

Время от времени перед каждым литьевым производством возникают «задачи вызова» – обеспечить более конкурентную себестоимость перспективных изделий и (или) увеличить производство изделий согласно плану развития. Для их решения первое, что приходит на ум, – закупить самые современные термопластавтоматы (ТПА) и многогнездные горячеканальные литьевые формы, обеспечить их работу в автоматическом режиме или вообще полностью роботизировать технологический процесс. Однако, прежде чем израсходовать немалые средства, необходимо ответить на «базовые» вопросы как по литьевым формам, так и по ТПА:

- какой должна быть гнездность литьевых форм и почему;
- должны ли литьевые формы быть с горячеканальной системой (ГКС) и из каких соображений;
- какое требуется усилие смыкания ТПА и зачем;
- чему должен быть равен объем впрыска у ТПА и как его вычислить.

Поиску ответов на эти вопросы посвящена данная статья.

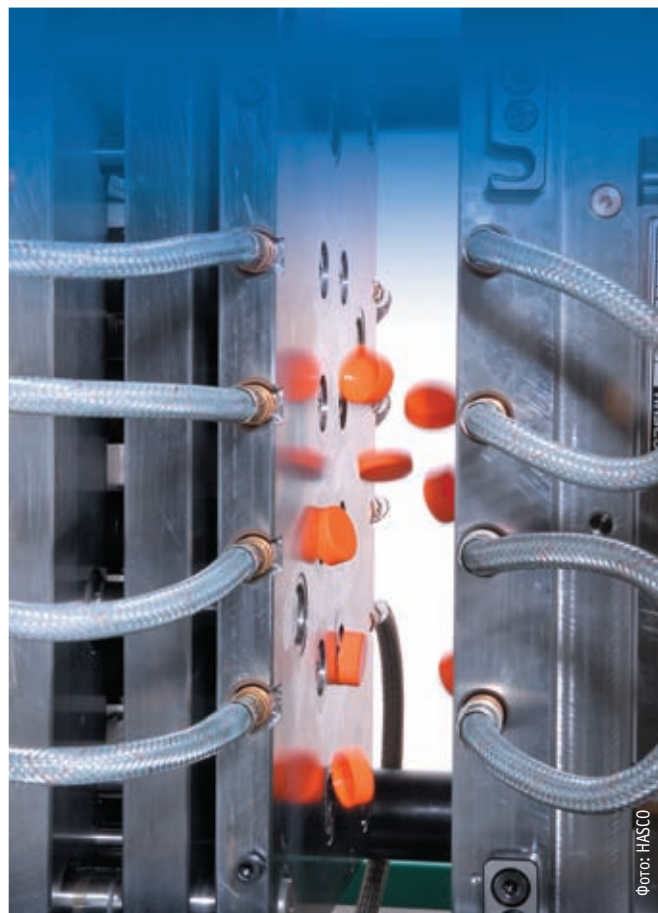


фото: HASCO

# Оптимизация гнездности литьевых форм и типоразмера ТПА

**В. Г. Дувидзон**, руководитель направления по обработке полимерных материалов ООО «ИФ АБ Универсал» (Москва)

## Введение

Известны и стали довольно модными сегодня в профессиональной среде такие понятия, как «реальная действительность» и «виртуальная реальность». «Реальная действительность» устанавливает границу между финансовыми возможностями предприятия и «полетом фантазии» инженерно-технических работников (ИТР) при разработке планов модернизации литьевого производства. «Виртуальная реальность» дает возможность проводить поиск оптимальных технических решений без затрат на ТПА и литьевые формы. Применение передовых информационных технологий и согласованное информационное взаимодействие всех участников технологической подготовки производства (ТПП) в рамках «цифрового производства» позволит сократить время и снизить затраты на ТПП при условии ориентации на последовательное применение принципов и технологий построения промышленных киберфизических систем [1]. Но так как эра «цифрового литьевого производства» для большинства отечественных предприятий еще не наступила, то искать ответы на поставленные в преамбуле к данной статье вопросы будем исходя из общеизвестных представлений о

технологическом процессе литьевого производства изделий из термопластичных полимерных материалов (ТПМ), который объединяет в единую систему следующие подсистемы: «Изделие» → «ТПМ» → «Литьевая форма» → «ТПА». И конструктор литьевой формы в этом же порядке переходит от одной подсистемы к другой, выбирая гнездность литьевой формы и типоразмер ТПА. Главной целевой функцией и основным критерием эффективности литьевого производства является себестоимость  $C_{из}$  изготовления изделий, определяющая его рентабельность и, соответственно, конкурентоспособность.

В большинстве случаев при постановке новой продукции на производство задача оптимизации выглядит следующим образом: «обеспечить плановую себестоимость изготовления перспективных изделий при заданных программе их выпуска и показателях качества». Для решения этой задачи необходимо разработать и внедрить мероприятия по уменьшению расхода ТПМ, времени цикла литья и затрат на литьевую форму в пересчете на изделие. При этом важнейшим параметром, глобально влияющим на  $C_{из}$ , как будет показано ниже, является гнездность литьевых форм.

**1. Гнездность литьевой формы, себестоимость изделий и программа производства**

Под гнездностью *n* литьевой формы, как известно, понимают количество формующих полостей, позволяющих одновременно производить *n* изделий за один цикл литья. Следует помнить, однако, что выбор гнездности – это всегда компромисс между планами выпуска изделий в литьевом производстве и его ресурсами (финансы, время на ТПП и состав машинного парка), а также техническими возможностями инструментального производства, где будет изготавливаться и (или) обслуживаться литьевая форма при эксплуатации.

