

УДК 621.97

Железков О.С., Харченко М.В., Салганик В.М., Лизов С.Б.

ЭНЕРГОСИЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА ШТАМПОВКИ ГОЛОВОК СТЕРЖНЕВЫХ ИЗДЕЛИЙ С ФЛАНЦЕМ

Аннотация. На основе вариационного метода разработана математическая модель и выполнены расчеты энергосиловых параметров процесса штамповки головок стержневых крепежных изделий с фланцем. Использовались соотношения деформационной теории пластичности. Реологические свойства деформируемого металла задавались в виде модели жесткопластической среды с нелинейным упрочнением. Кривая упрочнения описывалась экспоненциальной зависимостью, предложенной Г.А. Смирновым-Аляевым. Процесс штамповки рассматривался в цилиндрической системе осей координат r, z, φ . Объем головки разбивался на жесткую и пластическую области, граница раздела между которыми описывалась квадратичной параболой с варьируемым параметром a . Пластическая область разделялась на две зоны. Для каждой зоны задавались функции радиальных перемещений U_r , которые соответствовали граничным условиям и были близки к реальному течению металла. Используя соответствующие дифференциальные зависимости Коши и условие несжимаемости, определялись компоненты тензора деформации $\varepsilon_r, \varepsilon_\varphi, \gamma_{zr}$ и интенсивность деформации ε_i , используя которую находились работа внутренних сил, сил трения и сил среза. Поиск минимума полной работы деформации A^{\min} осуществлялся численными методами с использованием специально разработанной программы. По найденным значениям минимальной полной работы деформации A^{\min} находились усилия штамповки P и удельные усилия $p = P/F_0$, где F_0 - площадь поперечного сечения стержня. По результатам расчетов построена номограмма, позволяющая определять удельные усилия p штамповки в зависимости от относительных размеров фланца головки для стержневых крепежных изделий из сталей 10, 20Г2Р, 30Г2Р, 30ХР и 40Х. Проведены экспериментальные исследования, в ходе которых из стали марки 10 штамповались головки с фланцем. Расхождение теоретических и экспериментальных результатов составило 5,7 %.

Ключевые слова: стержневые крепежные изделия, головка с фланцем, вариационный метод, функции перемещений, работа внутренних сил, работа сил трения, энергосиловые параметры, усилия штамповки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FZRU-2020-0011)

К крепежу прогрессивной конструкции относятся изделия, у которых на опорной поверхности выполняется фланец [1-2]. Применение болта и гайки с фланцами обеспечивает снижение контактных давлений на опорных поверхностях и более равномерное распределение нагрузки по виткам резьбы, что повышает надежность работы резьбовых соединений. Кроме того, такие изделия обладают повышенными конструкторскими свойствами и не требуют применения дополнительных стопорящих элементов для предотвращения самоотвинчивания.

На рис. 1 представлена типичная конструкция стержневых крепежных изделий с фланцевой головкой, которые широко применяются в машиностроении, на железнодорожном транспорте и в других отраслях.

При штамповке стержневых изделий с фланцевой головкой, по сравнению с изготовлением крепежа без фланцев, возрастают усилия деформирования, которые существенно зависят от формы и размеров фланца. Кроме того, следует отметить, что значительная часть фланцевого крепежа изготавливается в виде изделий повышенной прочности (класс прочности 8.8 и выше), для чего используются легированные марки стали типа 20Г2Р, 30ХР, 40Х и др. Поэтому разработка надежной методики определения энергосиловых

параметров процесса штамповки крепежных изделий повышенной прочности с фланцевыми головками имеет важное практическое значение, так как позволяет получить достоверную информацию об усилиях деформирования, которая необходима для выбора эффективного кузнечно-прессового оборудования и поиска рациональной конструкции штампового инструмента.

