

**В.И. КОХАНОВСКИЙ**, канд. техн. наук, НПО „Свет шахтера”,  
г. Харьков, **О.В.КОХАНОВСКАЯ**, НТУ „ХПИ”

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛЕННЫХ КРИТЕРИЕВ АВТОМАТИЧЕСКОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПЛАСТМАССОВОГО ИЗДЕЛИЯ ИЗ ПРЕСС-ФОРМЫ**

Стаття продовжує серію публікацій на тему автоматизації визначення витягання пластмасового виробу з прес-форми. В роботі наведений метод розв'язання задачі при деяких обмеженнях на конструкцію прес-форми.

The article continues the series of publications on the theme of automation of determination of extraction of plastic good from a press mould. In this work the method of task solution is presented at some constraints on the construction of press mould.

**1. Состояние проблемы.** Выталкивание пластмассового изделия из пресс-формы (ПФ) является последней стадией процесса литья под давлением. Далеко не всегда извлечение отлитого изделия происходит без его повреждения или деформации. Больше того, иногда изделие остается в матрице, а не на пуансоне, т.е. изделие не извлекается из ПФ. К основным факторам, которые влияют на простоту выталкивания изделий и, соответственно, стоимость формы, относятся:

- углы уклона или конусность;
- качество обработки формообразующих поверхностей формы;
- требования к внешнему виду изделия;
- наличие поднутрений или отверстий в изделии;
- выталкивание – из неподвижной или подвижной полуформы;
- характер расположения изделия – в матрице или на пуансоне;
- расположение плоскости (плоскостей) разъема формы.

Более полный перечень параметров, которые влияют в целом на процесс литья изделия, приведен в работе [1]. В данной статье мы рассмотрим влияние решающего параметра на извлекаемость изделия из ПФ – углов уклона на формирующих поверхностях ПФ.

Углы уклона поверхностей назначают для облегчения выталкивания практически любой отливки. Наиболее распространенным вариантом схемы конструкции ПФ является расположение матрицы в неподвижной полуформе, а пуансона – в подвижной. В большинстве случаев при размыкании формы изделие остается на пуансоне, что обусловлено следующими факторами:

1) благодаря усадке материала изделия возникает значительное контактное давление на пуансон, а также силы трения между изделием и поверхностью пуансона;

2) из-за неравномерного охлаждения изделия по толщине возникают усадочные напряжения, которые стремятся „оторвать” изделие от стенок матрицы.

**2. Постановка задачи.** Задача состоит в определении условий, при которых изделие остается на пуансоне, а не в матрице при размыкании ПФ. Поскольку извлекаемость изделия зависит от многих факторов и учесть их довольно проблематично, то к полному решению этой задачи будем приближаться последовательно. Первоначально в модели ПФ абстрагируемся от ряда менее существенных факторов, чем углы уклона формирующих поверхностей, а именно:

- направление шлифования поверхностей пуансона и матрицы (вдоль направления выталкивания или против);
- наличие текстурированных поверхностей (они требуют большего угла наклона);
- небольшие поднутрения на пуансоне или матрице (наличие поднутрений принципиально меняет расчеты извлекаемости изделия).

**3. Метод решения.** Рассмотрим решение задачи на примере изделия в виде усеченного конуса (рис.1). Для определения зависимости изменения угла уклона  $\alpha$  формообразующих поверхностей данного изделия от его извлекаемости из ПФ проанализируем процесс раскрытия ПФ на предельных и промежуточных значениях угла уклона. На рис.2 ( $a, б, в, г$ ) представлены вариации конического изделия со значениями угла уклона от  $0$  до  $90^\circ$ .



Рис.1

Рядом с этими рисунками отображены соответствующие схемы формообразующего пакета ПФ: матрица, пуансон и пластмассовое изделие. Первое предельное значение угла уклона –  $90^\circ$  – превращает конус в круг (рис.2,  $a$ ). Очевидно, что в данном случае изделие не может быть извлечено в схеме с использованием пуансона. Второе предельное значение (рис.2,  $г$ ) соответствует углу уклона  $0^\circ$ , конус превращается в цилиндр. На цилиндрической поверхности пуансона пластмассовое изделие плотно обжимает пуансон. В данном случае изделие всегда извлекается из матрицы. Правда, здесь возникает проблема сталкивания изделия с пуансона. Следовательно, угол уклона расположен в пределах  $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ . Таким образом, мы исключаем два рассмотренных предельных значения угла из множества возможных.