Вопрос определения и оптимизации гнездности литьевой формы очень важен, хотя и немного запутан. С одной стороны, чем больше гнездность, тем ниже стоимость литья и выше производительность литьевой формы. Значит, ура, увеличиваем гнездность! С другой стороны, чем больше гнездность, тем больше стоимость изготовления литьевой формы, стоимость ее обслуживания при эксплуатации, выше расход ТПМ на гнездо (с учетом брака и общих потерь). С увеличением гнездности литьевой формы возрастает и типоразмер ТПА, а чем он больше, тем больше его цена и стоимость времени его работы. Да, есть над чем задуматься, чтобы найти такую гнездность *n* литьевой формы, которая обеспечила бы плановую себестоимость  $C_{пл}$  при заданных программе *N* их выпуска и показателях качества.

Попробуем отыскать взаимосвязь между *n*,  $C_{и}$  и *N* из известного выражения для расчета себестоимости  $C_{и}$  (руб./шт.) литьевого изделия [2, с. 57, 79; 3]:

$$C_{и} = C_{м} + C_{л} + C_{а}, \quad (1)$$

где  $C_{м}$  – стоимость материала, расходуемого на изделие, руб./шт.;  $C_{л}$  – стоимость литья, приходящаяся на изделие, руб./шт.;  $C_{а}$  – амортизационные отчисления при эксплуатации литьевой формы, приходящиеся на изделие, руб./шт.

**Стоимость материала  $C_{м}$** , приходящегося на одно изделие, рассчитывается по следующей формуле (с различной степенью детализации):

$$C_{м} = m \cdot g = [(m_1 \cdot n + m_л) \cdot (k_1 + k_2)] \cdot g / n, \quad (2)$$

где *m* – масса ТПМ, приходящегося на изделие, кг; *g* – стоимость ТПМ, руб./кг;  $m_1$  – масса изделия, кг;  $m_л$  – масса литников (если литьевая форма с ГКС, то литники отсутствуют и, соответственно,  $m_л = 0$ ).

В действующем литьевом производстве существуют технологические потери материала, которые в выражении (2) учитываются следующими коэффициентами:

- $k_1$  – уровень брака при литье;
- $k_2$  – уровень потерь материала (отходов) в процессе производства (при отработке и настройке режимов литья) и межоперационных потерь (при транспортировке исходного материала, сушке, загрузке, смене цвета и типа материала).

**Стоимость литья  $C_{л}$**  составит

$$C_{л} = C_{ТПА} \cdot t_{ц} / 3600 n, \quad (3)$$

где  $C_{ТПА}$  – стоимость машинного времени работы ТПА, руб./ч; *n* – гнездность литьевой формы, шт.;



**Компетентность с фирмой KOCH**



**ККТ**  
Мобильные приставные сушилки с сенсорной панелью. Снижение расхода электроэнергии на 40%.

Серия **GRAVIKO GK**  
Гравиметрическое дозирование и взвешивание, контроль и анализ в рамках одной рабочей операции.



**ЕКО**  
Высокое качество сушки при снижении расхода электроэнергии на 40%.

Серия **КЕМ**  
Прибор прямого добавления краски серии КЕМ с объемным дозированием.



Производители всего мира доверяют надежным системам с компонентами модульной системы «Koch».

ООО «Koch Техник» Россия  
г. Нижний Новгород,  
ул. Свирская, д. 20  
Тел./факс (831) 225 00 60  
e-mail: info@kt-r.ru

Головной офис в Германии:  
Тел. +49 7231 8009-66  
консультация на русском языке  
wbirkle@koch-technik.de  
skype: w.birkle\_koch-technik



www.koch-technik.com/ru

$t_{\text{ц}}$  – время цикла, с. Для упрощения анализа примем, что  $C_{\text{ТПА}}$  учитывает расходы на зарплату персонала, а также общехозяйственные и общепроизводственные затраты.

В первом приближении время цикла  $t_{\text{ц}}$  можно подсчитать, зная, что оно примерно на 70 % состоит из времени  $t_{\text{охла}}$  охлаждения изделия, которое, как известно, составляет приблизительно следующую величину:

$$t_{\text{охла}} = 0,084 \frac{h^2}{a} \lg \left( 0,785 \frac{T_{\text{л}} - T_{\text{ф}}}{T_{\text{изв}} - T_{\text{ф}}} \right),$$

где  $h$  – толщина стенки изделия, мм;  $a$  – коэффициент температуропроводности материала изделия, мм<sup>2</sup>/с;  $T_{\text{л}}$  – температура литья, °С;  $T_{\text{ф}}$  – температура стенки формы, °С;  $T_{\text{изв}}$  – температура извлекаемого изделия, °С.

Как видно из этой формулы, время охлаждения  $t_{\text{охла}}$  прямо пропорционально квадрату толщины стенки отливки. Если литниковая система холодноканальная, то время охлаждения определяется толщиной (диаметром) разводящих литниковых каналов, которые обычно на 3–6 мм больше, чем толщина стенки изделия. Если литниковая система на 100 % горячеканальная, то время охлаждения определяется максимальной толщиной стенки изделия. Кроме того, для литьевых форм с ГКС процесс литья проводится без отвода сопла ТПА от литьевой формы, что сокращает время цикла в среднем на 2 с.