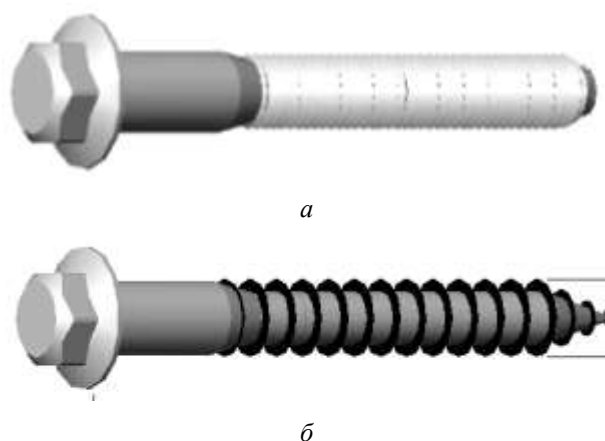


Рис. 1. Крепежные изделия с фланцевой головкой: а – болт; б – путевой шуруп

Цель работы – разработка математической модели и расчет энергосиловых параметров процесса штамповки стержневых крепежных изделий с фланцевыми головками.

Анализ известных методов и методик определения энергосиловых параметров (ЭСП) пластического деформирования [3] показал, что для расчета ЭСП процесса штамповки крепежных изделий с фланцевой головкой можно использовать вариационный метод [4] и, в частности, вариационный метод в дискретной постановке [5, 6]. 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 либо экспериментально, либо аналитически. На конечном этапе штамповки деформации малы, что позволяет использовать соотношения деформационной теории пластичности.

В разработанной методике реологические свойства деформируемого металла задавались в виде модели жесткопластической среды с нелинейным упрочнением [7, 8]. Кривая упрочнения описывалась экспоненциальной зависимостью, предложенной Г.А.Смирновым-Аляевым [9]:

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

где e_i – степень деформации;

M, C, B, N – параметры, определяемые по экспериментальным данным из опытов на растяжение или сжатие.

Рассматривая конечный этап процесса штамповки головки (рис. 2), считается, что металл полностью заполняет полость пуансона и вытесняется в зазор между торцом матрицы 1 и торцом пуансона 2, образуя фланец.

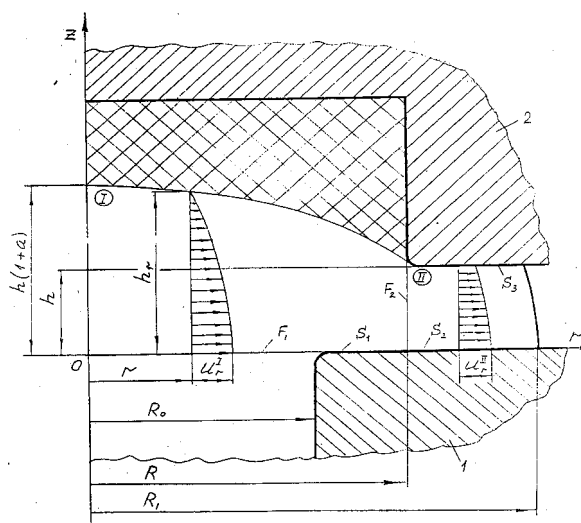


Рис. 2. Схема течения металла на конечном этапе штамповки головки с фланцем

Весь объем головки разбивался на жесткую и пластическую области, граница раздела между которыми описывалась уравнением

$$h_r = h + ah\left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right), \quad (2)$$

где a – варьируемый параметр.

В свою очередь, пластическая область разбивалась на две зоны (I и II).

Процесс штамповки рассматривался в цилиндрической системе осей координат r, z, φ . В принятой системе координаты r и z для пластической I изменяются в диапазоне: $r = 0 \div R, z = 0 \div h_r$. Для пластической зоны II $r = R \div R_1, z = 0 \div h$.

Функция радиальных перемещений для пластической зоны I задавалась в виде

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

Для пластической зоны II функция радиальных перемещений

$$U_r^{II} = a_2 r\left(\frac{r}{R} - 1\right) + a_3\left(1 - \frac{z^2}{h^2}\right). \quad (4)$$

Выбранные функции U_r отвечают граничным условиям и близки к реальному течению металла на конечном этапе штамповки.

Используя соответствующие дифференциальные зависимости Коши и условие несжимаемости для случая деформирования в цилиндрической системе координат, определялись компоненты тензора деформации $\epsilon_r, \epsilon_\varphi, \gamma_{zr}$.

