

При литье термопластов под давлением с использованием горячеканальных форм качество получаемых изделий напрямую зависит от температуры полимерного материала в обогреваемых литниковых каналах. Эксперты журнала «Пластикс», рассматривая факторы, оказывающие влияние на температуру расплава в ГКС, рассказывают о методах контроля температуры и поддержания ее стабильности



Фото MasterFlow

# Температура расплава при литье с ГКС

Игорь БАРВИНСКИЙ,  
главный специалист  
ЗАО «СиСофт»,  
Инна БАРВИНСКАЯ

## Факторы влияния

Горячеканальные литниковые системы широко применяются при литье под давлением деталей из термопластичных материалов, что связано с техническими и экономическими преимуществами технологии горячеканального литья [1-7]. Вместе с тем литье с использованием ГКС имеет свои особенности, которые необходимо учитывать при разработке конструкции деталей, получаемых по данной технологии, конструировании литьевых форм, настройке и управлении процессом литья.

Температура полимерного материала в обогреваемых литниковых каналах оказывает большое влияние на качество изделий, получаемых литьем под давлением в горячеканальных формах.

Особенности теплового режима работы и распределения температуры в литниковых каналах, метод контроля и управления температурой должны учитываться при выборе конструкций применяемых горячеканальных элементов и систем управления температурой.

Для термически нестабильных материалов, к которым относится большая часть термопластов, при повышении температуры расплава уменьшается допустимое время пребывания при высокой температуре, что в реальных производственных условиях может являться одним из главных факторов, снижающих стабильность процесса и качество получаемых изделий. Неравномерность

температуры расплава по сечению и длине канала повышает опасность термической деструкции полимерного материала и является одной из типичных проблем, возникающих при эксплуатации горячеканальных прессформ. Эта проблема приобретает особенно большое значение при длительных циклах литья, характерных для толстостенных изделий.

Перегрев расплава из-за высокой температуры и/или времени пребывания может привести к значительному изменению всего комплекса технологических и эксплуатационных свойств полимерного материала. При перегреве может появляться неприятный запах, а на литьевом изделии образуются пригары темного цвета в виде разводов, пятен, штрихов; также могут возникать различные по внешнему виду следы деструкции (серебристость, пузыри, разнотонность, неравномерный блеск) и снижение размерной точности.

Существенные проблемы, связанные с применением горячеканального литья, могут быть обусловлены необходимостью периодической замены цвета полимерного материала [8], что связано с образованием на стенках литниковых каналов, а в некоторых конструкциях горячеканальных сопел и в области перед впускным литником неподвижных слоев полимерного материала другого цвета. Процессы замены материала одного цвета на материал другого цвета также во многом определяются распределением температуры в литниковых каналах.



Фото KanteMir

## Диссипация тепла и контроль температуры

Важным источником тепла в процессах переработки полимерных материалов из расплава является диссипация (рассеивание) тепла в расплаве, которая происходит по двум механизмам: при сдвиговом течении и сжатии.

Скорость выделения тепла  $q$  в расплаве при сдвиговом течении для единицы объема составляет:

$$q = \eta \dot{\gamma}^2,$$

где  $\eta$  — эффективная вязкость (зависит от скорости сдвига, температуры и давления),  $\dot{\gamma}$  — скорость сдвига.

Повышение температуры  $\Delta T$  расплава при адиабатическом (то есть без отвода и подвода тепла) сжатии некоторого объема при повышении давления на величину  $\Delta P$  можно определить следующим образом:

$$\Delta T = \Delta P / (\rho \cdot C_p),$$

где  $\rho$  — средняя (для рассматриваемого диапазона температур и давлений) плотность расплава,  $C_p$  — средняя удельная теплоемкость расплава при постоянном давлении.

Диссипация в расплаве, вызванная сдвиговым течением, дает большой вклад в общий тепловой баланс в процессе литья полимерных материалов, особенно при пластикации и впрыске, что связано с высокой скоростью сдвига, реализуемой на этих стадиях процесса.