**Стоимость амортизации литьевой формы  $C_{\text{а}}$**  рассчитывается по формуле:

$C_{\text{а}} = C_{\text{ф}} / (N \cdot A) = [(n \cdot C_1) + C_2 + C_3 + C_4] / (N \cdot A)$ , (4)  
где  $N$  – программа выпуска, шт./мес;  $A$  – срок амортизации литьевой формы, мес;  $C_{\text{ф}}$  – стоимость литьевой формы, руб., которую в развернутом виде можно определить как

$$C_{\text{ф}} = (n \cdot C_1) + C_2 + C_3 + C_4, \quad (5)$$

где  $C_1$  – стоимость изготовления одного гнезда, руб.;  $C_2$  – стоимость покупных деталей, руб.;  $C_3$  – стоимость оригинальных деталей (кроме формообразующих), руб.;  $C_4$  – стоимость слесарных работ, руб.

Упрощенный вариант выражения (1) после подстановки туда формул (2)–(4) выглядит следующим образом:

$$C_{\text{и}} = m_1 \cdot g + (C_{\text{ТПА}} \cdot t_{\text{ц}} / 3600 n) + C_{\text{ф}} / (N \cdot A). \quad (6)$$

Как видно из уравнения (6), увеличение значения  $n$ , находящегося в знаменателе второго слагаемого, должно напрямую способствовать снижению  $C_{\text{и}}$ . Другое дело, что одновременно с этим растет стоимость формы  $C_{\text{ф}}$ , и неизвестно, какой из этих факторов окажется более значимым при различной программе выпуска  $N$  и сроке амортизации  $A$  формы, которые наверняка (но пока непонятно, насколько сильно) повлияют на  $C_{\text{и}}$ . И, конечно, вносят свой вклад другие параметры, входящие в правую часть выражения (6), –  $m_1$ ,  $g$ ,  $C_{\text{ТПА}}$  и  $t_{\text{ц}}$ . И если зная, о каком изделии идет речь и из какого материала предполагается его изготовить, можно более или менее точно оценить значения  $m_1$ ,  $g$ , и  $t_{\text{ц}}$ , то вот стоимость  $C_{\text{ТПА}}$  машинного времени работы ТПА не представляется возможным определить, не выбрав типоразмер ТПА.

Но, тем не менее, этого выражения должно быть вполне достаточно для нахождения методом перебора искомого значения  $n$  в том случае, если речь идет о малом предприятии, планирующем решить задачу, что называ-

ется, «малой кровью» со своим машинным парком, насчитывающим несколько или даже один ТПА. Тогда нужно предварительно найти несколько значений гнездности  $n$  для соответствующего количества имеющихся ТПА, используя известное выражение для максимального усилия смыкания  $F_{\text{см}}$ , предотвращающего раскрытия формы:

$$F_{\text{см}} = 1,25 S_{\text{отл}} \cdot p = 1,25 \cdot (S_1 \cdot n + S_{\text{л}}) \cdot p \quad (7)$$

где 1,25 – коэффициент запаса, учитывающий некоторые отклонения параметров при работе ТПА (даже у нового оборудования) и его износ при эксплуатации;  $S_{\text{отл}}$  – площадь проекции всей отливки на плоскость разъема, см<sup>2</sup>;  $p$  – давление расплава в формующей полости (кгс/см<sup>2</sup>) на стадии впрыска или выдержки под давлением (выбирают то значение  $p$ , которое больше);  $S_1$  – площадь проекции одного изделия на плоскость разъема, см<sup>2</sup>;  $S_{\text{л}}$  – площадь проекции литниковой системы на плоскость разъема, см<sup>2</sup>.

Тогда выражение для  $n$  будет выглядеть так:

$$n = [(F_{\text{см}} / 1,25 p) - S_{\text{л}}] / S_1. \quad (8)$$

И тогда, подставляя в (8) значения  $S_1$ ,  $S_{\text{л}}$  и  $p$ , которые можно оценить, опять же зная конструкцию изделия и ТПА, из которого предполагается его изготовить, найдем значение  $n$  из условия нераскрытия формы при литье. Значение  $n$  при этом может быть не целым числом и (или) не устраивать с точки зрения конфигурации литниковой системы. Тогда его округляют до приемлемого с конструкторской точки зрения значения, чтобы сохранялось условие нераскрытия формы на ТПА, выбранном из имеющихся.

Теперь, помимо  $n$ ,  $m_1$ ,  $g$ , и  $t_{\text{ц}}$ , в выражении (6) известны значения стоимости  $C_{\text{ТПА}}$  машинного времени тех нескольких ТПА, имеющихся на предприятии, плановая себестоимость изделий  $C_{\text{и}}$ , программа производства  $N$  и срок амортизации формы  $A$ .

Остается неизвестной только стоимость формы  $C_{\text{ф}}$ . Найдем из уравнения (6) «предельную» стоимость формы  $C_{\text{ф.пр}}$ :

$$C_{\text{ф.пр}} = [C_{\text{и}} - m_1 \cdot g - (C_{\text{ТПА}} \cdot t_{\text{ц}} / 3600 n)] \cdot (N \cdot A), \quad (9)$$

т. е. ту максимальную стоимость литьевой формы, которая обеспечит плановую себестоимость изделия  $C_{\text{и}}$  при заданной программе  $N$  их производства на одном из имеющихся ТПА.

