

ЭНЕРГОСИЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ РЕЗЬБОВЫХ ИЗДЕЛИЙ

Кралин А. К.

Представлены расчеты относительного давления, необходимого при выдавливании резьбы без учета и с учетом неравномерного заполнения резьбового профиля. Представлены результаты расчета удельного усилия деформирования при различных геометрических параметрах резьбы, условиях трения и коэффициентах заполнения профиля. Проанализированы результаты расчета относительного давления выдавливания резьбы, полученные энергетическим и инженерным методами. Сравнение показало заниженные результаты, полученные энергетическим методом, по сравнению с инженерным методом. Это связано, прежде всего, с тем, что в инженерном методе учитываются дополнительные нагрузки, возникающие из-за неравномерного заполнения резьбы.

Представлені розрахунки відносного тиску, необхідного при витискуванні різьблення без урахування і з урахуванням нерівномірного заповнення різьбового профілю. Представлені результати розрахунку питомого зусилля деформації при різних геометричних параметрах різьблення, умовах тертя й коефіцієнтах заповнення профілю. Проаналізовані результати розрахунку відносного тиску витискування різьблення, отримані енергетичним і інженерним методами. Порівняння показало занижені результати, отримані енергетичним методом, в порівнянні з інженерним методом. Це зв'язано, перш за все, з тим, що в інженерному методі враховуються додаткові навантаження, що виникають з-за нерівномірного заповнення різьблення.

The analysis of relative pressure necessary for thread pressing-out both under uniform and non-uniform filling-up of a thread section has been presented in the paper. The results of the analysis of deformation forces under various geometric parameters of thread, friction conditions and section filling-up coefficient are given. The results of thread pressing-out relative pressure analysis obtained by power and engineering methods have been investigated. The analysis has shown lower results obtained by power method in comparison to engineering method. It is connected with the fact that the use of engineering method takes into account extra loads when thread is filled up non-uniformly.

Кралин А. К.

канд. техн. наук, доц. ДонНАСА

ak.kralin@rambler.ru

УДК 621.992.8

Кралин А. К.

ЭНЕРГОСИЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ РЕЗЬБОВЫХ ИЗДЕЛИЙ

Основной задачей технологии металлообрабатывающего производства является изготовление деталей с наименьшими трудозатратами, с наибольшими производительностью и коэффициентом использования металла (КИМ). Причем их качество должно удовлетворять условиям эксплуатации. Для решения этой задачи предусмотрен ряд производств. Как правило, деталь с заданными чертежом размерами и необходимой шероховатостью поверхности получают обработкой резанием. Однако для обеспечения требуемых механических характеристик, снижения трудозатрат, повышения КИМ и производительности изготовление деталей целесообразно использовать методы обработки металлов пластическим деформированием.

В машиностроении почти 60 % деталей машин имеют резьбовую поверхность. Поэтому разработке прогрессивных методов резьбообразования, позволяющих сочетать качество и производительность, уделяется большое внимание как в отечественном, так и в зарубежном машиностроении.

Одними из таких методов формирования резьбы на гайках, являются способы, основанные на радиально-прямом [1] и боковом выдавливании металла [2]. В работах [3, 4] рассмотрена задача анализа деформированного состояния заготовки при выдавливании резьбы на цилиндрической поверхности гайки способом бокового выдавливания металла. Выполненный анализ позволил перейти к анализу напряженного состояния заготовки, который дал возможность прогнозировать качество получаемых гаек построить рациональную технологию выдавливания резьбы [5, 6].

Важными параметрами процесса выдавливания резьбового профиля является энерго-силовые параметры, к которым относятся: мощности внутренних и внешних сил деформации, относительное удельное усилие деформирования заготовки при выдавливании резьбы и т. д.

Целью работы является определение зависимостей энергосиловых параметров процесса выдавливания резьбового профиля на цилиндрической заготовке методом бокового выдавливания и влияния на энергосиловые параметры процесса геометрических параметров резьбы, коэффициента заполнения профиля резьбы и условий трения в матричной и резьбовой области заготовки; выполнить сопоставительную оценку энергосиловых параметров процесса выдавливания резьбы энергетическим и инженерным методами.