Диссипация, вызванная сжатием, различна в разных зонах горячеканальной литниковой системы, причем она меняется во времени, что вызвано изменением давления расплава в цикле литья. Течение расплава в литниковых каналах и полости формы на стадии заполнения происходит за счет увеличивающихся перепадов давления в системе «доза впрыска в предшнековой области материального цилиндра — сопло литьевой машины — литниковая система — полость». При этом влияние диссипации, вызванной сжатием, на температуру расплава вблизи его фронта крайне мало, так как давление на фронте потока близко к атмосферному, но по мере удаления от фронта это влияние повышается из-за роста давления. Хотя процесс диссипации, вызванной сжатием, является обратимым (при расширении расплава тепло поглощается), в условиях литья под давлением эти процессы происходят на разных участках системы.

На температуру полимерного материала в горячеканальной литниковой системе влияет температура расплава, поступающего из материального цилиндра литьевой машины, для которой характерна высокая неравномерность, обусловленная влиянием периодической шнековой пластикации [9-10] и сжатием при повышении давления в дозе расплава в процессе впрыска [11].

В общий тепловой баланс входит также тепло, поступающее от нагревателей, расположенных в горячеканальных соплах и коллекторе. В настоящее время при горячеканальном литье чаще всего применяется электрический нагрев, хотя разработаны также системы с индукционным и жидкостным нагревом [3, 6].

Потери тепла в горячеканальных формах могут происходить во всех процессах теплообмена: теплопроводности, конвекции и теплового излучения [6]. Определенный вклад в охлаждение расплава может дать, как было отмечено выше,



## Инженерные услуги

Промышленный дизайн  
и конструирование изделий из пластмасс

Изготовление прототипов  
и малых партий изделий  
литьем в силиконовые формы

Проектирование  
и изготовление  
литьевых форм

Серийное производство  
изделий из пластмасс



«Росмолд/Роспласт - 2011»

15 - 17 июня

Москва / МВЦ «Крокус Экспо»

Посетите наш стенд №D07

## Специализированное оборудование

- Термопластавтомат Babyplast 6/10 P горизонтального и вертикального исполнения
- Автономный узел впрыска (UAI) для производства многокомпонентных деталей на стандартных ТПА



**D-M-E**  
Every step of the way



- Стандартные компоненты литьевых форм и штампов
- Горячеканальные системы литьевых форм
- Оборудование и расходные материалы для ремонта и полировки литьевых форм и штампов

- Периферийное оборудование для переработки пластмасс
- Мобильные координатно-измерительные машины и лазерные сканеры FARO



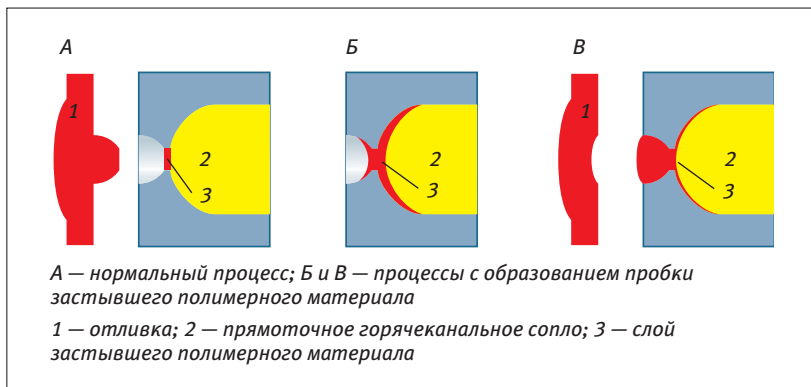
ООО «ВИВТЕХ»

127083, Москва, ул. 8 Марта, д. 10, стр. 5, оф. 521

тел./факс +7 (495) 755-91-45

e-mail: info@vivtech.ru

web: www.vivtech.ru



**Рисунок 1. Схема вариантов конструкции области впуска прямоточного горячеканального сопла с внешним нагревом [3]**

его расширение вследствие снижения давления.

Для выхода на стабильный тепловой режим работы горячеканальной пресс-формы после остановок процесса литья (например, при смене пресс-формы или технологических перерывах) требуется определенное время, которое зависит от рабочей температуры, габаритов пресс-формы и других условий процесса.

