

УДК 621.777:621.77.01

**ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТА УСИЛИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ ХОЛОДНОМ ВЫДАВЛИВАНИИ**

**В. В. Драгобецкий, В. Г. Загорянский, О. В. Луговая**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, 39600, г. Кременчуг, Украина. E-mail: vdrag@ukr.net; zagor\_vlad@ukr.net

Обобщены сведения об основных расчетных зависимостях для определения полного и удельного усилия для разных видов холодного выдавливания, проанализировано для каждого вида выдавливания количественное влияние входящих в зависимости факторов. Это облегчает технологическую подготовку производства при переводе технологии на изготовление изделий из менее прочных сплавов, что позволяет, за счет упрочнения при холодной объемной штамповке, обеспечить эксплуатационные характеристики как для изделий из более прочного материала, полученных резанием.

**Ключевые слова:** холодное выдавливание, полное и удельное усилие, основные факторы.

**BASIC FACTORS WHICH DETERMINE CALCULATION DEPENDENCES FOR EFFORT OF DEFORMATION AT DIFFERENT KINDS OF COLD EXTRUSION**

**V. V. Dragobetsky, V. G. Zagoryansky, O. V. Lugova**

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University  
vul. Pershotravneva, 20, 39600, Kremenchuk, Ukraine. E-mail: vdrag@ukr.net; zagor\_vlad@ukr.net

For the different types of the cold squeezing out calculation dependences are generalized for determination of complete and specific effort of squeezing out, for every type of squeezing out basic influences are selected. It facilitates technological preproduction during the translation of technology on making of wares from less durable alloys, that allows, due to work-hardening at the cold by volume stamping, to provide operating descriptions as for the wares from more durable material, got cutting.

**Key words:** cold extrusion, complete and specific effort, basic factors.

**ОСНОВНІ ЧИННИКИ, ЩО ВИЗНАЧАЮТЬ ЗАЛЕЖНОСТІ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ЗУСИЛЛЯ ДЕФОРМУВАННЯ ПРИ ХОЛОДНОМУ ВИДАВЛЮВАННІ**

**В. В. Драгобецький, В. Г. Загорянський, О. В. Лугова**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, 39600, м. Кременчук, Україна. E-mail: vdrag@ukr.net; zagor\_vlad@ukr.net

Для різних видів холодного видавлювання узагальнені відомості про основні розрахункові залежності для визначення повного і питомого зусилля видавлювання, для кожного виду видавлювання проаналізований кількісний вплив чинників, що входять до залежностей. Це полегшує технологічну підготовку виробництва при переводі технології на виготовлення виробів із менш міцних сплавів, що дозволяє за рахунок зміцнення під час холодної об'ємної штамповки забезпечити експлуатаційні характеристики як для виробів із більш міцного матеріалу, отриманих різанням.

**Ключові слова:** холодне видавлювання, повне та питоме зусилля, основні чинники.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Одной из наиболее высокоэффективных технологических операций холодной объемной штамповки является выдавливание. Оно применяется как самостоятельная операция (простые процессы выдавливания - прямое, обратное, боковое, радиальное; комбинированные процессы - сочетание двух и более простых процессов [1]), так и в сочетании с другими операциями холодной объемной штамповки, например осадкой или высадкой [2].

Установлению взаимосвязи различных факторов на величину полных и удельных давлений при холодном выдавливании, а также степени их влияния посвящено немало работ, обобщающих производственный опыт, результаты теоретических и экспериментальных исследований [1-9].

Все виды выдавливания, если принять деформацию однородной по всему объему очага течения, характеризуются одинаковой механической схемой: напряженное состояние - трехосное неравномерное сжатие ( $|\sigma_1| > |\sigma_2| \geq |\sigma_3|$ ) [1].

Согласно приведенной в работе [3] классификации методов обработки давлением по напряженно-деформированному и пластическому состояниям обрабатываемого металла все методы разделены на семь групп. Изменение напряженного и пластического состояния при переходе от первой группы методов обработки - прессование выдавливанием и штамповка под прессом в закрытых штампах с уширением без противодействия - к шестой (свободная ковка без бокового давления (осадка и вытяжка) на плоских бойках, прокатка сортового проката в открытых ручьях с неограниченным уширением, прокатка на гладких валках) характеризуется уменьшением пластичности, снижением допустимой деформации, понижением сопротивления деформации или деформирующей силы [3]. Поэтому первая и вторая (прессование выдавливанием без противодействия в контейнерах, штамповка в закрытых штампах без уширения и без противодействия) группы методов обработки давлением выгодны (особенно первая группа) с точки зрения высокой пластичности и

почти неограниченной допустимой деформации обрабатываемого материала и невыгодны в силу необходимости применения машин большой мощности, т.к. сопротивление деформации обрабатываемого материала при таких напряженных состояниях значительно возрастает.