Установлено, что чем угол уклона больше, тем меньше усилия, необходимые для выталкивания изделия. На рис.3 приведены результаты экспериментов по оценке влияния угла уклона на усилие сталкивания отливок из термопластов – ПЭВП и АБС-пластика [2]. В обоих случаях повышение угла уклона на одну и ту же величину приводит к значительному уменьшению усилий, затрачиваемых на выталкивание. Причем для отливок из АБС-пластика усилие всегда выше, чем для ПЭВП, что связано, видимо, с различиями в усадке материалов.

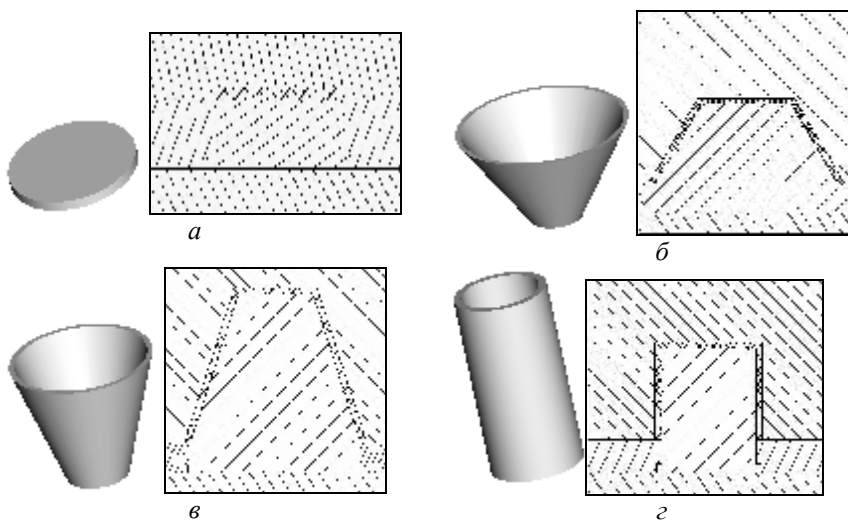


Рис.2

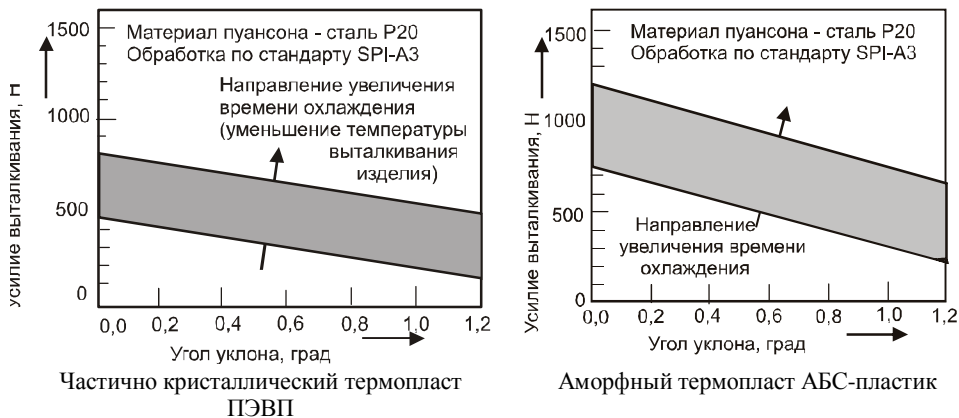


Рис.3

Поскольку в процессе усадки пластмассы изделие „отстает” от стенок матрицы и обжимает пуансон, то извлечение изделия из матрицы зависит от трения пластмассы о металл пуансона. Таким образом, при раскрытии полуформ ПФ изделие изначально удерживается на пуансоне за счет силы трения. Эта сила пропорциональна нормальной составляющей силы тяжести с постоянным коэффициентом  $m$  [3]:

$$F = mN,$$

где  $m$  – коэффициент трения.

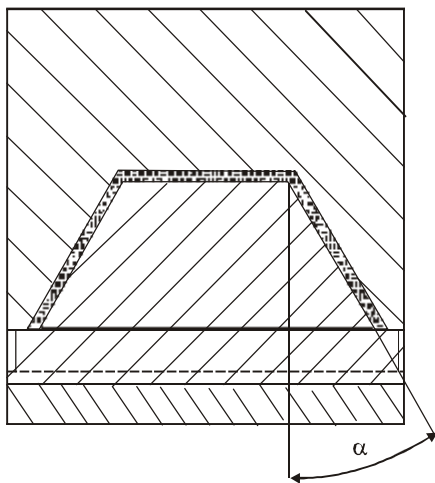


Рис.4.