Нестабильность температуры расплава в горячеканальной литниковой системе от цикла к циклу, связанная с нарушением теплового баланса, вызывается различными причинами. Это могут быть колебания реологических свойств исходного полимерного сырья, нестабильность добавляемого вторичного материала. При этом меняется уровень диссипативного тепловыделения в процессе пластикации и впрыска.

Большое значение для получения качественных деталей в горячеканальных формах имеют методы контроля и управления температурой горячеканальной литниковой системы. В качестве датчиков температуры обычно используют термопары.

Неравномерность температуры расплава в каналах коллектора в целом оказывает не такое сильное влияние на стабильность процесса литья и качество получаемых изделий, как температура в горячеканальном сопле [3], поэтому для управления температурой горячеканального коллектора обычно используется один датчик температуры. В то же время при литье полимерных материалов с низкой термической стабильностью, при литье тонкостенных изделий, при точном литье и в других случаях требуется независимое регулирование температуры для каждого горячеканального сопла.

В конструкциях со встроенными термопарами проблемы контроля температуры могут быть связаны с нарушением изоляции термопары и появлением тока утечки, что

интерпретируется системой управления как изменение температуры [12].

Для литниковых каналов с внешним нагревом после выхода на заданный тепловой режим роль нагревателей в идеале сводится к созданию теплового барьера, препятствующего отводу тепла от расплава полимерного материала к стенкам канала [3]. Однако из-за неравномерности нагрева стенок каналов тепловые процессы оказываются более сложными: на некоторых участках происходит теплоперенос от полимерного материала к деталям формы, а на других — в обратном направлении.

В системах с внутренним нагревом в направлении поперечного сечения литникового канала возникает большой перепад температур, при этом с внешней стороны канала существует слой застывшего полимерного материала. В настоящее время эти системы редко применяются для выпуска технически сложных или отливаемых из термически нестабильных материалов деталей, несмотря на их низкую стоимость и меньшую энергозатратность.

Большие проблемы с нестабильностью процесса нередко возникают при использовании систем с косвенным нагревом, в которых передача тепла от расположенного в коллекторе нагревателя к полимерному материалу в канале осуществляется с помощью длинных сердечников (торпед), изготовленных из материалов с высокой теплопроводностью.

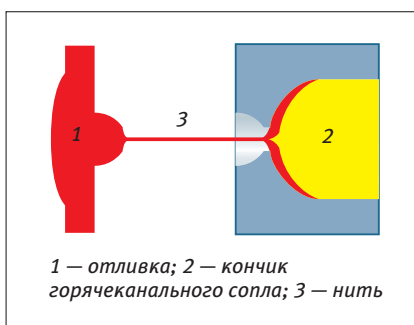
Системы, сочетающие внутренний нагрев с внешней изоляцией канала, позволяют уменьшить перепад температуры расплава в канале и повысить стабильность температуры расплава.

В горячеканальных системах с разветвляющимися литниковыми каналами неравномерность температуры расплава может быть следствием несимметричного (относительно оси канала) распределения температуры расплава после «разветвлений» [13]. Для устранения данной проблемы применяют специальные конструкции «развилки», а также смесители [6].

В системах с электрическим нагревом равномерность подвода тепла по длине канала во многом зависит от намотки спирали нагревателя. Равномерная намотка спирали нагревателя дает большую неравномерность распределения температуры по длине канала с максимальной температурой в его центральной части [3]. Для обеспечения более равномерного распределения температуры применяют неравномерную логарифмическую намотку спирали.

В системах с горячеканальными соплами без запорных клапанов особое значение име-

**Рисунок 2. Схема образования нити при раскрытии литьевой формы [3]**



ет управление температурой полимерного материала во впускном литниковом канале. При остывании материала до температуры потери текучести происходит отключение литьевой полости от материального цилиндра и прекращение подпитки.

**Конструкция сопла**

Основными факторами, влияющими на распределение температуры во впускном литниковом канале, являются особенности поведения полимерного материала при охлаждении и конструктивные особенности применяемого горячеканального сопла, к которым в первую очередь можно отнести расположение нагревателя и датчика температуры, а также диаметр и длину впускного литника.