А теперь самое время оценить расчетную стоимость  $C_{\text{ф.р}}$  такой формы из выражения (5), зная конструкцию изделия (а следовательно, и конструкцию формообразующих деталей) и ее гнездность. И если вдруг окажется (счастливый случай!), что для какого-либо имеющегося ТПА выполняется условие

$$C_{\text{ф.р}} \leq C_{\text{ф.пр}},$$

то можно перевести дух и считать «миссию (то бишь поставленную задачу) выполненной».

Но здесь с большой долей вероятности может ждать не только отрицательный результат:  $C_{\text{ф.р}} > C_{\text{ф.пр}}$ , но даже и отрицательная стоимость формы (!), если финансовые службы предприятия сильно занизили плановую себестоимость изделий. И в этом случае нужно вернуться к «реальной действительности», еще раз взглянуть на выражение (6) и подумать, какие остались в распоряжении «рычаги влияния». А их практически не осталось, кроме как закупить для производства из-



деля более дешевый материал. Но будут ли тогда выполнены требования по качеству продукции? Вопрос...

Если вспомнить, что описанный подход к определению гнездности формы базируется на том, «что мы имеем» (ограниченный машинный парк) и «что можем себе позволить», а точнее – «не позволить» (инвестиции в новые современные ТПА и литевые формы с ГКС), то придется смириться с тем, что «миссия невыполнима».

А далее попытаемся решить задачу оптимизации гнездности форм в более развернутом виде – для современного литевого производства, имеющего большой машинный парк и средства для инвестиций в новое оборудование и многогнездные литевые формы, в том числе с ГКС. И учесть при этом упомянутое ранее требование к показателям качества продукции.

В этом случае можно выделить три принципиально разных сценария расчета гнездности литевых форм в зависимости от выбираемого критерия:

- гнездность  $n_1$ , рассчитываемая по заданной в ТЗ на разработку литевой формы программе производства изделий  $A$  (шт./год, шт./мес);
- гнездность  $n_2$ , определяемая по машинным параметрам ТПА (усилие смыкания  $F_{см}$  и объем впрыска  $V_v$ , от которого зависит время пребывания расплава ТПМ в материальном цилиндре ТПА).
- гнездность  $n_3$ , рассчитываемая исходя из плановой себестоимости изготовления изделий (руб./шт.);

А далее попытаемся объединить эти три сценария, переходя от одного к другому в приведенном выше порядке.

## 2. Расчет гнездности по программе производства изделий

Итак, одна из обязательных задач литевой формы – обеспечить выпуск необходимого количества изделий в заданный интервал времени. Например, обеспечить выпуск 360 тыс. шт./год, т. е. программа производства  $N$  могла бы быть равной 30 000 шт./мес. Однако «роскошь» производить изделия равномерно 12 мес в году далеко не всегда реализуема экономически и организационно. Исходя из фонда рабочего времени ТПА и наличия технологического персонала в цехе литья, на изготовление изделий выделяется, например, только 3 мес в год. В этом случае производительность литевой формы должна возрасти как минимум до 120 тыс. шт./мес. Фонд рабочего времени ТПА зависит от графика работы литевого производства, т. е. необходимо установить расчетный «темп литья»:

- количество рабочих дней в месяце (например, 22 рабочих дня);
- количество рабочих смен в сутки (1, 2 или 3 смены работы ТПА);
- количество рабочих часов ТПА в смене (например, 7 ч);
- количество рабочих минут ТПА в часе (например, 60 мин).

Тогда фонд рабочего времени ТПА при работе в одну смену составит 154 ч/мес:

$$7 \text{ ч/сут} \cdot 22 \text{ сут/мес} = 154 \text{ ч/мес},$$

при 2-сменной работе – 308 ч/мес и при 3-сменной работе – 462 ч/мес.

Следовательно, чтобы изготовить 360 тыс. шт. изделий за 3 мес при 1-сменной работе ТПА, производительность литейной формы должна быть  $\geq 13,0$  шт./мин:  $120\,000 \text{ шт./мес} : 154 \text{ ч/мес} = 780 \text{ шт./ч} = 13,0 \text{ шт./мин}$ , при 2-сменной работе –  $\geq 6,5$  шт./мин и при 3-сменной работе –  $\geq 4,4$  шт./мин.

Обозначим гнездность литейной формы, рассчитываемую по программе производства изделий, как  $n_1$ . Тогда для расчета  $n_1$  необходимо задать время  $t_{\text{ц}}$  цикла литья. Рассмотрим, например, три варианта по времени цикла:  $t_{\text{ц}} = 15, 30$  или  $60$  с, т. е. количество циклов в минуту будет составлять 4, 2 или 1 соответственно. В этих случаях расчетную производительность литейной формы  $\geq 13$  шт./мин при односменной работе ТПА обеспечит литейная форма с гнездностью  $n_1 = 4$  при  $t = 15$  с:  $13,0 \text{ шт./мин} : 4 \text{ цикла/мин} = 3,25 \rightarrow 4$  (принимается ближайшее большее целое число).

При  $t_{\text{ц}} = 30$  с (2 цикла/мин) и  $t_{\text{ц}} = 60$  с (1 цикл/мин) гнездность  $n_1$  составит 8 и 16 соответственно.

Если ТПА работает в 2 смены (производительность литейной формы  $\geq 6,5$  шт./мин), то гнездность  $n_1$  составит 2, 4 и 8 для времени цикла литья 15, 30 и 60 с соответственно.