Для анализа энергосиловых параметров процесса воспользуемся энергетическим методом на основе поля скоростей не учитывающего неравномерность заполнения витков резьбы. Затем инженерным методом с учетом неравномерного заполнения витков резьбы.

Запишем условие равенства мощностей внутренних и внешних сил деформации [7, 8, 9, 10]:

$$N_{внеш} = N_з + N_{вн} + N_{сдв} + N_{тр}^* + N_{тр}, \quad (1)$$

где $N_{внеш}$ – мощность внешних сил деформации; $N_з$ – мощность внутренних сил деформации в кольцевой области заготовки; $N_{вн}$ – мощность внутренних сил деформации в профиле резьбы; $N_{сдв}$ – мощность внутренних сил сдвига; $N_{тр}^*$ – мощность сил трения в профиле резьбы; $N_{тр}$ – мощность сил трения в кольцевой области заготовки.

Мощность внутренних сил деформации в кольцевой области заготовки определим по формуле [7, 9]:

$$N_3 = \iiint_V \xi_{i1} \sigma_m dV, \quad (2)$$

где σ_m – сопротивление деформации; $dV = r d\theta dr dz$ – объем заготовки в кольцевой области; θ изменяется от 0 до 2π ; r изменяется от R_H до R_{BH} ; z изменяется 0 до L .

Тогда, после интегрирования, имеем [11]:

$$N_3 = \frac{2\pi\sigma_m v_u \cdot L}{\sqrt{3}} \int_{R_H}^{R_{BH}} \sqrt{3 + \frac{R_H^4}{r^4}} \cdot dr. \quad (3)$$

Мощность внутренних сил деформации в резьбовом профиле определим по формуле [7, 9]:

$$N_{BH} = \iiint_V \xi_{i2} \sigma_m dV, \quad (4)$$

где $dV = r dr d\theta dz$ – объем металла в резьбовом профиле; $dV = 2\pi r dr dz$; r изменяется от R_{BH} до r_0

Тогда:

$$N_{BH} = 2\pi\sigma_m \cdot \int_{r_0}^{R_{BH}} \left(\int_0^L \xi_{i2} dz \right) r dr. \quad (5)$$

Мощность внутренних сил сдвига определим по формуле [7, 9]:

$$N_{сдв} = \iint_A \tau_s |v_z| dA, \quad (6)$$

где $\tau_s = \frac{\sigma_m}{\sqrt{3}}$ – касательные напряжения сдвига [8]; v_z – осевая составляющая скорости перемещения частиц металла на границе AB при $r = R_{BH}$; $dA = d\theta dr$ – поверхность сдвига в очаге деформации; z изменяется от 0 до L ; θ изменяется от 0 до 2π .

При $r = R_{BH}$ имеем следующее выражение мощности внутренних сил сдвига [11]:

$$N_{сдв} = \frac{\pi \cdot \sigma_m \cdot v_u \cdot (R_H^2 - R_{BH}^2) \cdot L}{\sqrt{3} \cdot R_{BH}}. \quad (7)$$

Мощность сил трения в резьбовом профиле определим по формуле:

$$N_{тр}^* = \iint_A \tau_k |v_k| dA, \quad (8)$$

где dA – поверхность трения профиля резьбовой оправки; τ_k – касательные напряжения на контактной поверхности; v_k – скорость течения металла на контактной поверхности.

Предварительные опыты по холодному выдавливанию резьбы, выполненные рядом исследователей, показали, что смазка неравномерно распределяется по поверхности резьбовой оправки. Это приводит к неопределенности граничных условий трения. Поэтому рекомендуется при теоретическом анализе оценить влияние трения на силовой режим, приняв $\tau_k = \mu \times \sigma_m$, где μ – коэффициент трения (μ изменяется от 0,1 до 0,5) [12].

Скорость течения металла на контактной поверхности можно определить, как:

$$v_k = \frac{v_{r2}}{\cos \alpha},$$

где α – половина угла профиля резьбы оправки.