На рисунке 1 схематично показаны варианты конструкции области впуска горячеканального сопла с внешним нагревом [3]. Рисунок 1А соответствует нормальному процессу, при котором в канале сопла в зоне перехода к впускному литниковому каналу в конце цикла литья образуется тонкий слой застывшего полимерного материала. При каждом впрыске этот застывший полимерный материал выносятся в полость формы потоком расплава.

В вариантах, представленных на рисунках 1Б и 1В, в области впускного литника образуется большая пробка застывшего полимерного материала, которая либо делает впрыск невозможным, перекрывая канал (рис. 1Б), либо выталкивается потоком расплава в формующую полость (рис. 1В), нарушая нормальное растекание расплава и вызывая дефекты внешнего вида и структуры литьевого изделия.

Проблема образования нитей, тянущихся от изделия при раскрытии литьевой формы (рис. 2), обусловлена особенностями теплового и реологического поведения полимерного материала и изменением распределения температуры полимерного материала во впускном литнике при охлаждении отливки. Образование нитей при горячеканальном литье характерно как для кристаллизующихся полимерных материалов (полипропилен, алифатические полиамиды, полиэтилен высокой плотности и полиэтилентерефталат), так и для аморфных (полистирол, поликарбонат, АБС-пластик). В работе [3] эти материалы характеризуются термином slow setting («медленно затвердевающие»). Для устранения нитей обычно рекомендуется увеличить



Фото Mimpex Mould

Среда

**Ротационные соединения**

**DEUBLIN®**

Применение

**Вода**

**Горячее масло**

Преимущества

- ✓ Надежное уплотнение
- ✓ Беспрепятственное прохождение среды
- ✓ Незначительное падение давления
- ✓ Наивысшие точность и качество

- ✓ Изготовлено компанией DEUBLIN
- ✓ Сервис по всему миру
- ✓ Индивидуальный подход
- ✓ Максимально продленный срок эксплуатации

© ihw.biz 4205

**Мы подаем среду в нужном направлении!**

Требуйте наши основные каталоги и/или наши специализированные каталоги для различных видов промышленности!

ООО «DEUBLIN Russia» ■ ул. Дорогобужская, 14, стр. 4, 1-й этаж ■ Москва, 121354, Россия  
 Тел./факс +7 (495) 645 30 12 ■ моб. +7 (926) 239-94-75 ■ info@deublinrussia.ru ■ www.deublin.com

фото Incoe



скорость охлаждения в области впускного литника и/или снизить температуру горячеканального сопла.

Проблемы, связанные с температурой полимерного материала во впускном литнике, в том числе образование нити, можно устранить при использовании горячеканальных сопел с иглообразным наконечником, подающим тепло непосредственно в область впускного литника и входа в полость [3-4, 6]. При использовании таких сопел необходимо обеспечить высокую точность центрирования иглообразного наконечника во впускном литниковом канале. Касание иглой стенок канала обычно приводит к мгновенному застыванию расплава и отключению полости. Промышленно выпускаются различные варианты конструкций иглообразных наконечников, некоторые из них могут оказывать негативное влияние на процесс литья ряда полимерных материалов (в первую очередь с низкой термостабильностью), а также вызывать проблемы при замене цвета. Разработаны системы, позволяющие управлять температурой иглообразного наконечника в цикле литья, что обеспечивает более надежную работу горячеканальной формы [3].

Большое влияние на управление температурой расплава в горячеканальной системе, особенно во впускном литнике, имеет расположение датчика температуры. При этом размещение датчика температуры на удалении от спирали нагревателя сопла повышает тепловую инерционность системы, а увеличение расстояния от датчика до впускного литника затрудняет управление температурой в области впуска. Учитывая это, изготовители сопел обычно размещают датчик температуры вблизи последнего витка нагревателя, в то время как максимум температуры находится, как отмечалось выше, в центральной части канала сопла.

Для надежного управления температурой полимерного материала во впускном литниковом канале часто необходимо предусмотреть

охлаждение области впуска. Хотя были предложены различные конструктивные решения [3], обеспечивающие охлаждение области впуска, на практике обычно применяют просверленные охлаждающие каналы круглого сечения или каналы, изготовленные фрезерованием переходной втулки горячеканального сопла. Необходимо учитывать, что охлаждающий канал эффективно работает, если он находится не слишком далеко от впускного литника.

