

Прямоугольные электрические соединители.

Прогнозирование усадки при литье термопластичных материалов

Точность как важнейшая составляющая качества пластмассовых деталей определяет уровень технических требований к технологии их изготовления, качеству материалов и технологической оснастке, оборудованию и метрологическому обеспечению производства.

**Александр Сафонов,
к. т. н.
Леонид Сафонов**

Введение

Повышение точности деталей из пластмасс предусматривает решение теоретических и практических задач на стадии проектирования и производства. В числе таких задач могут быть разработка целевых научно-технических программ, предусматривающих прогнозирование показателей технического уровня деталей, и проведение прикладных исследований по вопросам повышения качества и технических показателей полимерных композиционных материалов, оборудования для переработки пластмасс, разработки и производства высокоточных прессформ, средств контроля и измерений и т. д.

В настоящее время основная масса изоляторов электрических соединителей изготавливается из полимерных материалов (ПМ) или полимерных композиционных материалов (ПКМ). Повышение качества изолятора, который является одной из базовых деталей электрических соединителей, — это, в конечном счете, повышение надежности и долговечности электрических соединителей в целом.

Точность как важнейшая составляющая качества пластмассовых изоляторов определяет уровень требований к качеству термопластичных материалов, оборудованию для литья деталей, технологической оснастке и метрологическому обеспечению производства.

Вопросы точности деталей из пластмасс постоянно находятся в сфере интересов ученых и практиков, занимающихся переработкой пластмасс, однако нерешенных проблем в этой области остается еще много.

Следует отметить, что создание теории переработки пластмасс начато сравнительно недавно, и естественно, что приоритетными были вопросы обеспечения высокой производительности процессов переработки.

Проблемы повышения качества и точности деталей из пластмасс существенно усложняют и те задачи, которые стоят перед учеными, разрабатывающими теорию переработки пластмасс. В связи

с этим возникает новый ее аспект — теория точности производства деталей из пластмасс. Актуальность этого аспекта трудно переоценить сегодня, когда вопросы точности стоят в числе приоритетных, в связи с миниатюризацией радиоэлектронных компонентов и переводом их на новый уровень качества.

Одной из главных характеристик, влияющих на точность литых деталей, является их усадка. Величина усадки и ее колебания определяют точность размеров деталей и поэтому являются важнейшими технологическими показателями. Усадка носит релаксационный характер, определяется ориентационными и кристаллизационными процессами при формировании и зависит от большого числа конструктивных и технологических факторов.

В связи с этим предлагается более подробно рассмотреть, в чем заключается процесс усадки, какие виды усадки существуют, методику прогнозирования и оценки усадки, а также проанализировать влияние основных конструктивно-технологических факторов. Все это можно сделать на основе имеющихся теоретических знаний и большого практического опыта по переработке пластмасс.

Прогнозирование усадки при литье изоляторов из термопластичных материалов

Проблема точности размеров связана с необходимостью прогнозирования усадочного поведения литых деталей для определенных марок термопластов. Прогнозирование усадки относится к сложным задачам из-за неравномерности усадочных процессов и их зависимости от конструктивных особенностей литевой детали и формы, технологического режима литья, материала детали и других условий.

Литейная усадка является одной из характеристик напряженно-деформированного состояния отливки, возникающего в результате объемной усадки при влиянии процессов ориентации (макромолекул по-

лимера, наполнителя или дисперсной фазы в полимерных смесях), а также условий вязкоупругой релаксации отливки в форме и при ее извлечении из формы.

В традиционных подходах к прогнозированию усадки используются значения усадки, определяемые в соответствии с ГОСТ 18616 «Пластмассы. Методы определения усадки» [2] и другими стандартами. Обычно это приводит к необходимости доработки формы из-за отклонений усадки от стандартных значений ввиду различных условий литья, реализуемых в форме для стандартных образцов и реальных изделий. Для снижения затрат и сокращения сроков изготовления оснастки применяются прототипы литьевых деталей и форм.