В итоге получаем [11]:

$$N_{mp}^* = \frac{\pi \mu \sigma_m \cdot v_u (R_n^2 - R_{\text{вн}}^2) \cdot \ln \frac{R_{\text{вн}} - r_{po}}{r_{\partial} - r_{po}}}{\sin \alpha}. \tag{9}$$

Мощность сил трения в кольцевой области заготовки определим из выражения:

$$N_{mp} = \iint_A \tau_k |v_k| dA, \tag{10}$$

где $v_k = v_{z1}$ – скорость течения частиц металла по контактной поверхности с матрицей, $dA = 2\pi R_n dz$ – площадь контакта ($0 \leq z \leq L$).

В итоге получаем [11]:

$$N_{mp} = \pi \cdot R_n \cdot \mu \cdot \sigma_m \cdot v_u \cdot L. \tag{11}$$

Мощность внешней деформирующей силы определим из выражения:

$$N_{\text{внеш}} = \rho \cdot v_u \cdot \pi \cdot (R_n^2 - R_{\text{вн}}^2), \tag{12}$$

где ρ – удельное усилие деформации заготовки.

Подставляя значения составляющих мощностей в выражение (11), и выполнив соответствующие преобразования, определим относительное усилие деформирования заготовки при выдавливании резьбы [11]:

$$\begin{aligned} \rho^* = \frac{\rho}{\sigma_m} = & \frac{2\sqrt{3} \cdot L}{3(R_n^2 - R_{\text{вн}}^2)} \int_{R_n}^{R_{\text{вн}}} \sqrt{3 + \frac{R_n^4}{r^4}} \cdot dr + \frac{1}{2 \cdot \text{tg} \alpha \cdot \sqrt{3}} \times \\ & \times \int_{r_{\partial}}^{R_{\text{вн}}} \left[\frac{1}{r^2 (r - r_{po})} \left(\int_0^L \frac{1}{L} \sqrt{\frac{4(3r^2 - 3rr_{po} + r_{po}^2)(r - r_{po})^2}{3(3r - r_{po})^2} + z^2} \cdot dz \right) \right] r dr + \\ & + \frac{S}{2\sqrt{3} \cdot R_{\text{вн}}} + \frac{\mu \cdot \ln \frac{R_{\text{вн}} - r_{po}}{r_{\partial} - r_{po}}}{\sin \alpha} + \frac{R_n \cdot \mu \cdot L}{(R_n^2 - R_{\text{вн}}^2)}. \end{aligned} \tag{13}$$

Оценим необходимое удельное давление выдавливания резьбы с учетом неравномерного заполнения витков резьбы по длине детали методом тонких сечений. Метод решения предполагает, что направления напряжений, действующих на поверхность перпендикулярно направлению течения, являются главными напряжениями и не изменяются для любой точки данной поверхности. Как и в предыдущем случае, мысленно разделим заготовку на две зоны. Первая часть представляет собой кольцо с наружным радиусом R_n и внутренним $R_{\text{вн}}$ (см. рис. 1).

Уравнение равновесия сил относительно оси z , имеет вид:

$$p_1 \pi (R_n^2 - R_{\text{вн}}^2) - (p_1 + dp_1) \pi (R_n^2 - R_{\text{вн}}^2) + 2\tau_{mp} \pi R_n dz + 2\tau_s \pi R_{\text{вн}} dz = 0. \tag{14}$$

Преобразовав выражение, имеем:

$$dp_1(R_H^2 - R_{BH}^2) = 2(\tau_{mp}R_H + \tau_s R_{BH})dz. \tag{15}$$

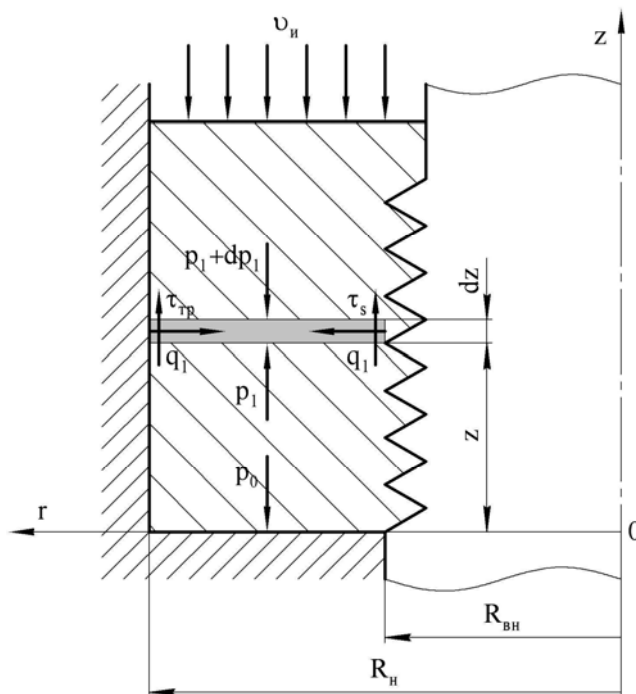


Рис. 1. Схема к выводу дифференциального уравнения равновесия в кольцевой области (зона 1)

