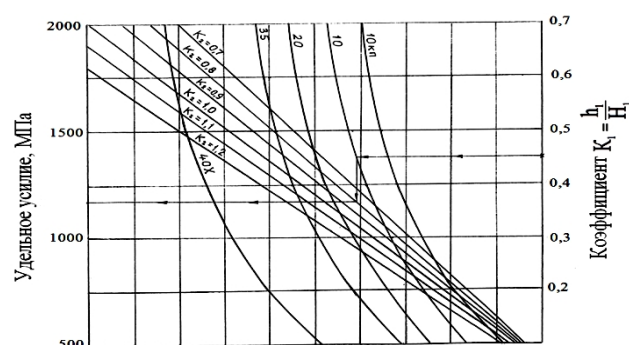


Рис. 2. Номограмма определения удельных усилий штамповки головок с лункой

## Выводы

1. Используя вариационный метод в дискретной постановке, разработана математическая модель и выполнены расчеты энергосиловых параметров процесса штамповки головок болтов с торцевой лункой.

2. Результаты исследования использовались при разработке малоотходных технологий изготовления опытных партии болтов М 16×50 (ГОСТ 7798-70) и путевых шурупов ЦП-54 (ТУ 1293-165-0112432-2003) с торцевой лункой. Применение разработанных технологий обеспечивает экономию металла 3–6%.

## Список литературы

1. Приказ Министерства промышленности и торговли РФ № 65 2 от 31.03.2015 «Об утверждении плана мероприятий по импортозамещению в отрасли черной металлургии Российской Федерации». М., 2015.
2. Мокринский В.И., Железков О.С. Новые прогрессивные виды и технологические процессы изготовления крепежных изделий // Метизное производство. 1990. Вып. 2. С. 22.
3. Мокринский В.И. Производство болтов холодной объемной штамповкой. М.: Металлургия, 1978. 78 с.

4. Развитие теории и технологии проектирования машин, агрегатов и инструмента в процессах обработки давлением и резания / С.И. Платов, Н.Н. Огарков, Д.В. Терентьев, О.С. Железков, В.В. Рубаник, Ж.П. Вассал // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1. С. 112–114.
5. Константинов Д.В., Корчунов А.Г. Мультимасштабное компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. № 1. С. 36–42.
6. Паршин В.Г., Поляков М.Г., Железков О.С. Метод определения усилий холодной высадки головок болтов и винтов // Черная металлургия: Бюл. ин-та Черметинформация. 1975. № 12. С. 48–49.
7. Паршин В.Г., Железков О.С. Определение усилий холодной объемной штамповки осесимметричных деталей // Изв. вузов. Черная металлургия. 1980. № 3. С. 86–89.
8. Реологические модели как основной элемент моделирования процессов обработки металлов давлением / О.М. Смирнов, С.А. Тулунов, М.А. Ценин и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2008. № 2. С. 36–42.
9. Смирнов-Аляев Г.А. Механические основы пластической обработки металлов. Л.: Машиностроение, 1968. 266 с.
10. Теория обработки металлов давлением / И.Я. Тарновский, А.А. Поздеев, О.А. Ганаго и др. М.: Металлургияиздат, 1963. 672 с.

Поступила 11.04.17.

Принята в печать 12.05.17.

## INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-2-35-39>

## DETERMINING THE POWER PARAMETERS OF BOLT SOCKET HEAD FORGING PROCESS

**Oleg S. Zhelezkov** – D.Sc. (Eng.), Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: ferumoff@mail.ru

**Timur Sh. Galiakhmetov** – Deputy, Chief Technical Officer at Belebeevsky

Plant Avtonormal JSC, Belebey, Russia. E-mail: t.galiachmetov@belzan.ru

**Valery L. Steblyanko** – D.Sc. (Eng.), Professor

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

**Abstract**

The share of imports in the total amount of fasteners that were consumed in the Russian Federation in 2014 amounted to 46%. These mainly included bolts and screws. Expanding the output of fasteners with heads is an important task for the domestic industry. Better efficiency can be achieved in bolt production by improving the product design and adopting low-waste technologies. The purpose of this research is to develop a mathematical model for calculating the power parameters of the low-waste bolt socket head forging operation. The problem of defining the power parameters of the socket head forging process was solved with the help of the variational method. A model of the rigid-plastic environment with nonlinear hardening was used to define the rheological properties of the forged material. The exponential dependence was used to describe the hardening curve. The authors looked at the final stage of the deformation process when the tool movement is small during the final forging operation. The volume deformed during the final forging operation was divided into rigid and plastic regions. Displacement functions were set in and the functional description of the total deformation work was compiled. Numerical methods and a specially developed program were used to calculate the minimum of the total deformation work. Based on the results of the calculations, a nomogram was created that helped determine the specific socket head forging forces depending on the relative dimensions of the head and for the steel grades that are most commonly used in the bolt industry. The results of the research were used to develop low-waste technologies

that were used to produce the pilot batches of M 16x50 socket head bolts (per GOST 7798-70) and 'TsP-54' socket head track screws (per TU 1293-165-0112432-2003). The application of the developed technologies can help save 3–6% of the metal.

**Keywords:** Bolt head forging, socket, variational method, displacement functions, power parameters, forging forces.

**References**

1. Order No. 65 2 issued by the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation on 31 March 2015 "On approval of the activity plan on import substitution in the iron and steel industry of the Russian Federation". Moscow, 2015. (In Russ.).
2. Mokrinsky V.I., Zhelezkov O.S. New advanced types of fasteners and advanced manufacturing processes. *Seriynoe metiznoe proizvodstvo* [Mass hardware production]. Moscow, 1990, iss. 2, pp. 22. (In Russ.).
3. Mokrinsky V.I. *Proizvodstvo boltov kholodnoy obiemnoy shtampovkoy* [Production of bolts by cold forging]. Moscow: Metallurgiya, 1978, 78 p. (In Russ.).
4. Platov S.I., Ogarkov N.N., Terentyev D.V., Zhelezkov O.S., Rubanik V.V., Vassal J.P. Developing the theory and the technology of designing machines and tools for metal forming and cutting. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2014, no. 1, pp. 112–114. (In Russ.).
5. Konstantinov D.V., Korchunov A.G. Multiscale computer modeling of metal forming processes. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 1, pp. 36–42. (In Russ.).

6. Parshin V.G., Polyakov M.G., Zhelezkov O.S. A method for determining bolt head cold forging forces. *Chernaya metallurgiya* [Ferrous Metallurgy], 1975, no. 12, pp. 48–49. (In Russ.).
7. Parshin V.G., Zhelezkov O.S. Determining the forging forces required for cold forging of axisymmetric parts. *Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya* [Proceedings of Russian Universities. Ferrous metallurgy], 1980, no. 3, pp. 86–89. (In Russ.).
8. Smirnov O.M., Tulupov S.A., Tsenin M.A. et al. Rheological models as the key element of metal forming process modeling. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2008, no. 2, pp. 36–42. (In Russ.).
9. Smirnov-Alyayev G.A. *Mekhanicheskie osnovy plasticheskoy obrabotki metallov* [The mechanical basis of metal working]. Leningrad: Mashinostroenie, 1968, 266 p. (In Russ.).
10. Tarnovsky I.Ya., Pozdeev A.A., Ganago O.A. et al. *Teoriya obrabotki metallov davleniem* [Theory of metal forming]. Moscow: Metallurgizdat, 1963, 672 p. (In Russ.).

Received 11/04/17

Accepted 12/05/17

#### Образец для цитирования

Железков О.С., Галиахметов Т.Ш., Стеблянко В.Л. Определение энергосиловых параметров процесса штамповки головок болтов с торцевой лункой // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. №2. С. 35–39. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-2-35-39>

#### For citation

Zhelezkov O.S., Galiakhmetov T.Sh., Steblyanko V.L. Determining the power parameters of bolt socket head forging process. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2017, vol. 15, no. 2, pp. 35–39. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-2-35-39>