Развитие моделирования процесса литья термопластов открывает новые возможности для решения проблем усадки.

При современном компьютерном анализе применяют метод остаточных деформаций и варианты метода остаточных напряжений.

Усадочные процессы при литье термопластов. Объемная усадка

Размерные изменения отливки при литье термопластичных материалов, называемые усадкой, заключаются в изменении объема отливки при ее охлаждении. Обычно объем отливки меньше объема полости прессформы, в которой она оформляется. (Для некоторых термопластов возможно и обратное соотношение объемов. В этом случае усадка считается отрицательной.)

Объемную усадку S_v в процентах можно определить по формуле:

$$S_v = [(V(T,P) - V_f) / V(T,P)] \times 100\%, \quad (1)$$

где $V(T,P)$ — средний удельный объем расплава при температуре T и давлении P расплава в полости формы; V_f — средний удельный объем полимерного материала при комнатной температуре и нормальном атмосферном давлении.

Объемную усадку легко рассчитать на основе PVT-диаграммы, если известны давление и температура расплава в полости формы.

В альтернативном методе объемная усадка определяется как относительное изменение объема отливки $V_{отл}$ после ее охлаждения до комнатной температуры по сравнению с объемом полости формы $V_{форм}$:

$$S_v = [(V_{форм} - V_{отл}) / V_{форм}] \times 100\%. \quad (2)$$

Большое влияние на объемное изменение термопластичных материалов оказывает их способность образовывать кристаллические структуры или оставаться в аморфном состоянии.

Если при охлаждении расплава полимера содержащиеся в нем молекулярные цепочки могут формироваться в кристаллические структуры, усадка объема полимера будет больше, чем в том случае, когда образование кристаллических структур невозможно.

Поэтому частично кристаллические термопластичные материалы, такие как пропилен (ПП), полиэтилен низкой (ПЭ-НП) и высокой (ПЭ-ВП) плотности, полиамид (ПА) и поли-

бутилтерефталат (ПБТ), больше подвержены усадке, чем аморфные пластмассы, такие как сополимер акрила-бутадиона-стирола (АБС), поликарбонат (ПК) и полистирол (ПС).

Большое влияние на объемное изменение кристаллизующихся термопластичных материалов оказывают скорость охлаждения и течение расплава. Снижение скорости охлаждения приводит к увеличению степени кристалличности полимера и, соответственно, к снижению объема твердого полимера и увеличению объемной усадки. Снижение скорости течения расплава также способствует увеличению степени кристаллизации полимера и объемной усадки из-за явления ориентированной кристаллизации.

Внесение неорганических наполнителей в термопластичный материал снижает объемные изменения, так как уменьшает относительное содержание полимерного материала в композиции. Ряд веществ, добавляемых в малых количествах, может оказывать значительное влияние на процесс кристаллизации (выполняя роль дополнительных центров кристаллизации) и, следовательно, на объемные изменения в деталях при их охлаждении. Известно много добавок такого рода, называемых структурообразователями, в их число, например, входят некоторые пигменты.

Объемная усадка для конкретной марки термопластичного материала при литье под давлением может изменяться в широких пределах в зависимости от технологического режима литья.

После заполнения формы, на стадии уплотнения (подпитки), под действием давления выдержки происходит увеличение массы находящегося в литьевой полости полимерного материала, что позволяет частично компенсировать уменьшение объема отливки после охлаждения. Повышение давления выдержки или времени выдержки под давлением также приводит к снижению объемной усадки.

По стандарту ДИН 16901 под технологической усадкой понимают разницу между размером оформляющей полости холодной прессформы ($23 \pm 2^\circ\text{C}$) и размером отлитой детали, если изменение размера в продольном направлении определяется непосредственно после 16-часового хранения детали в нормальных климатических условиях (температура — $23 \pm 2^\circ\text{C}$, относительная влажность воздуха — $50 \pm 5\%$).

Аналогичные условия определения усадки предусматривает и ГОСТ 18616 «Пластмассы. Метод определения усадки».