Учитывая, что касательное напряжение на плоскости сдвига равно $\tau_s = \frac{\sigma_m}{\sqrt{3}}$, а также принимая закон трения $\tau_{mp} = \mu\sigma_m$, получим:

$$dp_1(R_H^2 - R_{BH}^2) = 2\sigma_m \left(\mu R_H + \frac{R_{BH}}{\sqrt{3}} \right) dz. \tag{16}$$

Интегрируя выражение (16), получим:

$$p_1 = \frac{2\sigma_m \left(\mu R_H + \frac{R_{BH}}{\sqrt{3}} \right)}{(R_H^2 - R_{BH}^2)} z + p_0, \tag{17}$$

где p_0 – напряжение у последнего витка при $z = 0$ (см. рис. 1)

В случае одностороннего выдавливания хуже всего заполняется последний виток. С учетом того, что глубина резьбы не велика по сравнению с диаметром гайки, в первом приближении можно не учитывать тангенциальные напряжения и решать плоскую задачу заполнения клина металлом гайки за счет радиального давления рис. 2.

Запишем уравнение равновесия продольных сил с учетом того, что рассматривается плоская задача и в каждом слагаемом опущен линейный размер площадки перпендикулярный плоскости рассматриваемой схемы:

$$q_2 x_r - (q_2 + dq_2)(x_r + dx_r) + 2p_2 \tan \alpha \cdot dr + 2\tau_{mp} dr = 0. \quad (18)$$

Разделив выражение (18) на $-dr$, получим:

$$\frac{(q_2 + dq_2)(x_r + dx_r) - q_2 x_r}{dr} - 2p_2 \tan \alpha - 2\tau_{mp} = 0; \quad (19)$$

или:

$$\frac{d(q_2 x_r)}{dr} - 2p_2 \tan \alpha - 2\tau_{mp} = 0. \quad (20)$$

Учитывая, что $\frac{dx_r}{dr} = 2 \tan \alpha$, а также принимая закон трения $\tau_{mp} = \mu \sigma_m$, получим:

$$\frac{d(q_2 x_r)}{dx_r} - p_2 - \sigma_m \frac{\mu}{\tan \alpha} = 0, \quad (21)$$

или:

$$x_r \frac{dq_2}{dx_r} = p_2 - q_2 + \sigma_m \frac{\mu}{\tan \alpha}. \quad (22)$$