Наконец, при трехсменной работе ТПА (производительность литейной формы  $\geq 4,4$  шт./мин) гнездность  $n_1$  будет равна 2, 4 и 6 для времени цикла литья 15, 30 и 60 с соответственно.

Подводя итоги данного раздела, можно сделать следующие выводы:

1) Гнездность  $n_1$  литейной формы должна обеспечить план выпуска изделий в литейном производстве на конкретном ТПА.

2) Для расчета гнездности  $n_1$  по критерию «программа производства» изделий, необходимо в техническом задании (ТЗ) на литейную форму задать:

- плановую «программу производства  $N$ » изделий (шт./год, шт./мес);
- расчетный «темп литья», т. е. количество рабочих часов в сутки  $K_1$  (ч/сут) и рабочих дней в месяц  $K_2$  (сут/мес);
- расчетное время цикла литья  $t_{\text{ц}}$  (с).

Тогда формула для расчета гнездности формы, необходимой для выполнения, например, месячной программы производства  $N$  (шт./мес) будет выглядеть следующим образом:

$$n_1 = N / [(3600 \cdot K_1 \cdot K_2) / t_{\text{ц}}]. \quad (10)$$

Затем полученное значение  $n_1$  следует округлить так, чтобы была выполнена программа выпуска  $N$  за назначенный интервал времени.

### 3. Расчет гнездности по параметрам ТПА и свойствам ТПМ

Вторая обязательная задача литейной формы – не ухудшить физико-механические показатели перерабатываемого ТПМ в изделии, входящие в понятие «качество», обеспечив при этом плановый выпуск изделий.

Как бы тщательно ни разрабатывалась конструкция литейной формы, в конечном счете она устанавливается на ТПА с определенными машинными характеристиками. Обычно используется ТПА из имеющихся в цехе литья (со своим фондом рабочего времени), на ко-

торый, собственно, и планируется установка литейной формы. Тогда рассчитанную ранее гнездность  $n_1$  литейной формы проверяют, насколько она подходит к имеющемуся ТПА, а если нет, то возникает вопрос – возможна ли ее корректировка до значения  $n_2$ .

Реже требуется выбрать типоразмер ТПА для модернизации литейного производства и произвести закупку ТПА с машинными параметрами под заранее известные параметры литейных форм (в данном случае – под гнездность  $n_1$ ), режим литья или себестоимость продукции. В любом случае основными (и не только для целей статьи) машинными параметрами ТПА являются максимальное усилие смыкания ( $F_{\text{см}}$ ) и максимальный объем впрыска ( $V_{\text{в}}$ ).

#### 3.1. Усилие смыкания ТПА

Максимальное усилие смыкания  $F_{\text{см}}$  (кгс) ТПА находится по приведенной в разд. 1 формуле (7), в которую теперь подставляется гнездность  $n_1$ , рассчитанная по выражению (10) из условия выполнения программы выпуска  $A$ :

$$F_{\text{см}} = 1,25 S_{\text{отл}} \cdot p = 1,25 \cdot (S_1 \cdot n_1 + S_{\lambda}) \cdot p, \quad (11)$$

Значение давления  $p$  зависит от свойств ТПМ (в первую очередь, от вязкости расплава) и конструкции изделия (от толщины стенки изделия и длины пути течения расплава) и обычно в расчетах выбирается в диапазоне  $320\text{--}500$  кгс/см<sup>2</sup> для литья стандартных литейных изделий и  $600\text{--}800$  кгс/см<sup>2</sup> – для тонкостенного литья.

Чем больше гнездность литейной формы, тем больше требуется усилие смыкания ТПА, тем больше типоразмер ТПА и тем выше его стоимость, а, значит, дороже каждая минута его работы. Если же максимальное усилие смыкания ТПА меньше необходимого усилия запирающей формы, то в процессе литья может произойти раскрытие литейной формы по плоскости разъема. Как следствие, на отливке появится облой и потребуются дополнительные затраты для его устранения, т. е. повысится себестоимость литья. Облой также приводит к ухудшению внешнего вида, потере геометрической точности отливки и увеличению расхода материала. При уменьшении же давления литья в целях предотвращения облоя возникает опасность получить изделие с утяжинами, внутренними пустотами или с недоливом.

Рассчитанное усилие смыкания  $F_{\text{см}}$  округляется до ближайшего табличного для выбора типоразмера узла смыкания ТПА. Однако, заглянув в таблицу с техническими характеристиками ТПА, многие административные и финансовые работники предприятия, где имеется литейное производство, с удивлением узнают: оказывается, для каждого узла смыкания ТПА предлагается, как правило, три узла впрыска, а каждый узел впрыска комплектуется шнеками с 2–3 различными диаметрами. Как быть? Попробуем разобраться.

#### 3.2. Объем впрыска ТПА

Итак, каждый узел смыкания ТПА может быть укомплектован одним из вариантов узла впрыска. В табл. 1 для примера приведены некоторые машинные характеристики трех узлов впрыска для узла смы-



кания ТПА ELEKTRON EVO 350 компании Milacron, который, предположим, устраивает с точки зрения максимального усилия смыкания  $F_{см} = 3500$  кН.

Современные правила выбора узла впрыска ТПА основаны на определении максимального объема впрыска  $V_{в.маx}$  ТПА через величину хода  $L_{впр}$  шнека при впрыске [4, с. 90–92]. При этом сузить поле выбора  $V_{в.маx}$  позволяет ранее найденное по выражению (10) значение гнездности  $n_1$  и известная масса  $m$  ТПМ (г), приходящаяся на одно изделие:

$$V_{в} = m \cdot \rho \cdot n_1, \quad (12)$$

где  $V_{в}$  – требуемый объем впрыска, см<sup>3</sup>;  $\rho$  – физическая плотность ТПМ, г/см<sup>3</sup>.