Большим преимуществом данных методов обработки является также стабильность процессов деформации в отношении постоянства основных термомеханических параметров обработки давлением (скорости, степени и температуры деформации) и равномерности деформации.

Поэтому методы обработки первой и второй групп следует применять там, где необходимо повысить пластичность обрабатываемых сплавов и однородность свойств изготавливаемых полуфабрикатов. Методы обработки третьей (штамповка в закрытых штампах с ограниченным уширением на молотах и прессах (безоблойная штамповка), штамповка на горизонтально-ковочных машинах в закрытых штампах, штамповка в открытых штампах с ограниченным уширением на молотах и прессах) и четвертой (штамповка в открытых штампах с неограниченным уширением на молотах и прессах) групп следует применять для обработки сплавов с большим запасом пластичности и когда от деформируемых полуфабрикатов не требуется верхний предел механических свойств.

Штамповку выдавливанием применяют для получения поковок преимущественно из низкоуглеродистых и низколегированных сталей, в некоторых случаях – из среднеуглеродистых [4]. Показано [5], что повышение содержания углерода в стали с 0,1 до 0,3% приводит к увеличению удельной деформирующей силы выдавливания примерно на 25%.

Прочностные характеристики металлов и сплавов являются основным фактором, определяющим пригодность к холодному выдавливанию. Как правило, у пригодного к выдавливанию материала в состоянии поставки максимальный предел прочности на разрыв не должен превышать 600 МПа. Во многих случаях пригодность материала к холодной штамповке оценивают твердостью, которая должна быть не более НВ 230.

Целью работы является обобщение сведений об основных известных расчетных зависимостях для определения полного и удельного усилия при холодном выдавливании, а также анализ для каждого вида выдавливания количественного влияния входящих в зависимости факторов.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.** Для выдавливания требуются большие удельные усилия, т.к. в холодном состоянии металл обладает высоким сопротивлением деформированию (для алюминиевых сплавов 500–1200 МПа, для сталей 2000–3000 МПа) [10].

Стойкость пуансона и матриц для выдавливания обеспечивается применением для каждого типа металла оптимальных покрытий поверхности заготовок и смазок.

Холодная штамповка выдавливанием рентабельна, если стойкость инструмента позволяет штамповать 10000–15000 поковок. Для изготовления рабочего инструмента, в частности пуансонов, наибольшее применение получили сплавы Р18, Р6М5, Х12, Х12Ф1 и др. [4]. Прочностные усталостные характеристик этих сплавов позволяют рентабельно изготавливать поковки холодной штамповкой выдавливанием при приложении удельных деформирующих сил 2000–2500 МПа.

Удельная деформирующая сила на пуансоне по условиям экономически целесообразной стойкости инструмента не должна превышать 1500 МПа для сталей 6ХЗФС, 7ХЗ, Х12М, Х12Ф1 и 2500 МПа для высокопрочных сталей типа Р6М5 и ЭП761 [11].

Необходимость приложения к заготовке для ее деформирования настолько высоких удельных сил, что в инструменте возникают напряжения, близкие к пределу прочности, предъявляют высокие требования к точности методов расчета деформирующих сил [4]. При проектировании технологических операций разрабатывают схемы деформирования, осуществление которых возможно при приложении меньших сил.

При разработке технологии холодного выдавливания зачастую используются результаты и рекомендации, полученные экспериментально и при внедрении в производство.

Удельное и полное усилие деформации отражает в расчетах величину напряжений и их распределение на поверхности контакта металла с инструментом, которая является одним из основных критериев оценки процесса формоизменения [1].

На величины удельного и полного усилия оказывает влияние ряд факторов, к числу которых относятся [1]:

- физическая природа штампуемого материала (содержание основных компонентов и примесей, структура, состояние и т.д.);
- кинематика движения инструмента и деформируемого металла (выдавливание обратное, прямое, радиальное и т.д.);
- степень деформации при выдавливании и ее равномерность (форма и размеры исходной заготовки и получаемого полуфабриката);
- условия трения (подготовка и физико-химическое состояние поверхности заготовки и инструмента, степень и стабильность разделения относительно смещающихся поверхностей металла и инструмента, скорость их относительного смещения, соотношение между реактивными и активными силами трения и т.д.);
- форма, размеры, качество поверхности деформирующих частей инструмента (матрицы, пуансоны, оправки и т. д.);
- тепловой эффект при деформации и его влияние на структуру деформируемого металла и условия трения;
- скорость деформации.

