

КОНСТРУКЦИОННЫЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 621.9.07

РАСЧЕТ ТЯГОВЫХ УСИЛИЙ ПРИ ФОРМООБРАЗОВАНИИ ВНУТРЕННИХ КОНУСОВ МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ

© 2021 г. Д.С. Бурый*, Г.Г. Ильиных, В.С. Пономаренко

Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Россия

**E-mail: rt79olthes@mail.ru*

Формообразование рабочих поверхностей деталей методом пластического деформирования находит широкое применение в производстве. В настоящее время процесс выдавливания применяется при формообразовании поверхностей деталей из пластичных углеродистых сталей. В процессе обработки деталей были проведены измерения, которые показали хорошую сходимость расчетных и экспериментальных данных.

ВВЕДЕНИЕ

Процесс формообразования внутренних конусов очень сложен, особенно при окончательной чистовой обработке, так как ввиду сложной формы и небольшого диаметра отверстия не представляется возможным применить процесс точения.

На износостойкость, усталостную прочность и другие эксплуатационные свойства деталей машин значительное влияние оказывает качество поверхностного слоя металла.

Во всех видах напряженного состояния деталей именно поверхностные слои металла воспринимают максимальные напряжения от внешних нагрузок.

Необходимое качество поверхности деталей обеспечивается технологическими методами обработки деталей на соответствующих инструментах и технологическом оборудовании.

Для улучшения качества поверхностного слоя, а значит и эксплуатационных свойств машины, применяются методы холодного пластического деформирования.

Формообразующая обработка преследует образование на деформируемой заготовке в холодном состоянии поверхности нового профиля при помощи специальных инструментов.

В современном машиностроении широко распространен процесс дорнования, позволяющий с высокой точностью получать детали [1].

РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ

Суммарное усилие деформирования на пуансон-дорн в процессе формообразования конических поверхностей (см. рис. 1) определяется выражением:

$$P_{\Sigma} = P_{\text{д}} + P_{\text{в}},$$

где P_{Σ} – суммарное усилие деформирования, Н; $P_{\text{д}}$ – усилие дорнования цилиндрического отверстия, Н; $P_{\text{в}}$ – усилие выдавливания конуса, Н.

Усилие P_{Σ} влияет не только на жесткость инструмента, но и на его механическую прочность, поэтому необходимо при проектировании процесса производить расчет суммарного усилия деформирования.

В общем виде величина $P_{\text{д}}$ определяется по формуле:

$$P_{\text{д}} = ((K_1 + K_2)F + K_{\text{доп}} + F_1)K_E,$$

где K_1 – составляющая удельного давления для основных деформаций металла с учетом внешнего трения, появляющегося на контактных поверхностях, Па; K_2 , $K_{\text{доп}}$ – составляющие удельного давления течения металла, Па; F – площадь пластически деформируемой области, мм²; K_E – коэффициент неравномерности толщины стенки.

Составляющая удельного давления K_1 определяется по формуле:

$$K_1 = \frac{P + \left(1 + \frac{\mu}{\operatorname{tg} \alpha}\right)}{1 - \mu \operatorname{tg} \alpha} \cdot \ln \left(1 + \frac{i}{d}\right),$$

где P – истинное сопротивление обрабатываемого металла деформированию, Н; μ – коэффициент внешнего трения; α – угол заборного конуса дорна, град; i – диаметральный натяг дорнования, мм; d – диаметр отверстия до дорнования, мм.

Составляющая удельного давления течения металла (K_2), необходимая для преодоления сил трения по цилиндрической ленточке дорна, равна:

$$K_2 = \frac{2P\mu}{d} \cdot b,$$

где b – ширина цилиндрической ленточки дорна, мм; d – диаметр дорна по цилиндрической ленточке, мм.