Охлаждение области впуска является типичным решением для полиэтилена и полипропилена. В то же время для полиамида-6 и полиформальдегида рекомендуется уменьшить отвод тепла от области впуска, например, используя конструкции с изолирующей камерой [3], в которых роль теплового изолятора играет заполняющий камеру полимерный материал.

Некоторые конструкции горячеканальных сопел затрудняют управление температурой в области впускного литника. К таким конструкциям относятся незапирающиеся прямоточные сопла с большим диаметром впускного литника, сопла с несколькими впусками, сопла с боковыми и наклонными впусками, системы с впусками через пуансон, а также миниатюрные сопла.

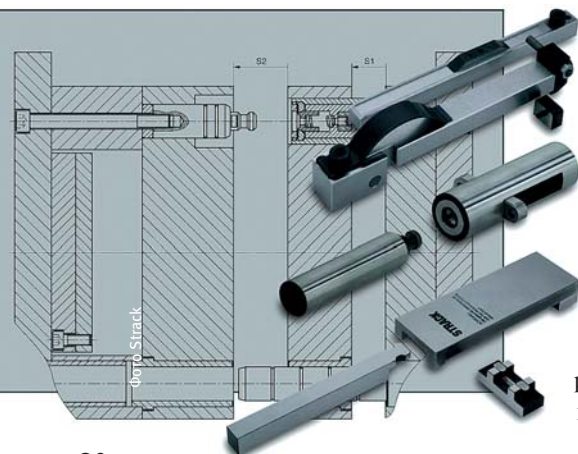
Горячеканальные сопла с запорными клапанами, обеспечивающие отключение литейной полости в заданный момент времени, позволяют снизить чувствительность процесса к температурным градиентам в литниковой системе [5]. Такие сопла могут нормально функционировать и при большом диаметре впускного литника.

### Износ литейных форм

В процессе износа литейной формы повышается неравномерность распределения температуры в обогреваемых каналах, в том числе по длине канала, что может значительно затруднить управление температурой, особенно для материалов с малой термической стабильностью. Рассмотрим подробнее некоторые факторы, влияющие на износ горячеканальной формы.

Коррозия элементов горячеканальной системы может быть вызвана длительным контактом с расплавом полимерного материала и добавками (особенно антипиренами), а также продуктами их деструкции, которые выделяются в процессе переработки [6]. Сильно подвержены коррозии сплавы цветных металлов, широко применяемые для изготовления деталей горячеканальных сопел.

Большое влияние на процесс коррозии оказывает влага, которая при остановках процесса может конденсироваться, например, внутри горячеканальных сопел, на нагревательных элементах и т.д. Периодическое вскипание конденсированной влаги при быстром нагреве в момент запуска процесса приводит к образованию зазоров, повышающих неравномерность нагрева полимерного материала в канале сопла. Медленное повышение температуры нагревателей на начальном этапе («плавный пуск») позволяет подсушить нагреватели, что устраняет негативное влияние



влаги на работоспособность горячеканальной литниковой системы и значительно увеличивает ее долговечность [4].

При литье полимерных материалов с высокими абразивными свойствами возникает проблема абразивного износа горячеканальной литниковой системы, в первую очередь деталей горячеканального сопла [6]. Износ иглообразного наконечника может значительно изменить тепловой режим в области впускного литника. Для уменьшения износа иглообразных наконечников для их изготовления применяют специальные стали и покрытия [6]. Использование конструкций горячеканальных сопел, предусматривающих возможность замены иглообразного наконечника, также может помочь решить проблему износа.

Нарушение теплового режима горячеканальной формы может быть связано с образованием солевого налета на стенках охлаждающих каналов, особенно тех, которые расположены непосредственно вблизи впуска в литьевую полость. Поэтому конструкция литьевой формы должна обеспечивать возможность периодической чистки каналов системы охлаждения механическим путем.

### Моделирование процесса литья

Моделирование процесса литья в горячеканальных формах численными методами с использованием специализированных программных продуктов (так называемого компьютерного анализа) помогает спрогнозировать и предотвратить многие виды дефектов литьевых изделий и проблем литья, выбрать оптимальные конструкторско-технологические решения.