Кроме этого, в каждом отдельном случае необходимо учитывать условия геометрического и физи-

ко-химического подобия, масштабный и другие факторы. Множественность действующих факторов и их сложная взаимосвязь привели к тому, что для определения усилия выдавливания предложено значительное количество формул как отечественными, так и зарубежными исследователями. Однако большинство из них не получило признания в связи с тем, что вводимые в них уточнения не дают практически ощутимого эффекта вследствие сложности количественной оценки указанных факторов в каждом конкретном случае.

В связи с этим рекомендуется сопоставлять полученные расчетом данные с результатами экспериментальных замеров, проведенных в условиях, наиболее близких к проектируемому.

Удельное усилие при прямом выдавливании сплошных и полых деталей [1,12]

$$p \cong \sigma_{cp} \left( \varepsilon + 1 + \frac{4\mu L_k}{t} \right), \quad (1)$$

где  $\sigma_{cp}$  – средняя по очагу деформации величина истинного сопротивления с учетом упрочнения и неравномерности деформации.

С достаточной для практики точностью можно принять

$$\sigma_{cp} \cong \frac{\sigma_n + \sigma_k}{2}, \quad (2)$$

где  $\sigma_n$  и  $\sigma_k$  – напряжение текучести до и после деформации в данном переходе, определяемые по кривым упрочнения при заданных степенях деформации  $\varepsilon_n$  и  $\varepsilon_k$  до и после перехода;

$L_k$  – длина калибрующего пояса матрицы;

$\varepsilon$  – логарифмическая деформация. При прямом выдавливании и редуцировании логарифмическая деформация составляет [2]

$$\varepsilon = \ln \frac{F}{f}, \quad (3)$$

где  $F$  и  $f$  – площади поперечного сечения приемника матрицы или заготовки на входе в матрицу и заготовки на выходе из конического участка матрицы:

$$F = \frac{\pi(D^2 - d_1^2)}{4}, \quad (4)$$

$$f = \frac{\pi(d^2 - d_1^2)}{4}, \quad (5)$$

где  $D$  – диаметр приемника матрицы (при редуцировании и калибровке – наружный диаметр исходной заготовки);  $d$  – диаметр цилиндрического пояса матрицы;  $d_1$  – диаметр центральной ступени пуансона (для сплошной заготовки  $d_1 = 0$ ).

Рекомендуемые и предельно допустимые значения степени деформации  $\varepsilon$  при выдавливании для различных металлов и сплавов приводятся в [1, 2]. Например, для сталей 08, 10 рекомендуемая степень деформации при прямом выдавливании сплошного стержня составляет 70%, предельно допустимая степень деформации – 80%; при обратном выдавливании полого стержня рекомендуемая степень де-

формации для этих сталей составляет 60%, предельно допустимая степень деформации – 75%.

Во избежание резкого роста усилия степени деформации  $\varepsilon$  следует принимать не более 55–60%, а для сплавов с повышенным сопротивлением деформированию – не более 40–45% [1].

Величина  $\mu$  принимается для расчетов в зависимости от материала, качества подготовки поверхности и степени деформации [1]. Для алюминия и сплавов на его основе (анодирование + животный жир)  $\mu = 0,12-0,15$ ; для меди и сплавов на ее основе (пассивирование + животный жир)  $\mu = 0,08-0,10$ ; для сталей, железа, никеля и сплавов на никелевой основе (фосфатирование или оксалатирование + омыливание)  $\mu = 0,08-0,10$ .

Величины коэффициентов трения  $\mu$ , принимаемые при расчете технологических усилий холодной объемной штамповки углеродистой стали, меди, латуни, алюминия для различных видов деформации, степени деформации, подготовки поверхности, приведены в [2, 5, 11].

Для сплошных круглых заготовок толщина стенки  $t = d$ , а для сложных сечений  $t$  определяется по средним диаметрам.

Профиль матриц для прямого выдавливания обычно применяют конический с цилиндрическим пояском. Величины  $\alpha$  и  $L_k$  оказывают значительное влияние на усилие выдавливания, они принимаются в зависимости от штампуемости материала, требований к геометрической форме штампуемой детали и скоростных условий деформации [1].