Усадку (MS) в процентах вычисляют по формуле:

$$MS = [(L_0 - L_1) / L_0] \times 100\%, \quad (3)$$

где L_0 — размер прессформы, мм; L_1 — размер образца, мм.

Дополнительную усадку (PS) в процентах вычисляют по формуле:

$$PS = [(L_1 - L_2) / L_1] \times 100\%, \quad (4)$$

где L_1 — размер образца перед термообработкой, мм; L_2 — размер образца после термообработки, мм.

Анизотропию усадки (a) или дополнительной усадки (a^1) вычисляют по формулам:

$$a = MS_\beta / MS_\rho \quad (5)$$

$$a^1 = PS_\beta / PS_\rho \quad (6)$$

где MS_β , PS_β — величина усадки или дополнительной усадки вдоль направления литья, %; MS_ρ , PS_ρ — величина усадки или дополнительной усадки перпендикулярно направлению литья, %.

У деталей после извлечения их из прессформ следует ожидать дальнейшее изменение размеров, зависящее от времени, — так называемую дополнительную усадку. Для частично кристаллических термопластов дополнительная усадка в основном будет происходить за счет дополнительной кристаллизации. У деталей, изготовленных из аморфных термопластичных материалов, дополнительная усадка будет незначительной.

Усадка, состоящая из технологической и дополнительной усадки, называется общей.

Для ускорения завершения процессов усадки применяются различные дополнительные способы обработки деталей, полученных методом литья под давлением. К таким способам относятся термическая обработка и кондиционирование. Эти способы дополнительной обработки вызывают дальнейшие изменения размеров и формы в литом изделии. Посредством термической обработки процесс дополнительной усадки протекает более быстро и равномерно. В общем случае дополнительная усадка составляет около 10% от технологической усадки.

На практике установлена определенная зависимость между температурными характеристиками и усадкой. Например, с повышением температуры прессформы и увеличением давления выдержки дополнительная усадка уменьшается. Необходимо уточнить, что более высокая температура прессформы при литье частично кристаллических термопластичных материалов ведет к относительно высокой технологической усадке и относительно малой дополнительной усадке.

При более высоких значениях температуры прессформы общая усадка деталей происходит более равномерно, и она меньше, чем при относительно холодной прессформе. В связи с этим при литье высокоточных деталей необходимо применять максимально возможную температуру прессформы.

Принято различать продольную и поперечную усадку. Под продольной усадкой понимается усадка в направлении течения расплава (для материалов, не содержащих волокнистый наполнитель) или в направлении ориентации волокна (для материалов с волокнистым наполнителем), а под поперечной — усадка в направлении, перпендикулярном продольной.

Кроме продольной и поперечной усадки существует такое понятие, как усадка в направлении толщины, ее можно оценить по выражению:

$$S_{толщ} = S_v - (MS_T + MS_\beta). \quad (7)$$

Таблица 1. Значения величины усадки

Марка термопластичного материала	Структура термопластичного материала	Усадка, %
ПК	Аморфный	0,6–0,8
ПК-СВ20	Аморфный	0,5–0,5
ПК-СВ40	Аморфный	0,1–0,3
ПА66	Частично кристаллический	0,6–2
ПА66-СВ30	Частично кристаллический	0,4–0,7
ПА6	Частично кристаллический	0,5–2
ПА6-СВ30	Частично кристаллический	0,3–0,8
ПА6-СВ50	Частично кристаллический	0,1–0,3
АБС	Аморфный	0,4–0,7
ПК/АБС	Аморфный	0,5–0,7
ПК/АБС-СВ30	Аморфный	0,2–0,4
ПЭ-НП	Частично кристаллический	1,5–2
ПЭ-ВП	Частично кристаллический	1,5–2
ПП	Частично кристаллический	1,3–2,4
ПЭТ	Аморфный/частично кристаллический	1,2–2
ПЭТ-СВ30	Аморфный/частично кристаллический	0,2–0,6

Средний уровень продольной усадки для термопластичных материалов различных исполнений и структур таков:

- у аморфных термопластов без наполнителя — 0,2–0,5%;
- у аморфных термопластов с наполнителем — около 0,5%;
- у частично кристаллических термопластов без наполнителя — 1,5–2,5%;
- у частично кристаллических термопластов с наполнителем — менее 1%.