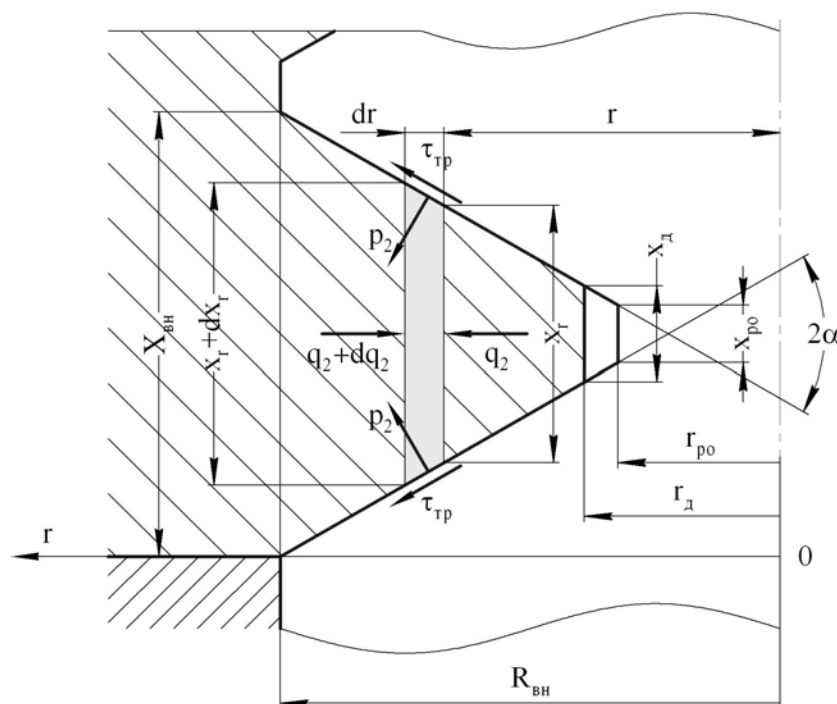


Рис. 2. Схема к выводу дифференциального уравнения равновесия в резьбовой области (зона 2)

Используя уравнение пластичности $p_2 - q_2 = \sigma_m$, преобразуем выражение, получим:

$$dq_2 = \left(\sigma_m \left(1 + \frac{\mu}{\tan \alpha} \right) \right) \frac{dx_r}{x_r}. \quad (23)$$

Интегрируя, получим:

$$q_2 = \sigma_m \left(1 + \frac{\mu}{\tan \alpha} \right) \ln x_r + C. \tag{24}$$

Для определения константы воспользуемся условием $q_2|_{x_r=x_\partial} = 0$, тогда:

$$C = -\sigma_m \left(1 + \frac{\mu}{\tan \alpha} \right) \ln x_\partial. \tag{25}$$

Подставляя значение константы в (24), получим:

$$q_2 = \sigma_m \left(1 + \frac{\mu}{\tan \alpha} \right) \ln \frac{x_r}{x_\partial}. \tag{26}$$

Зная боковое давление необходимое для заданного заполнения последнего витка резьбы и с учетом что $p_0 - q_2 = \sigma_m$, получим полное относительное давление при выдавливании с учетом заполнения резьбового профиля:

$$p = \sigma_m \left(1 + \frac{2 \left(\mu R_H + \frac{R_{\partial H}}{\sqrt{3}} \right)}{(R_H^2 - R_{\partial H}^2)} L + \left(1 + \frac{\mu}{\tan \alpha} \right) \ln \frac{X_{\partial H}}{x_\partial} \right). \tag{27}$$

Или:

$$p^* = \frac{p}{\sigma_m} = 1 + \frac{2 \left(\mu R_H + \frac{R_{\partial H}}{\sqrt{3}} \right)}{(R_H^2 - R_{\partial H}^2)} L + \left(1 + \frac{\mu}{\tan \alpha} \right) \ln \frac{X_{\partial H}}{x_\partial}. \tag{28}$$

На рис. 3 представлены расчеты относительного давления необходимого при выдавливании резьбы без учета и с учетом неравномерного заполнения резьбового профиля по формулам (13) и (27) соответственно. В качестве исходных данных использовались геометрические параметры гаек соответствующие ГОСТ 5915-70, коэффициент трения был принят равным 0,1.

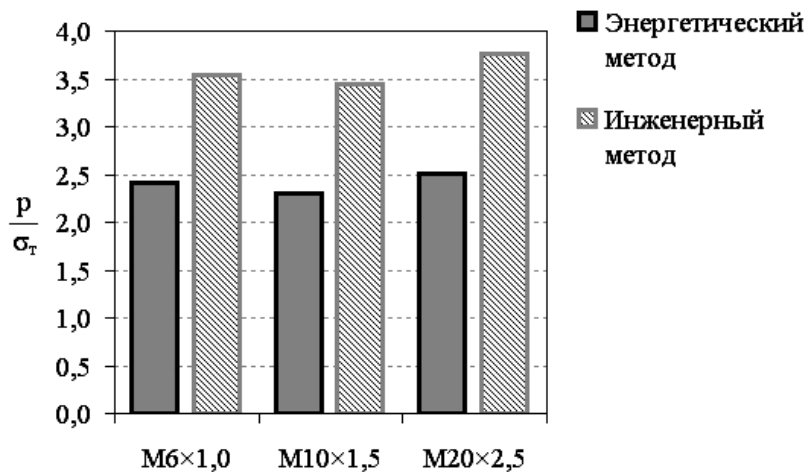


Рис. 3. Сравнение относительного давления, рассчитанного энергетическим и инженерным методами

Сравнение результатов расчета относительного давления выдавливания резьбы показало, что энергетический метод дает значения, заниженные в среднем на 30 % по сравнению с инженерным. Связано это с учетом в инженерном методе дополнительной нагрузки, возникающей из-за неравномерного заполнения резьбы.