В случае прямого выдавливания поковок в виде цилиндрического стержня с утолщением на одном конце (применяемого вместо высадки), может быть использована расчетная зависимость для определения давления [13]:

$$p = \sigma_{s2} \left( \frac{\mu_2}{\sin \alpha} + \frac{1}{1 + \cos \alpha} \right) \ln \frac{F}{f} + \sigma_{s3} \frac{2H}{D} + \sigma_{s1} \frac{4\mu_1 l}{d}. \quad (6)$$

Если заходный угол матрицы  $2\alpha$  больше угла естественного течения, то в формулу (1) следует подставлять угол  $100-130^\circ$ .

Для малых углов  $\alpha$  (при  $\alpha \leq 30^\circ$ , допуская отклонение до 6 %) формула (6) упрощается, т.к.  $\sin \alpha \approx \alpha$  и  $\cos \alpha \approx 1$ ;

$$p = \sigma_{s2} \left( 1 + \frac{\mu_2}{\alpha} \right) \ln \frac{F}{f} + \sigma_{s3} \frac{2H}{D} + \sigma_{s1} \frac{4\mu_1 l}{d}. \quad (7)$$

В формулах (6), (7) напряжение течения  $\sigma_{s1}$  соответствует цилиндрическому выходному участку матрицы ( $d_k < d_0$ ),  $\sigma_{s2}$  – коническому участку матрицы,  $\sigma_{s3}$  – цилиндрическому участку-приемнику ( $D \geq d_0$ ) матрицы;  $d_0$  и  $d_k$  – соответственно диаметры исходной заготовки и выдавленной детали;  $D$  и  $H$  – диаметр и глубина приемного участка матрицы;  $\mu_1$  и  $\mu_2$  – коэффициенты трения в цилиндрическом и коническом участках матрицы. Коэффициент контактного трения  $\mu_1 \approx \mu_2$  для процессов холодного выдавливания принимается равным 0,08–0,12.

Давление  $p$  при редуцировании рассчитывается по зависимости [2, 14]:

$$p = \frac{\sigma_s^* q}{q-1} \left[ \left( \frac{F}{f} \right)^{q-1} - 1 \right] + \frac{4\sigma_s^* \mu l}{d} \left( \frac{F}{f} \right)^{q-1}, \quad (8)$$

в которой  $q = \frac{\mu + tg\alpha}{(1 - \mu tg\alpha) tg\alpha}$ .

Здесь  $\sigma_s^*$  – приведенное напряжение текучести ( $\sigma_s^* = \beta\sigma_s$ ,  $\beta$  – коэффициент Лоде, учитывающий влияние промежуточного нормального напряжения на переход в пластическое состояние,  $\beta = 1 \dots 1,15$ );  $\sigma_s$  – напряжение течения материала изделия в конце процесса (с учетом упрочнения), МПа,  $l$  – ширина цилиндрического пояса матрицы (длина цилиндрического фильера);  $\sigma_s = A\epsilon^n$ , где  $A$  и  $n$  – коэффициенты аппроксимации кривой упрочнения [11] (табл. 1).

Таблица 1 – Механические характеристики материалов, используемых для холодной объемной штамповки (в отожженном состоянии)

Марка стали	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	Коэффициенты кривой упрочнения	
			A	n
10	410	325	728,4	0,208
20	515	365	807,2	0,214
30	576	400	880	0,277
40	590	500	360,5	0,345
45	730	483	1000	0,175
18ХГТ	725	650	1016,6	0,138
ШХ15	710	581	1340	-

Обратное выдавливание (рис. 1) характеризуется, по сравнению с прямым, значительно более сложными и тяжелыми условиями работы инструмента.

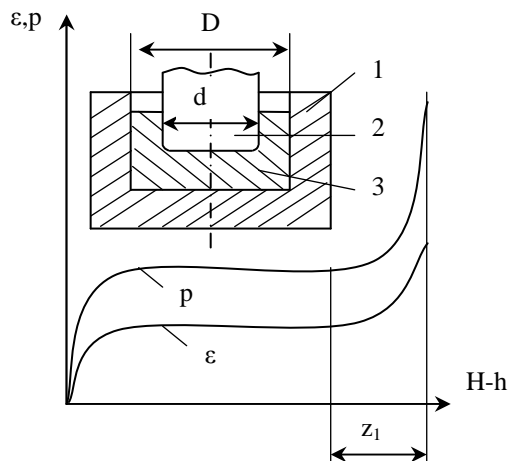


Рисунок 1 – Схема обратного выдавливания и кривые изменения деформации  $\epsilon$  и давления  $p$  [2]:

1 – матрица; 2 – пуансон; 3 – заготовка;

$H$  и  $h$  – начальная высота заготовки и текущее значение толщины дна выдавливаемой детали;

$z_1$  – ход пуансона в конечной стадии выдавливания

Определению усилия при обратном выдавливании и влиянию на него различных факторов посвящен ряд работ.