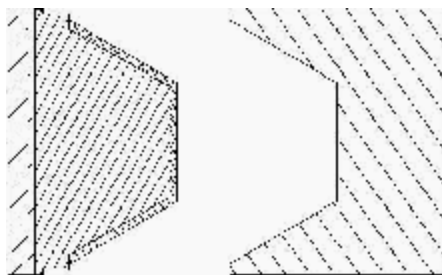


Рис.5

Проанализируем изменение угла  $a$  в ПФ с изделием в форме конуса (рис.4). Предположим, что ПФ разомкнулась и изделие осталось на пуансоне (рис.5). Если постепенно увеличивать угол  $a$ , то изделие под тяжестью собственного веса соскользнет с пуансона. Составляющая веса вниз вдоль поверхности пуансона  $W \sin a$  равна силе трения  $F$ , где  $W$  – вес изделия. Составляющая веса, нормальная к формирующей поверхности пуансона, – это  $W \cos a$ . Она и есть нормальная сила  $N$ . Формула превращается в  $W \sin a = mW \cos a$ , откуда

$$m = \sin a / \cos a = \operatorname{tg} a .$$

Согласно этому закону при определенном значении угла  $a$  изделие начинает скользить по пуансону. Таким образом, от веса коэффициент трения не зависит. Тогда угол  $a$  вычисляется по формуле:

$$\hat{a} = \operatorname{arctg} m , \quad (1)$$

где  $m$  – коэффициент трения пластмассы по стали.

Следовательно, чтобы изделие оставалось на пуансоне после раскрытия ПФ, угол уклона формирующей поверхности пуансона должен удовлетворять неравенству:

$$0 < a < \hat{a} ,$$

где  $\hat{a}$  вычисляется по формуле (1) для конкретного значения  $m$ , которое в свою очередь зависит от марки стали пуансона и применяемой пластмассы. Мы получили оценку интервала возможных значений угла уклона формирующих поверхностей пуансона, которые обеспечивают извлекаемость изделия из матрицы в ПФ с существенными ограничениями.

**4. Второй метод решения задачи.** Теперь усложним нашу задачу и попы-

таемся учесть не только силу трения в паре „изделие – пуансон”, но и также давление, создаваемое изделием на пуансон в результате усадки пластмассы. Силы трения могут быть вычислены, если известны следующие параметры [4]:

- геометрия, форма и размеры изделия;
- усадка термопласта;
- модуль упругости термопласта при температуре выталкивания изделия;
- сила трения в паре „пуансон – термопласт”.

Применительно к нашей детали – конусу – сила трения может быть определена по уравнению [2]:

$$F = mPA, \quad (2)$$

где  $m$  – коэффициент статического трения в паре „изделие – пуансон”,  $P$  – контактное давление в этой паре „изделие – пуансон”,  $A$  – площадь поверхности контакта пары.

Контактное давление в паре „изделие – пуансон” будет зависеть от величины затруднительной усадки при температуре сталкивания изделия и модуля упругости термопласта при растяжении. Оно будет наибольшим для изделий из частично кристаллических термопластов, отличающихся большими коэффициентами усадки и величинами модуля упругости. Любая переменная, которая будет уменьшать коэффициент усадки материала или модуль упругости при растяжении, уменьшает контактное давление в паре „изделие – пуансон”, и, следовательно, усилие сталкивания, что эквивалентно силе трения на контактных поверхностях пуансона и изделия. Например, сокращение времени цикла литья под давлением, т.е. уменьшение времени пребывания ПФ в сомкнутом состоянии, будет приводить к уменьшению усилий сталкивания, т.к. к его началу при соответствующей температуре изделия величины усадки и показатель жесткости (т.е. модуля упругости) будет относительно меньшими. Таким образом, технологические параметры, которые устанавливаются на термопластавтомате, также влияют на вычисленные усилия трения в паре „изделие – пуансон”.

В процессе остывания термопласта возникает растягивающее напряжение  $s$  в изделии, которое может быть определено, если известны модуль упругости при растяжении  $E$  и линейная усадка материала изделия. В общем случае напряжение вычисляется по формуле [2]:

$$s = Ee,$$

где  $e$  – усадка пластмассы.

В случае тонкостенного изделия конической формы (наш пример) с дном толщиной  $h$ , формула растягивающего напряжения примет вид:

$$s = pP \cos a [L(R + r) + r^2] / h, \quad (3)$$

где  $r, R$  – соответствующие радиусы конуса;  $P$  – контактное давление в паре „изделие – пуансон”;  $L$  – длина пуансона.

На основании формул (2), (3) сила трения определяется из уравнения:

$$F = m \iint_A P ds = m \iint_A P(u, v) \sqrt{a(u, v)} du dv,$$

где  $A$  – поверхность контакта пары „изделие – пуансон”;  $u, v$  – криволинейные координаты на поверхности  $A$ .