Составляющая удельного давления течения ($K_{\text{доп}}$), необходимая для дополнительных деформаций, возникающих вследствие неравномерности деформаций, определяется по формуле:

$$K_{\text{доп}} = 0.28P(2\operatorname{tg} \alpha + \mu).$$

Площадь поперечного сечения втулки:

$$F = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4},$$

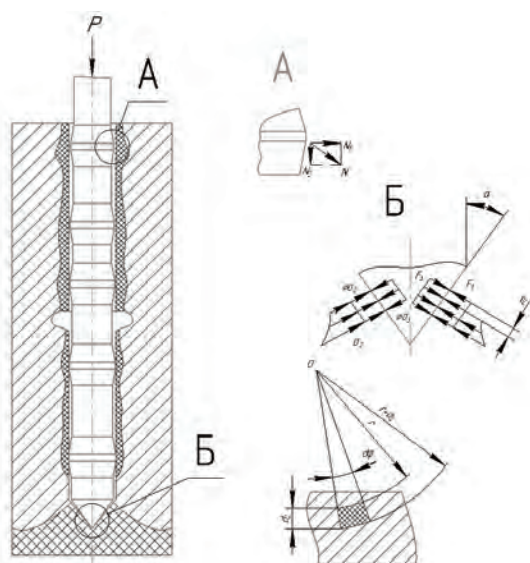


Рис. 1. Схема напряженно-деформированного состояния металла заготовки в момент выдавливания конуса с одновременным дорнованием направляющих отверстий

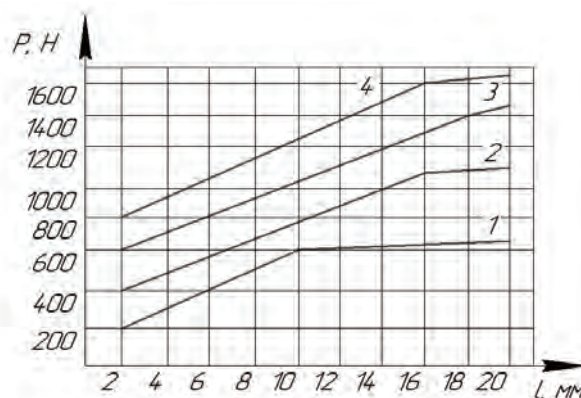


Рис. 2. Усилия дорнования и конфигурация детали – зависимость усилия дорнования от толщины минимальной стенки образцов (1 – сталь 10, $\lambda = 0.0025$; 2 – сталь 50, $\lambda = 0.0065$; 3 – сталь ШХ15, $\lambda = 0.0125$; 4 – чугун СЧ12-28, $\lambda = 0.0125$)

где D – наружный диаметр втулки в рассматриваемом сечении, мм; d – диаметр отверстия втулки в этом же сечении, мм; F – площадь пластически деформируемой области, мм².

$$F_s = \frac{\pi(D_s^2 - d^2)}{4}$$

где F_s – площадь пластически деформируемой области, где проходят дополнительные сдвиги металла, мм²; D_s – величина, характеризующая зону втулки, в которой происходят дополнительные сдвиги металла, мм, определяется по формуле:

$$D_s = 0.68d^2 \left(\frac{E_i}{P_d} + 0.1 \sqrt{\left(10 - \frac{D}{d}\right) \cdot \left(\frac{D}{d} - 1\right) - \frac{3}{4}} \right).$$

где E_i – модуль упругости при растяжении, Па.

Коэффициент неравномерности толщины стенки обрабатываемой детали определяется:

$$K_E = \frac{P_E}{P},$$

где P_E – тяговое усилие при дорновании детали с эксцентриситетом обрабатываемого отверстия относительно наружной поверхности детали, Н.

Увеличение толщины стенки при работе с неизменным натягом вызывает рост тягового усилия дорнования, лишь до некоторого предела (см. рис. 2, 3). Диаграммы тяговых усилий показывают изменения в характере зависимостей, вызванных неравномерной толщиной стенок. Максимальные усилия дорнования при обработке образцов с