В работе [14] установлено влияние на усилие при обратном выдавливании следующих факторов:

- 1) степени деформации по сечению  $\epsilon$  и высоте  $\phi$ ;
- 2) относительного радиуса скругления  $J$  рабочей части пуансона.

Оптимальным по усилию для сплавов с повышенным сопротивлением деформации является интервал  $\epsilon=0,3-0,4$ .

С увеличением относительного радиуса скругления  $J$  пуансона необходимое усилие выдавливания возрастает, интенсивность возрастания увеличивается с повышением степени деформации.

Усилие на установившейся стадии обратного выдавливания можно определить по приближенной формуле [7]:

$$P = pF = Fk\sigma_\epsilon \ln \left( \frac{F}{F - F_n} \right), \quad (9)$$

где  $p$  – давление выдавливания;

$F$  – площадь поперечного сечения заготовки;

$F_n$  – площадь поперечного сечения пуансона;

$k$  – коэффициент, который составляет для алюминия 3,5–4, для малоуглеродистой стали, меди и латуни 2,5–3.

Усилие при обратном выдавливании полых деталей,  $H$  [1]:

$$P = 0,52 \left( \frac{R_m}{r_{kn}} + \phi \right) \sigma_\epsilon \left[ \left( \frac{R_m^2 - r_n^2}{R_m^2 - r_{kn}^2} - 1 \right) R_m^2 + r_n^2 \right] \theta, \quad (10)$$

где  $R_m$  – радиус рабочей полости матрицы, мм;

$r_n$  – радиус перехода торца пуансона, мм;

$r_{kn}$  – радиус рабочей части пуансона, мм;

$\phi$  – степень деформации дна детали;

$\sigma_B$  – предел прочности материала детали до выдавливания (после отжига), МПа;

$\theta$  – коэффициент, учитывающий влияние наклона рабочей части пуансона: при  $\alpha=75^\circ$   $\theta=0,8$ ; при  $\alpha=60^\circ$   $\theta=0,85$ ; при  $\alpha=30^\circ$   $\theta=1,1$ .

Силы трения в операцияхковки и штамповки возникают не только в результате пластического течения деформируемой заготовки, но и в результате перемещения заготовки или штамповой оснастки [4]. В зависимости от направления движения рабочего инструмента или заготовки в процессе деформирования силы трения могут способствовать течению металла и могут создавать сопротивление трению. В первом случае силы трения, определяемые коэффициентом трения  $\mu_m$ , относят к числу активных, во втором – реактивных. Равнодействующая сил трения на контактной поверхности с торцом пуансона, определяемая коэффициентом трения  $\mu_n$ , создает сопротивление течению металла.

Активные силы трения при обратном выдавливании с активными силами трения создаются в результате движения контейнера в сторону истечения металла. Возникновение активных сил трения позволяет получать выдавливанием более качественные изделия. Материал заготовки, выдавливаемый из-под торца пуансона, течет в зазор между пуансоном и контейнером. Если относительная скорость контейнера возрастает, то силы трения, приложен-

ные к заготовке, также возрастают. Обратное выдавливание с активными силами трения при различных скоростях контейнера позволяет снизить силы деформирования до 30%. Если же контейнер не закреплен и под действием сил трения, вызванных течением металла деформируемой заготовки, перемещается в направлении течения, то возможно снижение силы выдавливания только до 8% по сравнению с обычным выдавливанием.

Холодную штамповку выдавливанием стремятся применять также для изготовления поковок из труднодеформируемых металлов и сплавов, напряжение текучести которых более 700 МПа.

К труднодеформируемым относят металлы и сплавы, имеющие низкую технологическую пластичность, высокое сопротивление деформированию, узкий температурный интервал обработки давлением, боятся перегрева и активно взаимодействуют с окружающей атмосферой. К упомянутым относят высоколегированные стали, сплавы на никелевой основе, титановые, а также многие современные сплавы цветных и тугоплавких металлов.

Под деформируемостью понимается показатель, учитывающий одновременно способность металлов и сплавов к пластическому деформированию и характер наблюдаемого при этом разрушения [8].

Деформируемость металлов и сплавов при обработке давлением характеризуется пластичностью и сопротивлением деформации.

При выдавливании труднодеформируемых материалов удельная сила деформирования, приложенная к торцу пуансона, может быть высокой. В этом случае трудно ожидать удовлетворительной стойкости рабочих элементов штамповой оснастки.