В программных продуктах Autodesk Moldflow Adviser и Autodesk Moldflow Insight моделирование горячеканального литья производится при учете основных факторов, влияющих на поведение полимерного материала в условиях литья под давлением: диссипации тепла при сдвиговом течении и сжатии, реологических, теплофизических и других характеристик применяемой марки полимерного материала. Анализ выполняется с учетом характеристик литьевой машины, а также (в Autodesk Moldflow Insight) особенностей задания технологического режима в системе управления литьевой машины.

Модель горячеканальной системы может включать участки круглого сечения с внешним нагревом, кольцевого сечения с внешним или внутренним нагревом, что позволяет описать условия течения расплава в широко распространенных типах центральных и разводящих литников и сопел в горячеканальных пресс-формах. Предусмотрена возможность моделирования запирающихся впусков, систем с последовательным впуском («каскадное литье»), а также систем с управлением давлением расплава непосредственно в горячеканальном сопле с помощью клапанов специальной конструкции [7].

Хотя при моделировании допускаются определенные упрощения (в частности, предполагается постоянство температуры расплава на выходе из сопла литьевой машины, а также равномерность нагрева горячеканальных литников), компьютерный анализ позволяет существенно снизить риски при проектировании и изготовлении горячеканальных форм. III



фото Heitec Heisskanaltechnik

### Литература

1. Пантелеев А.П., Шевцов Ю.М., Горячев И.А. Справочник по проектированию оснастки для переработки пластмасс. — М.: Машиностроение, 1986. — 400 с.
2. Видгоф Н.Б., Видгоф А.Н. Преимущества литья под давлением изделий из термопластов с применением горячеканальных форм // Пластические массы. — 1989. — №6. — С. 55-58.
3. Frenkler D., Zawistowski H. Hot runners in injection moulds. — Rapra Technology. — 2001. — 354 p.
4. Rees H. Mold engineering. — Munich, Vienna, New York: Hanser Gardner, 2002. — 688 p.
5. Plastics technician's toolbox. V. 1-6 / Ed. by A.R. Calhoun, J. Golmanavich. The Society of Plastics Engineers, 2002-2004. — 787 p.
6. Унгер П. Технология горячеканального литья. Перевод с англ. под ред. В.Г. Дувидзона. — СПб.: Профессия, 2009. — 208 с.
7. Казмер Д.О. Разработка и конструирование литьевых форм. Перевод с англ. под ред. В.Г. Дувидзона. — СПб.: Профессия, 2011. — 464 с.
8. Bouti A. A new hot runner nozzle speeds color change and eliminates flowlines (Part I) // Society of Plastics Engineers. 60th SPE Annual Technical Conference. — 2002. — P. 819-823.
9. Басов Н.И., Казанков Ю.В. Литьевое формование полимеров. — М.: Химия, 1984. — 248 с.
10. Sombatsompop N., Chaiwattanpipat W. Temperature distributions of molten polypropylene during injection molding // Advances in Polymer Technology. — 2000. — V. 19. — №2. — P. 79-86.
11. Johnston S., Kazmer D., Fan Z., Gao R. Causes of melt temperature variations observed in the nozzle during injection molding // Society of Plastics Engineers. 65th SPE Annual Technical Conference. — 2007. — P. 1077-1081.
12. Some historical problems seen by customers and their usual causes // [http://www.pmssystems.com/trouble\\_sh.htm](http://www.pmssystems.com/trouble_sh.htm).
13. Beaumont J.P., Boell K. Controlling balanced molding through new hot runner manifold designs // Society of Plastics Engineers. 59th SPE Annual Technical Conference. — 2001. — P. 932-936.

### Melt temperature within hot runner molding

Igor Barvinsky,  
Inna Barvinskaya

With injection molding thermoplastic materials with hot runner systems the quality of final products directly depends on the melt temperature in hot runners. Along with other factors it affects the in-cavity melt temperature and final product appearance (gate mark), as well as mold performance. Plastics Magazine experts study factors affecting melt temperature within hot-runner system and speak of techniques for temperature control and keeping thermal stability.