Тогда при выборе  $V_{в.маx}$  из табличных данных на узлы впрыска должно выполняться условие:

$$V_{в.маx} \geq V_{в}.$$

В свою очередь, ход шнека  $L_{впр}$  при впрыске задается в его диаметрах  $D$  и из соображений стабильного и качественного литья должен составлять для изделий различного назначения от  $0,5D$  до  $3,5D$  (табл. 2).

Приведем пример подбора диаметра  $D$  шнека узла впрыска для массы впрыска  $m_{в}$ , равной 110 г, при изготовлении изделий упаковочного назначения из полипропилена (PP). Из справочных данных найдем, что плотность расплава PP при температуре переработки  $\rho_{пер}$  составляет 0,73 г/см<sup>3</sup>. Тогда требуемый объем впрыска составит:

$$V_{в} = m_{в} / \rho_{пер} = 110 / 0,73 \approx 150 \text{ (см}^3\text{)}.$$

Из табл. 2 находим, что для этого объема и хода впрыска, рекомендуемого для изделий упаковочно-

го назначения и равного  $(0,5–1,5)D$ , хорошо подходит шнек диаметром 60 мм.

Далее из технических характеристик типоразмерного ряда ТПА устанавливаем, у какого типоразмера ТПА с усилием смыкания не менее рассчитанного в разд. 3.1 диаметр шнека  $D$  узла впрыска будет не менее подобранного по табл. 2. Из табл. 1 найдем, что этому условию хорошо удовлетворяет узел впрыска 120 со значением  $V_{в.маx} = 679$  см<sup>3</sup>.

В результате выбран типоразмер ТПА – ELEKTRON EVO 350/120 с известными значениями  $F_{см}$ ,  $V_{в.маx}$  и  $D$ .

Но здесь необходимо решить очередную проблему! Дело в том, что расплав любого ТПМ обладает вполне определенным периодом термостабильного состояния, и предельное время  $t_{пр}$  его пребывания в материальном цилиндре узла впрыска ТПА не должно превышать максимально допустимого времени  $t_{маx}$  во избежание начала термодеструкции [5, с. 85, табл. 3.2]. Исходя из этого, можно сформулировать первое правило выбора типоразмера узла впрыска ТПА, обеспечивающего обновление расплава ТПМ в материальном цилиндре.

**Правило 1.** *Расплав ТПМ в материальном цилиндре ТПА должен полностью обновиться раньше, чем начнется его термодеструкция.*

Если обновление расплава происходит за время, которое меньше минимально необходимого  $t_{мин}$ , то в отливках из-за недостаточной гомогенизации расплава наблюдается «непроплав» гранул или «непрокрас» материала. Если время обновления превышает максимально допустимое время  $t_{маx}$  пребывания расплава

в материальном цилиндре, то начинается деструкция полимерного материала. В большинстве случаев период обновления расплава не должен превышать 10 мин при температуре переработки.

Таким образом, для времени  $t_{пр}$  пребывания расплава в материальном цилиндре узла впрыска ТПА должно выполняться условие:

$$t_{\min} \leq t_{пр} \leq t_{\max}. \quad (13)$$

Таблица 1. Некоторые характеристики узлов впрыска ТПА ELEKTRON EVO 350 (максимальное усилие смыкания  $F_{см} = 3500$  кН) (источник табл. 1–3: Milacron)

Характеристика	Узел впрыска 120			Узел впрыска 300			Узел впрыска 450		
	45	50	60	50	60	70	60	70	80
Диаметр шнека $D$ , мм	45	50	60	50	60	70	60	70	80
Максимальный объем впрыска $V_{в.макс}$ , см <sup>3</sup>	382	471	679	550	792	1078	905	1232	1608
Максимальная масса впрыска $m_{в.макс}^*$ , г	363	448	646	523	753	1025	861	1172	1530
Ход шнека $L_{шн}$ , мм	240			280			320		
Объемная скорость впрыска $Q_{впр}$ , см <sup>3</sup> /с	254 (366)	314 (451)	452 (650)	314	453	616	427 (797)	580 (1083)	758 (1415)
Длина шнека, $L/D$	26,7	24,2	20	28	23,3	20	26,7	22,9	20

\* По полистиролу.

Таблица 2. Объем расплава (см<sup>3</sup>) для различных диаметров шнека  $D$  и рекомендуемых диапазонов хода шнека при впрыске  $L_{впр}$ , выраженного в диаметрах шнека, в зависимости от назначения литьевых изделий из ТПМ

$D$ , мм	$L_{впр} \cdot D$ (другие применения)						
	$L_{впр} \cdot D$ (технические изделия)						
	$L_{впр} \cdot D$ (упаковка)						
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
14	1,08	2,16	3,23	4,31	5,39	6,47	7,54
18	2,29	4,58	6,87	9,16	11,45	13,74	16,00
20	3,14	6,28	9,42	12,57	1,71	18,85	21,99
25	6,14	12,27	18,41	24,54	30,68	36,82	42,95
30	10,60	21,21	31,81	42,41	53,01	63,62	74,22
35	16,84	33,67	50,51	67,35	84,18	101,02	117,86
40	25,15	50,27	75,40	100,53	125,66	150,80	175,93
45	35,78	71,57	107,35	143,14	178,92	214,71	250,49
50	49,09	98,17	147,26	196,35	245,44	294,52	343,61
60	84,82	169,65	254,47	339,29	424,12	508,94	593,76
70	134,70	269,39	404,09	538,78	673,48	806,17	942,87
80	201,06	402,12	603,19	804,25	1005,31	1206,37	1407,43
90	286,28	572,56	858,83	1145,11	1431,39	1717,67	2003,94
100	392,70	785,40	1178,10	1570,80	1963,50	2356,19	2748,89