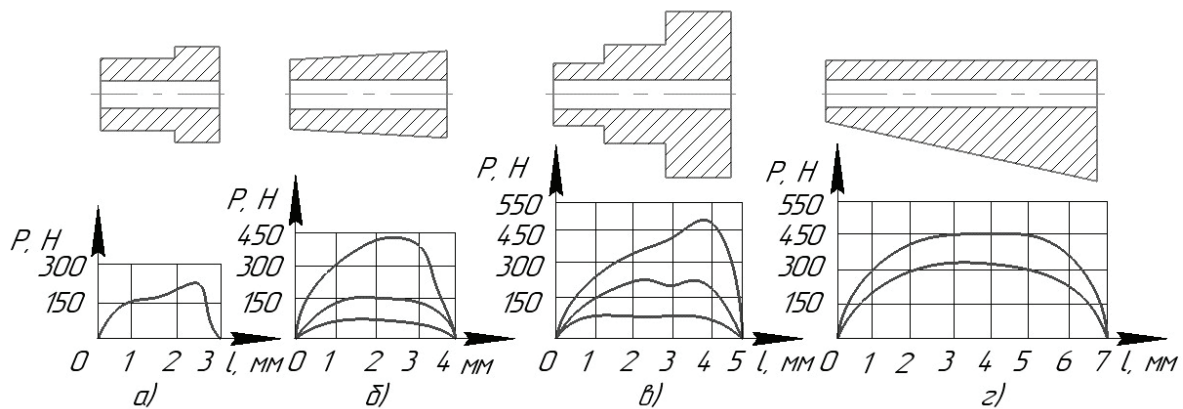


Рис. 3. Диаграммы тяговых усилий при дорновании образцов конфигураций: а, в – симметричных со ступенчатыми изменением толщины стенки; б – симметричного с конусной стенкой; г – конусного (материал образцов – сталь ШХ15)

неравномерной стенкой достигаются быстрее, чем при работе с симметричными стенками. С увеличением натяга дорнования кривые тяговых усилий приобретают более резкие очертания.

Угол наклона кривых $P = f(a)$ к оси абсцисс при работе с одним и тем же натягом в зависимости от толщины стенок образца различен и уменьшается с увеличением толщины стенок образца.

Увеличение обрабатываемого диаметра вызывает рост тягового усилия, которое не подчиняется линейной зависимости.

Кривые, характеризующие зависимость тягового усилия от величины относительного натяга, подчиняются линейной зависимости. Существенное влияние на величину тягового усилия при дорновании отверстия оказывают и механические свойства обрабатываемого материала, увеличивает тяговое усилие дорнования. Производя расчет усилия выдавливания, при рассмотрении детали, направления нормальных и касательных напряжений не совпадают с направлением деформирующего усилия. По поверхности соприкосновения пуансона с деталью возникают касательные напряжения; нормальное напряжение σ_n определяется по формуле:

$$\sigma_n = \psi \sigma_s,$$

где ψ – относительное остаточное сужение, %; σ_s – истинный предел текучести материала, Па.

Величину полного осевого усилия P , передаваемого через пуансон, можно определить, взяв сумму проекций всех сил, возникающих от нормальных и касательных напряжений, на вертикальную ось:

$$P_B = I_1 + I_2 + I_3,$$

где I_1, I_2, I_3 – проекция всех сил, Н.

Вычисление поверхностных интегралов значительно облегчается, если предварительно определить площади F_1, F_2, F_3 , ограниченные эпюрами напряжений и образующей внутренней поверхности.

В соответствие с рис. 4 находим эти площади:

$$F_1 = \psi \sigma_{sr}$$

$$F_2 = \frac{\sigma_s}{\alpha} \left((a+l) \ln \frac{b_2}{b_3} - (l-m) \right),$$

где b_2 – толщина детали на расстоянии m от нижней плоскости конуса, мм; b_3 – толщина детали на расстоянии m от верхней плоскости конуса, мм; l – длина напряжений, мм.

$$F_3 = 0.5 \sigma_{sr}$$

Обозначив средний диаметр поверхности соприкосновения d_c :

$$d_c = \frac{d_1 + d_2}{2},$$

где d_1, d_2 – диаметры поверхности соприкосновения в нижней и верхней плоскостях, мм.