Введем коэффициент заполнения резьбового профиля K такой, что при $x_{\partial} = x_{вн}$ его численное значение будет равно нулю, а при $x_{\partial} = x_{po}$ – единице, то есть:

$$K = \frac{x_{\partial} - X_{вн}}{x_{po} - X_{вн}}. \tag{29}$$

Преобразуем выражение (27) таким образом, чтобы входящие в него параметры были безразмерными. Для этого разделим числитель и знаменатель второго слагаемого на $R_{вн}^2$, а также учетом (28), получим:

$$p^* = 1 + \frac{2 \left(\mu \frac{R_n}{R_{вн}} + \frac{1}{\sqrt{3}} \right)}{\left(\left(\frac{R_n}{R_{вн}} \right)^2 - 1 \right)} \frac{L}{R_{вн}} - \left(1 + \frac{\mu}{\tan \alpha} \right) \ln \left(1 + K \left(\frac{x_{po}}{X_{вн}} - 1 \right) \right). \tag{30}$$

Таким образом, получена функция относительного удельного давления выдавливания резьбы от четырех безразмерных параметров и коэффициента трения $p^* = f \left(\frac{R_n}{R_{вн}}, \frac{L}{R_{вн}}, \frac{x_{po}}{X_{вн}}, K \right)$. На рис. 4–7 и в табл. 1 представлены результаты расчета удельного усилия деформирования при различных геометрических параметрах резьбы, условиях трения и коэффициентах заполнения профиля.

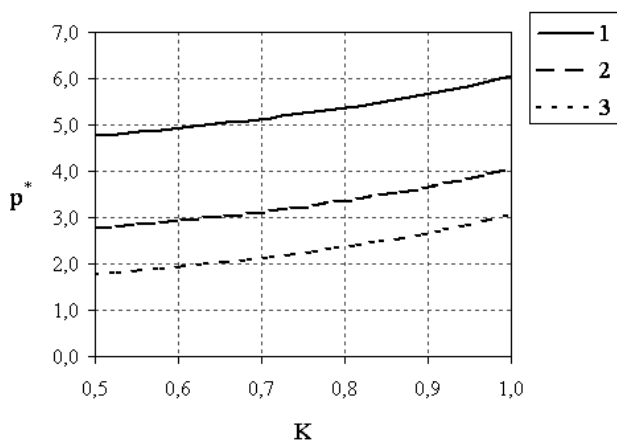


Рис. 4. Зависимость относительного удельного давления от наружного радиуса детали $\frac{L}{R_{вн}} = 1; \frac{x_{po}}{X_{вн}} = 0,2; \mu = 0,1;$

$$\frac{R_n}{R_{вн}} = (1 - 1,2; 2 - 1,5; 3 - 3,5)$$

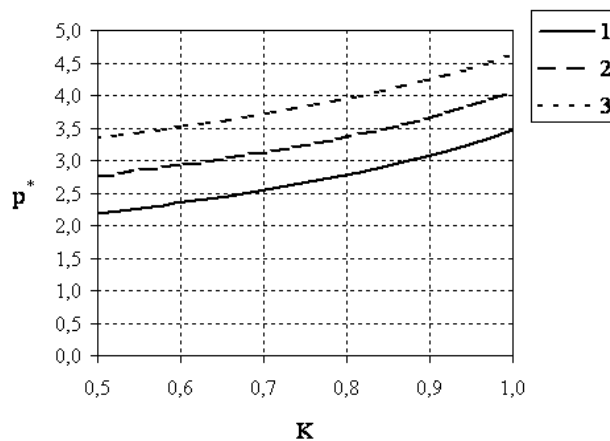


Рис. 5. Зависимость относительного удельного давления от высоты детали $\frac{R_n}{R_{вн}} = 1,5; \frac{x_{po}}{X_{вн}} = 0,2; \mu = 0,1;$