Таблица 3. Рекомендуемые диапазоны времени  $t_{пр}$  пребывания расплава различных ТПМ в материальном цилиндре ТПА

ТПМ	$t_{пр}$ , мин												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
ABS	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
PE	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
PA	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
PBT, PET	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
PC	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
PC+ABS	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
PMMA	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
POM	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
PP	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
PPO	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
PS	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
PVC-H	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
PVC-W	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
SAN	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
TPU	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green

Примечание. Зеленый цвет – рекомендуемые значения, синий – граничные, красный – проблематичные.

шнека, в 1,8–2,0 больше максимального объема впрыска. Тогда, зная время цикла  $t_{ц}$  и значение  $N_{ц}$ , равное

$$N_{ц} = 2 V_{в, \max} / V_{в}, \quad (14)$$

найдем время пребывания расплава в материальном цилиндре:

$$t_{пр} = N_{ц} \cdot t_{ц} = (2 V_{в, \max} / V_{в}) \cdot t_{ц} \quad (15)$$

и проверим, выполняется ли условие (13).

**Следствие правила 1.** При остановке работы ТПА необходимо выключить нагрев материального цилиндра или снизить температуру расплава ниже «критической». Если нагрев не выключался, то при возобновлении работы ТПА надо полностью «выгнать» перегретый расплав из материального цилиндра во избежание начала термодеструкции ТПМ и ухудшения качества отливаемых изделий.

**Правило 2.** Объем впрыска расплава за цикл должен быть таким, чтобы расплав в материальном цилиндре ТПА обновился бы не раньше минимального времени  $t_{\min}$ , достаточного для полной гомогенизации впрыскиваемого расплава (обычно не ранее 2 мин).

Однако может быть так, что гнездность  $n_1$  не обеспечивает выполнение условия (13). В этом случае производится корректировка гнездности с учетом времени цикла. Если же при этом не выполняется план производства, то тут возможны два варианта решения: увеличить количество литевых форм с выбранной гнездностью или увеличить гнездность и, возможно, типоразмер ТПА (далее для удобства анализа обозначим устраивающую нас гнездность  $n_1$  или скорректированную как  $n_2$ ).

Кроме того, важно не забывать, что в литевых формах с ГКС расплав ТПМ подвергается дополнительному тепловому воздействию в каналах ГКС при температуре литья. Поэтому нужно знать объем расплава в этих каналах и точно так же не допускать перегрева в них материала, как и в материальном цилиндре ТПА.

**Правило 3 (с учетом наличия ГКС литевой формы).** ГКС литевой формы увеличивает тепловую нагрузку на расплав. Поэтому сумма объемов расплава в материальном цилиндре ТПА и в ГКС литевой формы должна быть такова, чтобы суммарное время пребывания расплава в ГКС литевой формы и в материальном цилиндре ТПА было меньше, чем предельное, составляющее, как правило, 10 мин».

**Следствие 1 правила 3.** При остановке работы ТПА необходимо ГКС литевой формы отключать от нагрева или перевести терморегулятор, управляющий работой нагревателей, в «дежурный режим».

**Следствие 2 правила 3.** В литевых формах с ГКС разность температуры расплава в ТПА и ГКС должна быть минимальной, в пределах 3–5 °С, чтобы исключить перегрев расплава и его термодеструкцию.

Таким образом, гнездность литевой формы тесно увязана с типоразмером ТПА через усилие смыкания и объем впрыска, а также с объемом расплава в ГКС литевой формы и типом ТПМ через предельное время пребывания расплава в материальном цилиндре. И если ранее найденные значения  $n_1$  и  $n_2$  не отвечают этим требованиям, то либо корректируют гнездность на  $n_3$  (см. разд. 4), либо меняют типоразмер ТПА.



**60 ТОНН** >>> **5000 ТОНН**  
Заказные решения к Вашим услугам.

**Agent Wanted**

**TAIPEI PLAS**  
Legal International Plastics Rubber Industry Show

Stand No.: K0816

**CHUAN LIH FA MACHINERY WORKS CO., LTD.**  
Tel: 886-6-2532111 / 5 Fax: 886-6-2533311

**KWNA-MIAO 3TH FACTORY**  
Tel: 886-6-595-8133 Fax: 886-6-595-8130





Разумеется, при выборе типоразмера ТПА, помимо параметров  $F_{см}$  и  $V_{в.макс}$ , необходимо учитывать и другие, связанные с работой литьевой формы характеристики узлов смыкания и впрыска ТПА, в числе которых:

- ход размыкания;
- максимальное расстояние между крепежными плитами и их размеры;
- расстояние между колоннами;
- максимально допустимый вес формы;
- ход выталкивателя и усилие выталкивания.