Для конкретных марок термопластичных материалов, широко используемых в производстве электрических соединителей, ориентировочные значения величины усадки представлены в таблице 1.

Помимо среднего значения вычисляют колебания усадки как доверительный интервал отклонений, рассчитываемый по формулам математической статистики. Колебание значения усадки является очень важным показателем стабильности технологического процесса литья.

У отдельных частично кристаллических термопластичных материалов скорость кристаллизации сильно различается. Например, полиэтилен кристаллизуется очень быстро, и поэтому технологически воздействовать в процессе литья на напряженно деформированное состояние отливки, а соответственно, и усадку удается лишь в небольших пределах. В то же время термопластичный материал ПЭТ, который в процессе литья под давлением может перерабатываться как в полностью аморфные, так и в частично кристаллические детали, кристаллизуется очень медленно, что позволяет более эффективно вмешиваться в процесс литья за счет изменения технологических режимов.

Регулируя скорость охлаждения отливки в форме, можно, соответственно, или подавлять или поддерживать процесс кристаллизации термопластичного материала. Быстрое охлаждение ведет к созданию тонкой структуры материала с низкой степенью кристаллизации. Медленное охлаждение, наоборот, приводит

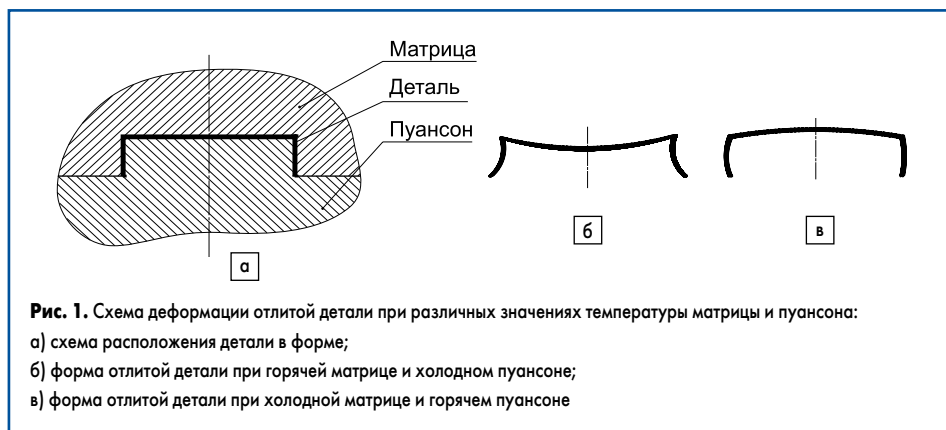


Рис. 1. Схема деформации отлитой детали при различных значениях температуры матрицы и пуансона:
 а) схема расположения детали в форме;
 б) форма отлитой детали при горячей матрице и холодном пуансоне;
 в) форма отлитой детали при холодной матрице и горячем пуансоне

к грубой и хрупкой структуре с более высокой степенью кристаллизации материала.

При литье под давлением следует иметь в виду, что при охлаждении детали в форме охлаждение по всему ее сечению идет неравномерно. Наибольшую скорость охлаждения имеют поверхностные слои детали, непосредственно соприкасающиеся с формообразующими поверхностями формы, далее вглубь сечения скорость охлаждения резко падает вследствие низкой теплопроводности термопластичного материала.

Зависимость степени кристаллизации от скорости охлаждения и состояния ориентированности расплава оказывает влияние на формирование напряженно-деформированного состояния детали. Необходимо отметить, что кристаллизация ориентированного расплава протекает быстрее и иначе, чем кристаллизация неориентированного расплава.