По известным $\epsilon_r, \epsilon_\varphi, \gamma_{zr}$, учитывая, что $\epsilon_z = -(\epsilon_r + \epsilon_\varphi)$ и $\gamma_{r\varphi} = \gamma_{\varphi z} = 0$, определялась интенсивность деформации на конечном этапе штамповки

$$\epsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_r - \epsilon_z)^2 + (\epsilon_z - \epsilon_\varphi)^2 + (\epsilon_\varphi - \epsilon_r)^2 + \frac{3}{2}\gamma_{zr}^2}. \quad (5)$$

Полная работа деформации находилась как сумма работ внутренних сил, сил трения и сил среза.

Работа внутренних сил для зон I и II

$$A_{b1} = \int_0^{2\pi} \int_0^{R_1} \int_0^{h_r} W r d\varphi dr dz; \quad A_{b2} = \int_0^{2\pi} \int_0^{R_1} \int_0^h W r d\varphi dr dz, \quad (6)$$

где W – удельная работа внутренних сил, которая с учетом уравнения (1) определялась по формуле

$$W = [M\epsilon_i - Ce^{-\epsilon_i} (1 - e^{-\epsilon_i}) - \frac{B}{N} e^{-Ne_i} (1 - e^{-Ne_i})], \quad (7)$$

где e_i - степень деформации на начальном этапе штамповки, которая определялась методом измерения твердости;
 M, C, B, N – параметры кривой упрочнения (1), определяемые из опытов на сжатие образцов с торцевыми буртиками [10].

Работа сил трения на поверхностях S_1, S_2 и S_3 контакта металла с инструментом

$$A_{T_1} = \int_0^{2\pi} \int_{R_0}^R \tau U_{|S_1} r d\varphi dr, \quad A_{T_2} = \int_0^{2\pi} \int_0^R \tau U_{|S_2} r d\varphi dr,$$

$$A_{T_{13}} = \int_0^{2\pi} \int_0^{R_2} \tau U_{|S_3} r d\varphi dr. \quad (8)$$

Работа сил среза по поверхностях F_1 и F_2

$$A_{C_1} = \int_0^{2\pi} \int_0^{R_0} \tau_s U_{|F_1} r d\varphi dr, \quad A_{C_2} = \int_0^{2\pi} \int_0^h \tau_s \Delta U_{|F_2} R d\varphi dz. \quad (9)$$

Полная работа деформации на конечном этапе штамповки определялась как сумма работ внутренних сил A_{b1}, A_{b2} , сил трения $A_{T_1}, A_{T_2}, A_{T_3}$ и сил среза A_{C_1}, A_{C_2} . Поиск минимума полной работы деформации A^{\min} осуществлялся численными методами с использованием специально разработанной програм-

мы. При этом кратные интегралы в выражениях работ (8) вычислялись методом Гаусса с использованием четырех узловых точек. По найденным значениям минимальной полной работы деформации A^{\min} находились усилия штамповки P и удельные усилия $p = P/F_0$, где $F_0 = \pi R_0^2$. По результатам расчетов построена номограмма (рис. 3), позволяющая определять удельные усилия p штамповки в зависимости от относительных размеров фланца головок (R_1 / R_0) и (h / R_0) стержневых крепежных изделий из сталей 10, 20Г2Р, 30Г2Р, 30ХР, 40Х, которые широко применяются при штамповке изделий с фланцевыми головками.

Для оценки достоверности результатов расчетов проведена серия экспериментов, которые проводились с использованием прессы МС-2000 («Завод испытательных машин», г. Армавир) и инструмента в виде пуансона, матрицы и выталкивателя, которые размещались в специальном центрирующем корпусе. Штамповались фланцевые головки из цилиндрических заготовок диаметром 16 мм (сталь марки 10). Размеры отштампованных головок $R_0 = 8$ мм, $R = 12$ мм, $R_1 = 15$ мм, $h = 3$ мм. Экспериментальные усилия деформирования, найденные по результатам испытаний 10 образцов, изменялись в диапазоне 886÷941 кН. Среднее значение – 934,1 кН. Усилия, определенные теоретически – 883,6 кН. Погрешность 5,7%.