Для случая гладкого пуансона с активными силами трения удельная деформирующая сила, необходимая для обратного выдавливания [4]:

$$q = - \left[ 3 \sqrt{\frac{(1 - 2\mu_m R)(0,5 + \mu_n)}{R^2 - 1}} + \frac{R^2 + 3}{\sqrt{3}\sqrt{R^2 + 3}} + 0,82 \right], \quad (11)$$

где  $R = \frac{D_0}{r}$ ,  $R$  – радиус замкнутой полости, из которой происходит истечение металла при выдавливании,  $r$  – радиус рабочего инструмента (пуансона);  $\mu_m$  – коэффициент трения, определяющий силы трения при перемещении заготовки или штамповой оснастки (в зависимости от направления движения рабочего инструмента или заготовки в процессе деформирования силы трения разделяют на активные, которые могут способствовать течению металла, и реактивные силы, которые могут создавать сопротивление течению);  $\mu_n$  – коэффициент трения, определяющий равнодействующую сил трения на контактной поверхности с торцом пуансоном, создающую сопротивление течению металла.

Также известны выражения для определения основных параметров процесса обратного выдавливания (удельной силы деформирования и относительной высоты очага пластической деформации) с использованием активных сил трения, полученные А.М. Дмитриевым, приведенные в [9].

Зависимости для расчета удельных деформирующих сил при боковом выдавливании для случаев двустороннего и одностороннего деформирования приведены в [4] (из-за их сложности здесь не указываются).

Для удобства определения при боковом выдавливании удельных деформирующих сил, отнесенных к напряжению текучести, построены номограммы для стадий истечения и заполнения [16]. Эти номограммы приведены также в [17].

Усилие при радиальном выдавливании [1, 15]

$$P = F_0 \sigma_{cp} \left[ \ln \left( \frac{D}{d} \right)^2 + 1 \right], \quad (12)$$

где  $F_0$  – площадь поверхности заготовки;  $D$  – наружный диаметр шестерни;  $d$  – внутренний диаметр шестерни (по впадине зуба).

Аналитический подход к определению усилия радиального выдавливания представлен в [4]. Усилие радиального выдавливания составляет при этом

$$P = P_1 = P_2, \quad (13)$$

где  $P_1$  – усилие, затрачиваемое на деформирование в области фланца;  $P_2$  – усилие, затрачиваемое на преодоление сил контактного трения при проталкивании недеформируемой части заготовки в контейнере.

После преобразования соответствующих выражений получено [4] выражение для определения средних удельных сил на торце пуансона при радиальном выдавливании (из-за его сложности здесь не приводится).

Комбинированное выдавливание (рис. 2) совмещает прямое и обратное выдавливание без ограничения течения металла в обоих направлениях.

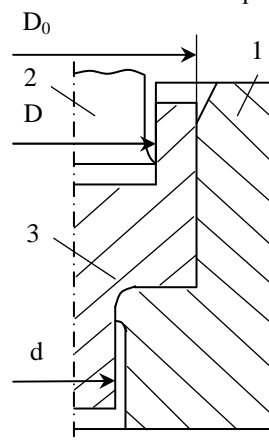


Рисунок 2 – Расчетная схема комбинированного выдавливания [2]: 1 – матрица; 2 – пуансон; 3 – заготовка

Максимальное удельное усилие (наибольшее значение среднего удельного усилия на торце пуансона) при комбинированном выдавливании [5, 18]

$$\delta_{\max} = \sigma_s \left[ \frac{D_0^2}{D^2} \ln R + \frac{H}{D} \left( 1 + \frac{d}{D} \right) R \right] \left( 1 + \frac{2\mu}{3} \frac{D^3 - d^3}{D^2 H} \right), \quad (14)$$

$$R = \frac{D_0^2}{D_0^2 - D^2 + d^2}, \quad (15)$$

где  $H$  – высота заготовки;  $D_0$  – соответственно исходный диаметр заготовки, равный диаметру контейнера (матрицы);  $D$  – диаметр полости детали;  $d$  – диаметр сплошной выдавленной части изделия (отверстия в дне контейнера).

Расчетное усилие может также определяться по зависимостям [19]:

– для схемы прямого выдавливания

$$P = 0,1q(F_m - f), \quad (16)$$

– для схемы обратного выдавливания

$$P = 0,1qF_n, \quad (17)$$

где  $P$  – усилие выдавливания, Н;  $F_n$  – площадь поперечного сечения пуансона, мм<sup>2</sup>;  $F_m$  – площадь поперечного сечения контейнера, мм<sup>2</sup>;  $f$  – площадь поперечного сечения фильеры матрицы, мм<sup>2</sup>;  $q$  – давление течения, МПа.