Важным технологическим инструментом для предотвращения деформации литых пластмассовых деталей из-за нестабилизированной усадки является термостатирование прессформ, то есть возможность обеспечивать необходимую температуру ФОД в процессе технологического цикла литья. Большие различия температуры в разных элементах детали из-за ее конструктивных особенностей могут вызывать и большую разницу в усадке. При литье деталей действует следующее правило: отливаемая деталь всегда деформируется в направлении стенок, застывающих в последнюю очередь, а это стенки с более высокой температурой при съеме детали. Проиллюстрируем это правило на примере рис. 1.

На основании сказанного можно сделать следующий вывод: для получения отлитой детали с минимальными внутренними напряжениями, минимальной величиной деформации и равномерной усадкой необходимо обеспечить такие условия термостатирования прессформы, чтобы температура при съеме детали была максимально одинаковой во всем объеме детали.

Оптимальным тепловым режимом прессформы можно считать тогда, когда устройства термостатирования прессформы способны в течение времени охлаждения отводить необходимое количество тепла, возникающего в любом месте оформляющей полости прессформы, при этом обеспечивается равная температура во всем объеме отливаемой детали.

При проектировании литейной формы на конкретную деталь, при расчете ее темпе-

ратурного режима необходимо учитывать, чтобы в зоне большей толщины стенок детали происходил больший отвод тепла, чем в зоне меньшей толщины стенок. Это связано с тем, что стенки с большей толщиной содержат гораздо больше тепла, чем тонкие. Так с помощью различных температур оформляющих элементов формы можно исключить деформацию отливаемой детали.

Установлено, что на усадку литой детали в прессформе можно оказывать влияние только в фазе выдержки под давлением через величину давления и продолжительность выдержки до тех пор, пока возможна подача расплава материала в прессформу. После извлечения детали из формы изменение размеров детали будет происходить за счет так называемой дополнительной усадки. Величина дополнительной усадки будет зависеть от технологических режимов литья и от марки термопластичного материала. На величину дополнительной усадки можно оказывать влияние в виде термического воздействия при различных значениях температуры и длительности.

Из всех технологических параметров наибольшее влияние на усадку оказывает величина давления выдержки. Эту зависимость можно проследить на графике для частично кристаллического термопластичного материала (рис. 2).

Высокое давление выдержки снижает усадку, это связано с тем, что масса расплава сильно уплотняется во время выдержки под давлением (цикл охлаждения).

Длительность выдержки под давлением оказывает значительно меньшее влияние, чем величина давления выдержки (рис. 3).

На графике видно, что выдержка под давлением, длящаяся продолжительное время, также снижает усадку.

Влияние температуры массы расплава на усадку относительно мало (рис. 4). Высокая температура расплава способствует более благоприятному заполнению полости формы и более длительной передаче давления в прессформе, что снижает усадку. Однако если сечение литниковой системы недостаточно, а сечение выпускного литника слишком мало, то давление не может достаточно долго уплотнять отливку, несмотря на высокую температуру массы расплава, и эффект снижения усадки сводится к минимуму. В таком случае возможно даже незначительное повышение усадки.

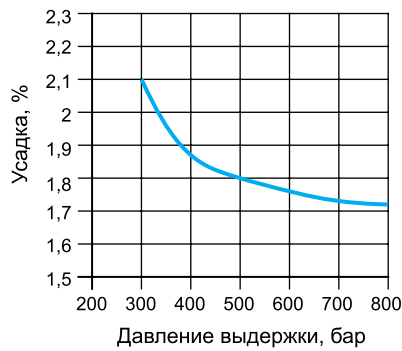


Рис. 2. Влияние величины давления выдержки на усадку частично кристаллического термопластичного материала

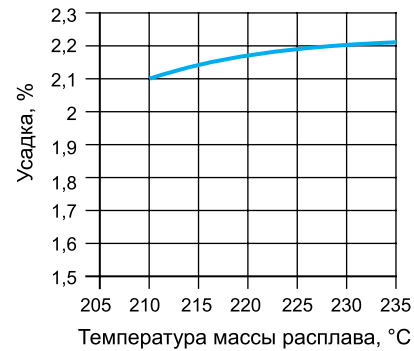


Рис. 4. Влияние температуры массы расплава на усадку у частично кристаллической пластмассы