Находим величины I_1, I_2, I_3 :

$$I_1 = \psi \sigma_s \pi d_c (b_2 - b_1),$$

$$I_2 = \frac{\sigma_s}{\alpha} \left(b_2 \ln \frac{b_2}{b_3} - (b_2 - b_3) \right) \pi d_c,$$

$$I_3 = 0.5 \sigma_s \pi d_c h,$$

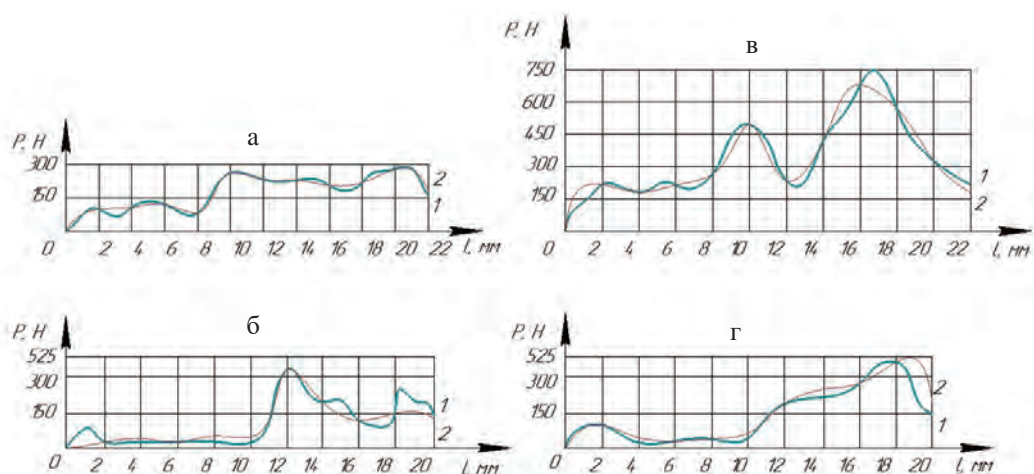


Рис. 4. Диаграмма тяговых усилий при дорновании центрального отверстия корпуса распылителя многозубым дорно-пуансоном: а при $\lambda = 0.005$; б – $\lambda = 0.0075$; в – $\lambda = 0.009$; г – $\lambda = 0.011$ (кривая 1 – экспериментальные данные, а кривая 2 – расчетные данные)

где b_1 – толщина детали на расстоянии t от средней плоскости конуса, мм; h – высота детали, мм.

Полное осевое усилие, действующее на пуансон в процессе давления конуса:

$$P_B = \sigma_s \pi d_c \left(\psi (b_2 - b_1) + \frac{2,3b_2}{\alpha} \lg \frac{b_2}{b_3} - \frac{b_2 \cdot b_3}{\alpha} + 0,5h \right).$$

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Размеры обрабатываемых отверстий в корпусе распылителя показаны в табл. 1, а размеры зубьев дорно-пуансона в табл. 2.

Затупление вершины конуса пуансона вызывает рост усилия выдавливания и создает трудности, связанные с необходимостью увеличения жесткости инструмента.

Одним из путей повышения усталостной прочности рабочей части пуансона и его размерной стойкости может служить также использование комбинированного пуансона, у которого рабочей часть 1 выполнена из твердого сплава ВК8 или

Таблица 1. Размеры обрабатываемых отверстий в корпусе распылителя (I-I – от торца А на расстоянии 5 мм, II-II – 10 мм, III-III – 17 мм, 1-1 – от торца Б на расстоянии 3 мм, 2-2 – 12 мм, 3-3 – 17 мм)

№ детали	Размеры отверстий диаметром 6 и 5, мм					
	I-I	II-II	III-III	1-1	2-2	3-3
1	5.952	5.948	5.948	4.958	4.944	4.960
2	6.028	6.008	5.970	4.974	4.958	4.968
3	5.962	5.948	5.952	4.976	4.960	4.992
4	5.982	5.980	5.982	5.000	4.974	4.996

Таблица 2. Размеры зубьев дорно-пуансона

№ дорна	Диаметры зубьев, мм				
	Номер зуба				
	1	2	3	4	5
03	5.09	5.11	5.97	5.97	5.97
3	5.07	5.07	5.96	5.96	5.96
4	5.06	5.06	5.95	5.95	5.95
05	5.11	5.13	5.98	5.98	5.98
04	5.10	5.12	5.975	5.975	5.98