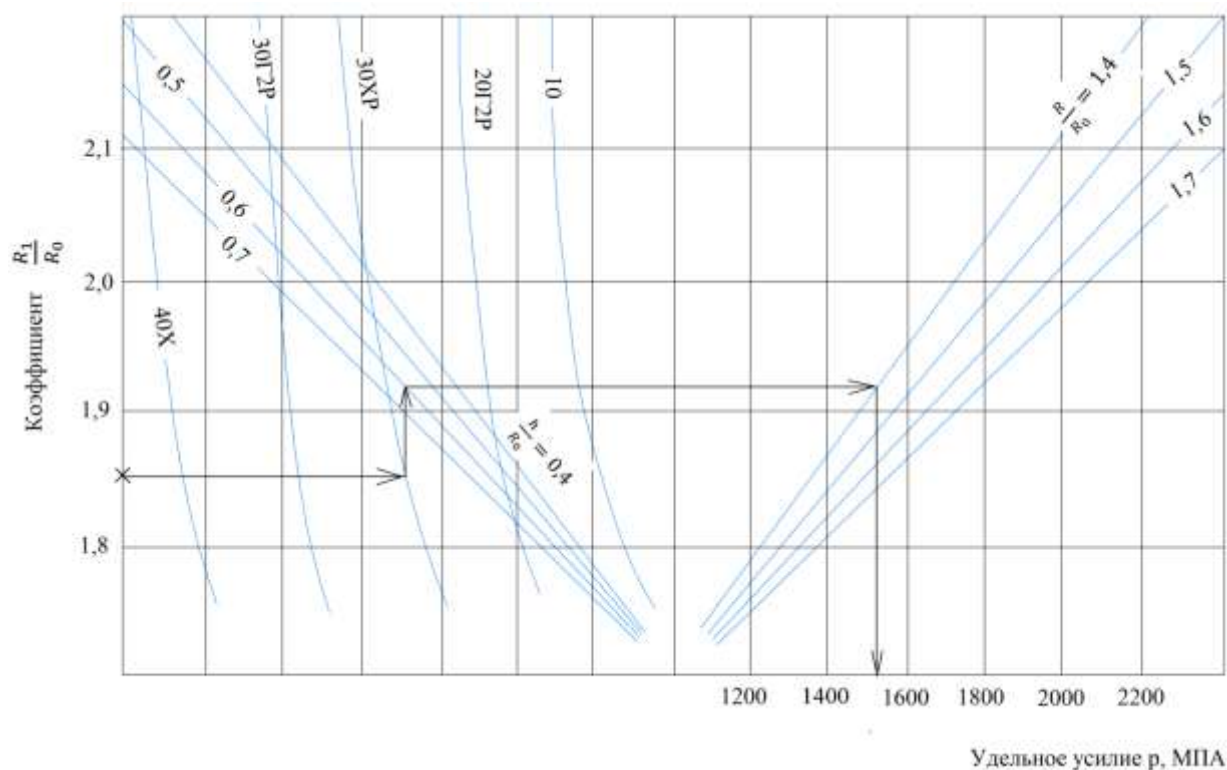


Рис. 3. Номограмма определения удельных усилий штамповки головок с фланцем

Выводы

1. Используя вариационный метод в дискретной постановке, разработана математическая модель и выполнены расчеты энергосиловых параметров процесса штамповки головок стержневых крепежных изделий с фланцем.

2. Окончательные результаты выполненных расчетов представлены в виде номограммы, используя которую можно определять усилия деформирования в зависимости от соотношения размеров штампуемой головки для марок стали, широко применяемых при изготовлении стержневых крепежных изделий.

3. Результаты исследования использовались при разработке технологии холодной штамповки путевых шурупов с фланцевой головкой (ГОСТ 809-71) на многопозиционных автоматах-комбайнах в условиях ОАО «ММК-Метиз» (г. Магнитогорск).