#### 4. Проверка гнздности литьевой формы по плановой себестоимости изделий

Многое для целей этого раздела получено в разд. 1. Другое дело, что в данном случае речь идет о производстве, имеющем достаточно «степеней свободы» в плане выбора имеющегося или покупки нового оборудования, а также инвестиций в разработку новой многогнездной формы, в том числе с ГКС. Поэтому и подход в разделах 2 и 3 к оптимизации гнздности литьевой формы был более «фундаментальным», учитывающим также условия сохранения показателей качества планируемого к переработке ТПМ. Но логика и алгоритм рассуждений сохранились. Поэтому, опуская выражения (2)–(4) в их развернутом виде и другие выражения из разд. 1, приведем конечную формулу для «предельной» стоимости литьевой формы, в которой, однако, используется значение гнздности  $n_2$ :

$$C_{ф.пр} = [C_{и} - m_1 \cdot g - (C_{ТПА} \cdot t_{ц} / 3600 n_2)] \cdot (N \cdot A), \quad (16)$$

т. е. максимальную стоимость формы с гнздностью  $n_2$ , которая должна обеспечить плановую себестоимость изделия  $C_{и}$  при заданной программе  $N$  их производства.

В заключение данного раздела можно сделать следующие выводы (они, впрочем, были бы справедливы и в заключение разд. 1).

1. Экономически обоснованная гнздность  $n_3$  литьевой формы определяется плановой себестоимостью изделия ( $C_{и}$ ), программой производства изделий ( $N$ ), сроком окупаемости затрат на изготовление литьевой формы ( $A$ ) и является

фактически компромиссом между стоимостью литья и стоимостью литьевой формы.

2. ГКС литьевой формы повышает стоимость литьевой формы ( $C_{ф}$ ) и, соответственно, величину ее амортизации ( $C_a$ ), но снижает расход материала на изделие, т. е. стоимость материала ( $C_m$ ), и время цикла ( $t_{ц}$ ), т. е. стоимость литья ( $C_l$ ).

3. Для определения гнздности  $n_3$  литьевой формы по себестоимости изготовления изделий из ТПМ ( $C_{и}$ ) необходимо задать в ТЗ на литьевую форму:

- плановую программу производства изделий, шт./год, шт./мес;
- срок амортизации (окупаемости) литьевой формы, мес;
- стоимость машинного времени работы ТПА (руб./мин) и время цикла литья (с);
- стоимость полимерного материала (руб./кг);
- плановую себестоимость изготовления изделия (руб./шт.).

#### Заключение

Чаще всего при модернизации литьевого производства сначала закупается технологическое оборудование, а затем к нему «привязываются» литьевые формы. Правильнее с точки зрения организации ТПП изменить последовательность действий: сначала создается литьевая форма или хотя бы разрабатывается на нее КД (сборочный чертеж, 3D-модель), а затем под нее тщательно подбирается ТПА.

Поэтому предлагается следующий алгоритм оптимизации гнздности:

1) сначала гнздность литьевой формы рассчитывается по программе производства изделий (гнздность  $n_1$ );

2) после этого определяются основные требуемые параметры ТПА – максимальное усилие смыкания и максимальный объем впрыска и корректируется, если нужно, гнздность (гнздность  $n_2$ ). Если выбор ТПА невелик и нет инвестиций в их приобретение, то нужно решать обратную задачу и по параметрам имеющегося ТПА попытаться оптимизировать гнздность;

3) по плановой себестоимости и программе выпуска изделий из ТПМ определяется «предельная»

стоимость литьевой формы, и если она не устраивает, то гнздность может корректироваться до величины  $n_3$ .

Таким образом, успешное решение задач при ТПП литьевого производства связано с учетом взаимного влияния друг на друга технологических характеристик ТПМ, параметров литьевой формы и ТПА. При этом:

- самая дорогая литьевая форма, потенциально обеспечивающая самые высокие показатели качества, автоматизации и производительности, может быть «обесценена» не очень удачно подобранным типоразмером ТПА;
- самый дорогой ТПА (новый, экономичный, быстроходный и точный) не обеспечит выпуск качественной продукции, если его машинные параметры не соответствуют устанавливаемой на нем литьевой форме.

#### Литература

1. Тимофеева О. С., Помпеев К. П., Дувидзон В. Г., Яблочников Е. И. Концепция технологической подготовки литьевого производства с использованием новых информационных и производственных технологий // *Металлообработка*. – 2017. – № 5. – С. 21–28.

2. Казмер Д. О. Разработка и конструирование литьевых форм / Пер. с англ. под ред. В. Г. Дувидзона. – СПб.: ЦОП «Профессия», 2011. – 464 с.

3. Дувидзон В. Г. Принципы модернизации литьевого производства изделий из полимерных материалов // *Полимерные материалы*. – 2016. – № 6. – С. 52–57.

4. Йоханнабер Ф. Литьевые машины: Справочное руководство / Пер. с англ. под ред. Э. Л. Калинчева. – 4-е изд. – СПб.: ЦОП «Профессия», 2010. – 427 с. (стр. 90–92).

5. Литье пластмасс под давлением / Под ред. Т. Оссвальда, Л.-Ш. Тунга, П. Дж. Грэмманна. Пер. с англ. под ред. Э. Л. Калинчева. – СПб.: Профессия, 2006. – 712 с.

#### Optimization of Cavities Number in Moulds and Injection Moulding Machine Size

V. G. Duvidzon

*The important parameter influencing the cost of plastic molded part made by injection moulding is the cavities number in mould. Ways of cavities number optimization and the choice of the injection moulding machine at constant plastic part cost and the program of their production are discussed. ■*