ВК6М (см. рис. 5а). В этом случае общая размерно-прочностная стойкость такого комбинированного пуансона по сравнению с пуансонами, изготовленными из стали Р18, возрастает в 20 раз. Применять другие марки твердых сплавов нецелесообразно из-за их низкой износостойкости (ВК15) или малой контактной прочности (Т15К6). Сплав Т30К4, обладая большей износостойкостью, чем, сплавы ВК2 и ВК6М, уступает им по прочности на изгиб. Это обстоятельство следует учитывать в ус-

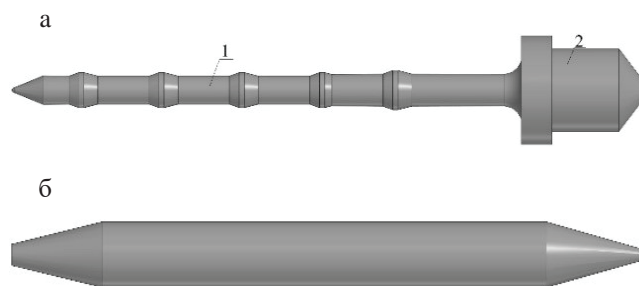


Рис. 5. а – пуансон комбинированный: 1 – стержень; 2 – твердосплавная вставка, б – дорн из стали X12M

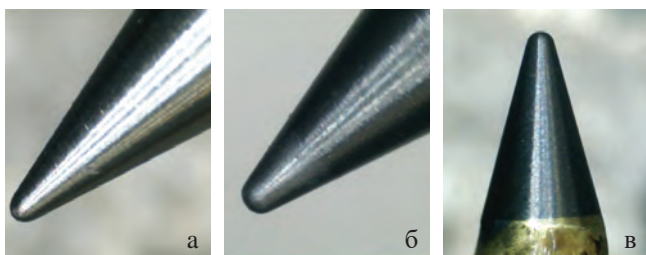


Рис. 6. а – дорн прошлифованный и отполированный после обработки деталей из стали Х12М, б – дорн из инструментальной стали Р6М5, в – напайный дорн с напайным наконечником из стали Р6М5

ловиях обработки конусов при ударных нагрузках [2, 3].

В процессе обработки конуса колодца корпуса распылителя используется дорн, из материала – сталь Х12М (см. рис. 5б, 6а).

Для увеличения стойкости дорна предлагается использовать материал Р6М5 (см. рис. 6б).

Использование напайного дорна позволит удешевить изготовление дорна за счет уменьшения материала Р6М5 по сравнению с цельным дорном (см. рис. 6в).

Так как шероховатость, некруглость и непрямолинейность выдавленной поверхности зависят от соответствующих параметров пуансона (дорна), особое внимание следует уделять снижению коэффициента трения в зоне контакта материала заготовки и рабочей поверхности пуансона (дорна).

ВЫВОДЫ

Экспериментальная проверка величин тяговых усилий (табл. 1 и 2) в процессе дорнования цен-

трального отверстия корпуса распылителя показала сходимость расчетных и экспериментальных данных (см. рис. 4), результаты которых позволяют сделать выводы:

1. Непрямолинейность образующей рабочей поверхности конуса инструмента увеличивается в зависимости от числа обработанных деталей; характер износа рабочей части конуса указывает на то, что в районе заострения конуса образуется застойная зона, в то время как на расстоянии от вершины наблюдается интенсивное течение металла, которое приводит к «вымыванию» воронки.

2. Некруглость рабочей поверхности пуансона и дорна после обработки деталей увеличивается более чем в 10 раз.

3. Высота шероховатостей рабочей поверхности пуансона и дорна после обработки деталей увеличивается более чем в 2 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2015. – 320 с.
2. Исаев А.Н. Механико–математическое моделирование формообразующих операций в процессах изготовления изделий из трубчатых заготовок / ГОУ Рост. гос. акад. с.–х. машиностроения, Ростов–на–Дону, 2014. – 272 с.
3. Моделирование геометрии многозубого дорна для обработки отверстий деталей из труб / Исаев А.Н., Лебедев А.Р., Арапов П.С. / СТИН. 2016. №2. С. 8–14.