Для определения давления течения  $q$  имеются аналитические зависимости, полученные аппроксимацией экспериментальных данных для различных металлов заготовки [19].

Например, для стали 10 (для прямой и обратной схемы выдавливания соответственно):

$$q = 249\varepsilon^2 - 275\varepsilon + 273, \quad (18)$$

$$q = 217\varepsilon^2 - 224\varepsilon + 242. \quad (19)$$

В аналитических зависимостях давление течения выражено во внесистемных единицах (кгс), поэтому для приведения к МСИ (в МПа) значения  $q$  умножаем его на 10, и это значение подставляем в зависимости для расчетного усилия  $P$ . Коэффициент 0,1 в этих зависимостях позволит получить правильное значение расчетного усилия  $P$  в ньютонах.

Правильность расчетных усилий в значительной мере зависит от точности определения напряжения текучести (истинного сопротивления деформированию) штампуемого материала [20]. Для этого необходимо пользоваться кривыми упрочнения, построенными при испытании образцов, претерпевших тот вид термической и пластической обработки, которому подвергаются заготовки перед рассматриваемой операцией штамповки.

Механические прессы, предназначенные для холодного выдавливания, отличаются повышенной жесткостью и точностью направления ползуна. При выборе оборудования предпочтительны прессы с электронными приспособлениями, регулируемыми скоростью перемещения пуансона и величиной технологических усилий на протяжении всей операции выдавливания. Пресс проверяют по размерам штампового пространства и величине рабочего хода выталкивателя. В мелкосерийном производстве лучше использовать менее производительные, но более универсальные гидравлические прессы. Для выдавливания коротких деталей можно применять кривошипно-коленные чеканочные прессы.

**ВЫВОДЫ.** Для различных видов холодного выдавливания обобщены расчетные зависимости для

определения полного и удельного усилия выдавливания, для каждого вида выдавливания проанализировано количественное влияние входящих в зависимости факторов. Это облегчает технологическую подготовку производства при переводе технологии на изготовление изделий из менее прочных сплавов, что позволяет, за счет упрочнения при холодной объемной штамповке, обеспечить эксплуатационные характеристики как для изделий из более прочного материала, полученных резанием.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Головин В.А., Митькин А.И., Резников А.Г. Технология холодной штамповки выдавливанием. – М.: Машиностроение, 1970. – 210 с.
2. Ковка и штамповка: Справочник. В 4-х т. / Ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1987 – Т. 3. Холодная объемная штамповка / Под ред. Г.А. Навроцкого. – 1987. – 384 с.
3. Ковка и штамповка цветных металлов: Справочник / Н.И. Корнеев, В.М. Аржаков, Б.Г. Бармашенко и др. – М.: Машиностроение, 1971. – 232 с.
4. Овчинников А.Г. Основы теории штамповки выдавливанием на прессах: Учебное пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 1983. – 200 с.
5. Холодная объемная штамповка: Справочник / Под ред. Г.А. Навроцкого. – М.: Машиностроение, 1973. – 496 с.
6. Митькин А.Н. Определение усилий при холодном выдавливании. – М.: НИИТАвтомпром, 1957. – 95 с.
7. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. – М.-Л.: Машиностроение, 1965. – 788 с.
8. Жолобов В.В., Зверев Г.И. Прессование металлов. – М.: Металлургия, 1971. – 456 с.
9. Технологияковки и объемной штамповки. Часть 1: Объемная штамповка выдавливанием: учебное пособие для вузов / А.М. Дмитриев, А.Л. Воронцов. – М.: Высшая школа, 2002. – 400 с.
10. Материаловедение и технология металлов / Г.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.М. Матюнин и др. – М.: Высшая школа, 2001. – 638 с.
11. Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение. Технологии заготовительных производств. Т. III-2 / И.Л. Акаро, Р.А. Андриевский, А.Ф. Аржанов и др.; Под общ. ред. В.Ф. Мануйлова. 1996. – 736 с.
12. Губкин С.И. Пластическая деформация металлов. Т. I-III. – М.: Металлургиздат, 1960-1961.
13. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. Учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
14. Деордиев Н.Т. Обработка деталей редуцированием. – М.-К.: Машгиз, 1960. – 155 с.
15. Фаворский В.Е. Холодная штамповка выдавливанием / В. Е. Фаворский. – М., Л.: Машиностроение, 1966. – 200 с.
16. Овчинников Л.Д., Шубин И.И., Пахомов Е.В. Штамповка поковок с отрезками в закрытых штампах / В кн.: Технология изготовления заготовок

в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1971. – С. 98–107.