Список литературы

1. Крепежные изделия для современного машиностроения / И.А. Воробьев, С.В., Овчинников Г.В. Бунатян и др. Нижний Новгород: МПК-сервис, 2016. 520 с.
2. Мокринский В.И., Железков О.С. Новые прогрессивные виды и технологические процессы изготовления крепежных изделий. Сер. Метизное производство. Вып. 2. М.: Ин-т Черметинформация, 1990. 22 с.
3. Развитие теории и технологии проектирования машин, агрегатов и инструмента в процессах обработки давлением и резания / С.И. Платов, Н.Н. Огарков, Д.В. Терентьев и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 1. С. 112-114.
4. Теория обработки металлов давлением / И.Я. Тарновский, А.А. Поздеев, О.А. Ганаго и др. М.: Металлургиздат, 1963. 672 с.
5. 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.
6. Паршин В.Г., Железков О.С. Определение усилий холодной объемной штамповки осесимметричных деталей // Изв. вузов. Черная металлургия. 1980. № 3. С. 86-89.
7. Реологические модели как основной элемент моделирования процессов обработки металлов давлением / О.М. Смирнов, С.А. Тулупов, М.А. Ценин и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2008. № 2. С. 36-42.
8. Методы исследования механических характеристик металлов и сплавов в процессах обработки давлением с учетом неоднородности структуры / М.П. Барышников, М.В. Чукин, А.Б. Бойко и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. № 4. С. 26-31
9. Смирнов-Аляев Г.А. Механические основы пластической обработки металлов. Л.: Машиностроение, 1968. 266 с.
10. Растегаев М.В. Новый метод равномерного осаждения образцов для определения истинного сопротивления деформации и коэффициента внешнего трения // Заводская лаборатория. 1940. № 3. С. 354-355.

Сведения об авторах

Железков Олег Сергеевич – д-р техн. наук, профессор кафедры механики, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: ferumoff@mail.ru

Харченко Максим Викторович – канд. техн. наук, ст. преп. кафедры механики, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: kharchenko.mv@bk.ru.

Салганик Виктор Матвеевич – д-р техн. наук, профессор кафедры технологий обработки материалов. ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: salganik@mail.ru.

Лизов Салимжан Бурамбаевич – студент, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: salimzhan.1996@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

ENERGY-POWER PARAMETERS OF THE PROCESS OF STAMPING THE HEADS OF ROD PRODUCTS WITH A FLANGE

Oleg S. Zhelezkov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: ferumoff@mail.ru

Maxim V. Kharchenko – Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: kharchenko.mv@bk.ru.

Viktor M. Salganik – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: salganik@mail.ru.

Salimgan B. Lizov – Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: salimzhan.1996@mail.ru.

Abstract. *On the basis of the variational method, a mathematical model has been developed and calculations of energy-power parameters of the process of stamping the heads of rod fasteners with a flange have been performed. The relations of the deformation theory of plasticity were used. The rheological properties of the deformable metal were set as a model of a rigid-plastic medium with nonlinear hardening. The hardening curve was described by an exponential dependence proposed by G. A. Smirnov-Alyayev. The stamping process was considered in a cylindrical system of coordinate axes r, z, φ . The volume of the head was divided into rigid and plastic regions, the interface between which was described by a quadratic parabola with a variable parameter a . The plastic area was divided into two zones. For each zone were asked the functions of the radial displacements U_r , that are consistent with the boundary conditions and was very close to the actual metal flow. Using the corresponding Cauchy differential dependencies and the incompressibility condition, the components of the strain tensor $\varepsilon_r, \varepsilon_\varphi, \gamma_{zr}$ and the strain intensity ε_i were determined, using which the work of internal forces, friction forces, and shear forces was determined. The search for the minimum of complete deformation operation A^{\min} was performed by numerical methods using a specially developed program. According to the found values of the minimum total deformation work A^{\min} , the stamping forces P and the specific forces $p = P/F_0$, where F_0 is the cross-sectional area of the rod, were determined. Based on the results of calculations, a nomogram was constructed that allows determining the specific forces p of stamping depending on the relative dimensions of the head flange for rod fasteners made of 10, 20Г2Р, 30Г2Р, 30ХР and 40Х steels. Experimental studies were carried out, during which heads with a flange were stamped out of grade 10 steel. The discrepancy between theoretical and experimental results was 5.7 %.*

Keywords: *rod fasteners, head with flange, variation method, displacement functions, work of internal forces, work of friction forces, power parameters, stamping forces.*

This work is carried out within a framework of the government order (No. FZRU-2020-0011) of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

Ссылка на статью:

Железков О.С., Харченко М.В., Салганик В.М., Лизов С.Б. Энергосиловые параметры процесса штамповки головок стержневых изделий с фланцем // Теория и технология металлургического производства. 2020. №2(33). С. 24-28.

Zhelezkov O.S., Kharchenko M.V., Salganik V.M., Lizov S.B. Energy-power parameters of the process of stamping the heads of rod products with a flange. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2020, vol. 33, no. 2, pp. 24-28.