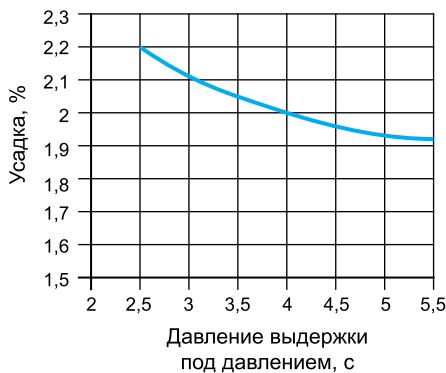


Рис. 3. Влияние длительности выдержки под давлением на усадку частично кристаллического термопластичного материала

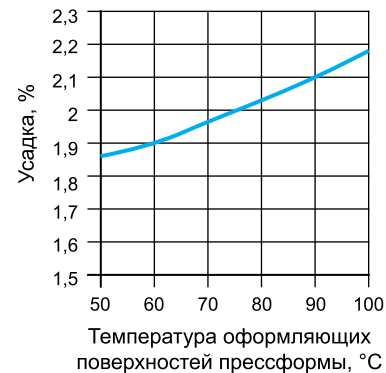


Рис. 5. Влияние температуры оформляющих поверхностей прессформы на усадку у частично кристаллической пластмассы

Высокая температура поверхностей формообразующих деталей (ФОД) прессформы повышает усадку детали, находящейся в прессформе. Этот эффект достигается за счет медленного отверждения расплава. В общем объеме усадки удельный вес усадки за счет температуры ФОД невелик. На рис. 5 приведен график влияния температуры ФОД на усадку.

Установлено, что у деталей с жестким волокнистым наполнителем процессы течения материала в прессформе вызывают ориентирование волокон наполнителя. Вследствие этого процесса возникает разница в продольной и поперечной усадке, которая может достигать 10–20%, и, соответственно, возникает опасность деформации детали, хотя общая усадка меньше, чем у ненаполненных пластмасс.

Величина усадки зависит от содержания влаги в материале, которая вносится в материал с наполнителями на стадии его приготовления. Кроме того, насыщение материала влагой происходит и за счет поглощения воды из атмосферы в силу его гигроскопичности, а также при хранении и транспортировке материала. С уменьшением содержания влаги в термопластичном материале величина усадки уменьшается, кроме того, при высоком содержании влаги наблюдается снижение качества отливки. Особенно заметно это проявляется у таких материалов, как ПА, ПК, АБС, ПБТ, ПК/АБС, и у некоторых других. Снижение качества проявляется в виде дефектов поверхности и термической деструкции материала.

Сушка материала перед переработкой и поддержание его определенной остаточной

Таблица 2. Рекомендуемые режимы сушки для некоторых термопластичных материалов

Марка материала	Температура сушки, °C	Время сушки, ч	Водопоглощение, %	Допустимая остаточная влажность, %
ПК	120	3	0,1–0,2	0,02
ПК/АБС	100	4	0,15–0,3	0,05
АБС	80	3	0,2–0,4	0,2
ПА	80	4	1,3–3	0,1
ПЭ	80	1	0,01	0,01
ПП	80	1	0,02	0,01
ПС	80	1	0,05–0,1	0,05
ПЭТ	120	4	0,3	0,02

влажности является условием получения качественной продукции.

Чтобы осушить гранулят, точка росы горячего воздуха, которым производится сушка материала, должна находиться на очень низком уровне. Для этого воздух сначала пропускается через влагоотделитель, а затем подогревается до температуры сушки, определенной для конкретного материала. Сухой и горячий воздух способен извлекать из пластмассового гранулята молекулы воды, тем самым обеспечивается требуемый уровень влажности.