17. Ковка и штамповка: Справочник. В 4-х т. / Ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1986 – Т. 2. Горячая штамповка / Под ред. Е.И. Семенова. – 1986. – 592 с.

18. Оленин Л.Д. Расчет технологических переходов и конструирование инструмента для холодного комбинированного выдавливания // Кузнечно-штамповочное производство. – 1972. – № 1. – С. 9–18.

19. Штамповка деталей холодным выдавливанием: Руководящие технические материалы: РТМ 1378. – М.: Научно-исследовательский институт технологии и организации производства НИАТ, 1975. – 105 с.

20. Технологические процессыковки, штамповки: Курсовое проектирование / П. П. Омельченко и др. – К., Донецк: Вища школа, 1986. – 151 с.

#### REFERENCE

1. Golovin V.A., Mit'kin A.I., Reznikov A.G. Technology of the cold extrusion. – М.: Engineer, 1970. – 210 p. [in Russian].

2. Forging and stamping: Reference book. In 4 v./ Red. comp.: E.I. Semenov (chief) and other. – М.: Engineer, 1987. – V. 3. Cold volume stamping / Under red. G.A. Navrotsky. – 1987. – 384 p. [in Russian].

3. Forging and stamping of the coloured metals: Reference book / N.I. Korneev, V.M. Arzhakov, B.G. Barmashenko and other. – М.: Engineer, 1971. – 232 p. [in Russian].

4. Ovchinnikov A.G. Bases of cold extrusion stamping theory on presses: Train aid for the institutes of higher. – М.: Engineer, 1983. – 200 p. [in Russian].

5. Cold volume stamping: Reference book / Under red. G.A. Navrotsky. – М.: Engineer, 1973. – 496 p. [in Russian].

6. Mit'kin A.N. Determination of efforts at the cold extrusion. – М.: НИТАвтомпром, 1957. – 95 p. [in Russian].

7. Romanovskiy V.P. Reference book on the cold stamping. – М.-Л.: Engineer, 1965. – 788 p. [in Russian].

8. Zholobov V.V., Zverev G.I. Pressing of metals. – М.: Metallurgy, 1971. – 456 p. [in Russian].

9. Technology of forging and by volume stamping. Part 1: Volume stamping by extrusion: train aid for the institutes of higher / A.M. Dmitriev, A.L. Vorontsov. – М.: Higher school, 2002. – 400 p. [in Russian].

10. Materialovedenie and technology of metals / G.P. Fetisov, M.G. Karpman, V.M. Matyunin and other – М.: Higher school, 2001. – 638 p. [in Russian].

11. Engineer. Encyclopaedia / Red. comp.: K.V. Frolov (chief) and other – М.: Engineer. Technologies of purveying productions. V. III-2 / I.L. Akaro, R.A. Andrievskiy, A.F. Arzhanov and oth.; Under red. V.F. Manuylova, 1996. – 736 p. [in Russian].

12. Gubkin S.I. Flowage of metals. V. I-III. – М.: Metallurgizdat, 1960-1961 [in Russian].

13. Storozhev M.V., Popov E.A. Theory of treatment of metals pressure. Textbook for the institutes of higher. – М.: Engineer, 1977. – 423 p. [in Russian].

14. Deordiev N.T. Treatment of details by reduction. – М.-К.: Mashgiz, 1960. – 155 p. [in Russian].

15. Favorskiy V.E. Cold stamping by extrusion / V. E. Favorskiy. – М., Л.: Engineer, 1966. – 200 p. [in Russian].

16. Ovchinnikov L.D., Shubin I.I., Pakhomov E.V. Stamping with sprouts in the closed stamps / In book: Technology of making of purveyances is in an engineer. – М.: Engineer, 1971. – P. 98–107 [in Russian].

17. Forging and stamping: Reference book. In 4 v. / Red. comp.: E.I. Semenov (chief) and other. – М.: Engineer, 1986. – Т. 2. Thermoforming / Under red. E.I. Semenov. – 1986. – 592 p. [in Russian].

18. Olenin L.D. Calculation of technological transitions and constructing of instrument for the cold combined extrusion // Blacksmith-stamping production. – 1972. – № 1. – P. 9–18 [in Russian].

19. Stamping of details by cold extrusion: Leading technical materials: RTM 1378. – М.: Research institute of technology and organization of production of NIAT, 1975. – 105 p. [in Russian].

20. Technological processes of forging, stamping: Course planning / P. P. Omel'chenko and other. – К., Donetsk: Vishcha school, 1986. – 151 p. [in Russian].

Стаття надійшла 31.03.11 р.  
Рекомендована до друку  
д.т.н., проф. Саленком О.Ф.