$$\frac{L}{R_{вн}} = (1 - 0,5; 2 - 1,0; 3 - 1,5)$$

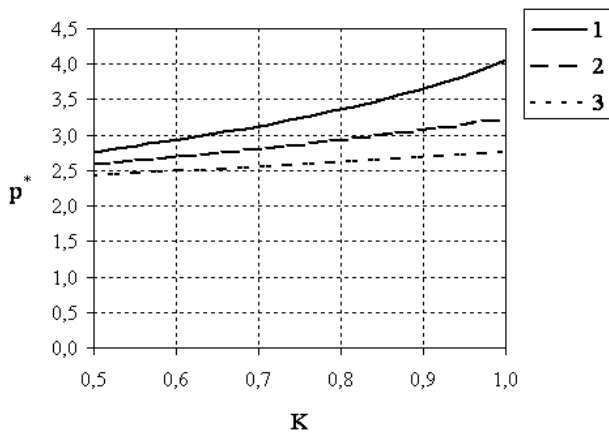


Рис. 6. Зависимость относительного удельного давления от шага резьбы детали

$$\frac{R_n}{R_{вн}} = 1,5; \frac{L}{R_{вн}} = 1; \mu = 0,1;$$

$$\frac{x_{po}}{X_{вн}} = (1-0,2; 2-0,4; 3-0,6)$$

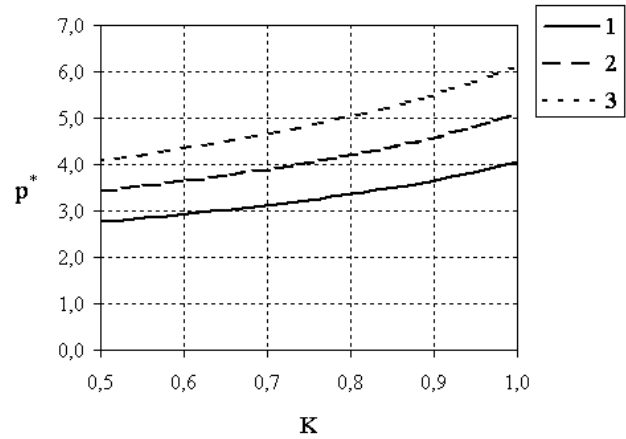


Рис. 7. Зависимость относительного удельного давления от коэффициента трения

$$\frac{R_n}{R_{вн}} = 1,5; \frac{L}{R_{вн}} = 1; \frac{x_{po}}{X_{вн}} = 0,1;$$

$$\mu = (1-0,1; 2-0,3; 3-0,5)$$

Согласно ГОСТ 16093-81 величина коэффициента заполнения для грубого класса точности составляет 0,89.

Таблица 1

Зависимость относительного удельного усилия от условий трения, геометрических параметров резьбы и коэффициента заполнения профиля резьбы

μ	$R_n / R_{вн}$	$L / R_{вн}$	$x_{po} / X_{вн}$	K	p^*
0,1	1,5	1	0,2	0,9	3,66
0,2	1,5	1	0,2	0,9	4,12
0,3	1,5	1	0,2	0,9	4,58
0,4	1,5	1	0,2	0,9	5,04
0,1	1,2	1	0,2	0,9	5,66
0,1	1,5	1	0,2	0,9	3,66
0,1	2	1	0,2	0,9	3,01
0,1	3,5	1	0,2	0,9	2,66
0,1	1,5	0,5	0,2	0,9	3,08
0,1	1,5	1	0,2	0,9	3,66
0,1	1,5	1,5	0,2	0,9	4,24
0,1	1,5	2	0,2	0,9	4,82
0,1	1,5	1	0,2	0,9	3,66
0,1	1,5	1	0,3	0,9	3,33
0,1	1,5	1	0,4	0,9	3,07
0,1	1,5	1	0,5	0,9	2,87
0,1	1,5	1	0,2	0,8	3,36
0,1	1,5	1	0,2	0,85	3,50
0,1	1,5	1	0,2	0,9	3,66
0,1	1,5	1	0,2	0,95	3,84

ВЫВОДЫ

На основании выполненного теоретического анализа процесса пластического формообразования внутренней резьбы на цилиндрической поверхности заготовки и резьбовой области при боковом выдавливании установлено:

1. Наибольшее влияние на энергосиловые параметры процесса оказывают геометрические параметры резьбы и заготовки, коэффициент заполнения профиля резьбы и условия трения в матричной и резьбовой области.