В декартовой системе координат это уравнение примет вид:

$$F = m \iint_{S_A} P(x, y) dx dy, \quad (4)$$

где  $S_A$  – проекция поверхности  $A$  на плоскость  $XY$ ;  $P(x, y)$  – кусочно-непрерывная функция контактного давления.

Применительно к изделию в форме конуса формула (4) преобразуется следующим образом:

$$F = m E e p h [L(R + r) + r^2]. \quad (5)$$

Мы считаем, что высота  $L$  конического изделия постоянна. Тогда большой радиус конуса вычисляется по формуле  $R = r + L / \operatorname{tg} a$ . В результате уравнение (5) примет вид:

$$F = m E e p h (Lr + L^2 / \operatorname{tg} a + r^2). \quad (6)$$

Из уравнения видно, что с увеличением угла уклона  $a$  сила трения  $F$  будет уменьшаться, что подтверждается экспериментальными данными (рис.6), которые приведены в работе Ментеса и Морена [4].

Значение  $m$  для большинства термопластов зависит как от температуры, при которой начинается размыкание ПФ, так и от уровня нормального напряжения. Сложность заключается еще

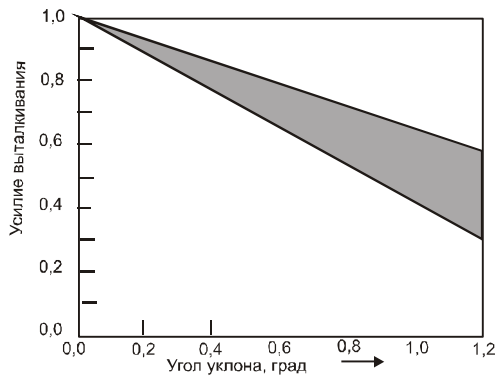


Рис.6

и в том, что термопласт начинает наплаиваться на поверхность пуансона. Значение статических коэффициентов трения для реальных условий литья под давлением хотя и более предпочтительны, однако их не всегда легко получить. С учетом вышесказанного предсказываемые значения усилий выталкивания являются весьма грубыми, неадекватно отражающими состояние и поведение материала изделия на этой стадии процесса.

Вычислим угол уклона  $a$  формующих поверхностей пуансона (в нашем примере – конуса) с учетом полученной в формуле (6) силы трения от напряжений, возникающих в процессе усадки термопласта на пуансоне.

Сила трения должна быть больше силы тяжести изделия –  $F > W \sin a$ . Чтобы вычислить угол  $a$ , предположим, что  $F = W \cdot \sin a$ , или

$$mEeph(Lr + L^2 \operatorname{tg}^2 a + r^2) = W \cdot \sin a.$$

Введем замену  $q = \sin a$ . Тогда уравнение примет вид:

$$mEeph(Lr + L^2 \frac{q^2}{1 - q^2} + r^2) = wq,$$

или в каноническом виде

$$Aq^3 + Bq^2 + Cq + D = 0, \quad (7)$$

где  $A = w$ ,  $B = mEephL(L - r)$ ,  $C = -w$ ,  $D = mEeph r(L + r)$ .

Предположим, что  $\hat{q}$  – одно из решений кубического уравнения (7), которое находится в искомой области значений. Тогда

$$a = \arcsin \hat{q}. \quad (8)$$

**5. Выводы.** Таким образом, формула (1) позволяет получить предельное значение угла уклона формующих поверхностей пуансона, при котором изделие будет извлекаться из матрицы. Полученная формула (8) обеспечивает более точное вычисление предельного значения угла, т.к. здесь учитывается как статическое трение в паре „изделие – пуансон”, так и контактное давление в этой паре.

Представленные формулы позволяют получить довольно грубую оценку истинного значения предельного угла уклона, т.к. в расчетах не учитывалось все многообразие факторов, которые влияют на извлекаемость изделия из матрицы.

В то же время данный результат является практическим инструментом для конструктора при моделировании форм для литья под давлением термопластов, который позволяет еще на этапе конструирования избежать изготовления нерабочей ПФ.

**Список литературы:** 1. Кохановский В.И., Кохановская О.В. Анализ процесса автоматического извлечения пластмассового изделия из пресс-формы // Вестник НТУ „ХПИ”. Тематический выпуск „Машиноведение и САПР”. – Харьков: НТУ “ХПИ”. – 2005. - № 60. – С.91-97. 2. Мэллой Р.А. Конструирование пластмассовых изделий для литья под давлением. – С-Пб: Профессия, 2006. – 512 с. 3. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. – М: Мир, 1977, - 440 с. 4. Menges G., Mohren P. How to make injection mold. – New York: Hanser, 1986. - 230 p.

Поступила в редколлегию 28.09. 2006