2. Энергетический метод дает заниженную, в среднем на 30 %, оценку энергосиловых параметров по сравнению с инженерным методом, учитывающим неравномерность заполнения резьбового профиля.

3. На относительное удельное усилие наибольшее влияние оказывают коэффициент заполнения профиля резьбы ($\approx 30\%$) и условия контактного трения ($\approx 30\%$).

4. На основании полученных результатов можно утверждать, что процесс бокового выдавливания резьбы на гайках при односторонней схеме деформирования целесообразно осуществлять на гайках небольшой высоты (резьба малой длины свинчивания) и с достаточной толщиной стенки.

5. Перед выдавливанием необходимо обеспечить наличие смазки на трущихся поверхностях.

6. Для обеспечения равномерного нагружения витков резьбовой оправки целесообразно использовать двухстороннюю схему деформирования, что повысит стойкость последней.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алиев И. С. Моделирование процесса радиально-прямого выдавливания полых изделий из упрочняющегося материала. Сообщение 1 / И. С. Алиев, О. В. Чучин, П. Абхари // Вісник ДДМА. – 2005. – № 2. – С. 24–29.
2. Патент на винахід. 80176 Україна, МПК В21К 1/00, В21Н 3/00. Спосіб утворення різьбового профілю в порожнистих циліндричних деталях / Кралін А. К., Матвієнко А. В., Фініченко В. О. – Заявл. 29.06.2005; опубл. 27.08.07, Бюл. № 13. – 4 с.
3. Матвиенко А. В. Анализ деформированного состояния заготовки при радиальном выдавливании внутренней резьбы на цилиндрической поверхности / А. В. Матвиенко, А. К. Кралин // Физика и техника высоких давлений : научный журнал. – Донецк : ДонФТИ им. А. А. Галкина НАН Украины, 2002. – Том 12. – С. 86–91.
4. Матвиенко А. В. Холодное выдавливание резьбы на тонкостенных деталях [учебное издание] / А. В. Матвиенко, А. К. Кралин. – Донецк : Ноулидж (донецкое отделение), 2010. – 85 с.
5. Матвиенко А. В. Анализ напряженного состояния заготовки при выдавливании резьбы на гайке / А. В. Матвиенко, А. К. Кралин, О. А. Балахничев // Прогрессивные технологии и системы машиностроения : международный сборник научных трудов. – Донецк : ДонНТУ, 2002. – Вып. 21. – С. 99–104.
6. Кралин А. К. Анализ напряженного состояния заготовки при выдавливании резьбы / А. К. Кралин, В. А. Финиченко // Сб. тр. XII международной научно-технической конференции «Машиностроение и техника на рубеже XXI века» 12–17 сентября 2005 г. – Т. 2. – С. 139–144.
7. Евстратов В. А. Теория обработки металлов давлением / В. А. Евстратов. – Харьков : Вища шк., Изд-во при Харьк. ун-те, 1981. – 248 с.
8. Сторожев М. В. Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – М. : Машиностроение, 1971. – 424 с.
9. Тарновский И. Я. Деформации и усилия при обработке металлов давлением / И. Я. Тарновский, А. А. Поздеев, О. А. Ганаго. – М. : Машиностроение, 1971. – 234 с.
10. Томсен Э. Механика пластической деформации при обработке металлов / Э. Томсен, И. Янг, Ш. Кобаяши. – М. : Машиностроение, 1979. – 312 с.
11. Матвиенко А. В. Энергосиловые параметры процесса выдавливания резьбы на гайках / А. В. Матвиенко, А. К. Кралин, А. Аль Буруни // Прогрессивные технологии и системы машиностроения : международный сборник научных трудов. – Донецк : ДонГТУ, 2002. – Вып. 19. – С. 141–145.
12. Сопилкин Г. В. Исследование процесса пластического формообразования резьбы на внутренних поверхностях цилиндрических деталей : дис. ... канд. техн. наук: 05.03.05 / Г. В. Сопилкин. – Харьков, 1980. – 200 с.