Необходимо достаточно точно выдерживать температуру и длительность сушки. При слишком коротком времени сушки и недостаточно высокой температуре содержание остаточной влаги будет превышать установленную норму. При слишком длительном вре-

мени и слишком высокой температуре сушки у некоторых пластмасс может произойти термическое повреждение.

Следует учитывать, что время пребывания просушенного материала в загрузочном необогреваемом бункере термопластавтомата не должно превышать одного часа. Это условие нужно выполнять, чтобы предотвратить новое поглощение влаги.

В качестве примера можно привести рекомендуемые режимы сушки для некоторых термопластичных материалов (табл. 2).

Напряжения и деформация детали в прессформе

В процессе нахождения детали в прессформе в ней формируется напряженное состояние, причиной которого являются термические напряжения, вызванные градиентом температуры в процессе охлаждения детали, в сочетании с быстрым повышением жесткости полимерного материала при его отверждении.

Одним из факторов, определяющим температурные градиенты в отливке, является температура расплава, поступающего в литьевую полость прессформы из материального цилиндра термопластавтомата через литниковую систему. Температура расплава зависит от температуры дозы впрыска, а также от теплового баланса в литниковой системе и полости формы.

Для литья термопластичных материалов характерна высокая неравномерность температуры в дозе расплава вследствие перио-

дической шнековой пластификации, а также повышение температуры в дозе расплава при ее впрыске из-за влияния адиабатического сжатия расплава.

Большое влияние на тепловой баланс расплава в литниковой системе и полости формы оказывает диссипация (рассеивание) тепла при сдвиговом течении расплава и в дальнейшем при его сжатии. Диссипация увеличивается при повышении скорости течения расплава и уменьшении сечения литникового канала и полости формы. Разветвления литниковых каналов могут быть причиной повышения неравномерности температуры расплава, поступающего в полость формы.

Другим важным фактором, определяющим градиенты температуры в отливке, является тепловой поток от формообразующих поверхностей прессформы. Он зависит от многих причин: материала формообразующих элементов, конструкции охлаждающей системы, вида охлаждающей жидкости, скорости ее движения и т. п. Необходимо учитывать, что скорость охлаждения отливки уменьшается при образовании воздушного зазора между отливкой и формообразующими поверхностями прессформы в процессе усадки по толщине.

Анизотропия усадочных процессов в отливке, то есть различная усадка в разных направлениях, в основном связана с влиянием ориентационных напряжений, которые могут иметь различную природу. Так, например, поверхностные ориентационные напряжения возникают в застывшем поверхностном слое детали, образовавшемся к моменту окончания стадии заполнения. Хотя эти напряжения и на порядок меньше термических напряжений, они все-таки приводят к анизотропии механических и усадочных свойств и оказывают тем самым большое влияние на процессы усадки.

Формирование поверхностного (пристенного) слоя детали происходит на стадии заполнения при высокой скорости течения и охлаждения расплава, так как поверхностный слой отливается непосредственно контактирует с металлической поверхностью формы, обладающей высокой теплопроводностью. Отверждение более глубоких слоев детали происходит на стадиях выдержки под давлением и охлаждении при невысокой скорости течения расплава (или при ее полном отсутствии) и при сравнительно медленном охлаждении. Тем не менее внутренние слои детали могут иметь высокие ориентационные напряжения, в некоторых случаях даже превышающие напряжения поверхностных слоев, что объясняется совместным влиянием ряда факторов, в том числе снижением скорости релаксации вблизи температуры стеклования. Таким образом, ориентационные напряжения могут быть частью термических напряжений.

На анизотропию напряженного состояния отливки в форме и результирующую усадку влияют явления анизотропии теплопроводности расплава при его течении и ориентационная кристаллизация при сдвиговом или элонгационном течении. (Элонгационное течение термопластичных расплавов — это течение растяжения.)

Вязкоупругая релаксация приводит к снижению напряженного состояния отливки, находящейся в закрытой форме, и, соответственно, к меньшей усадке после извлечения отливки из формы.

Обратимые деформации формы под действием давления, создаваемого расплавом в литевой полости, а также под действием усилий записания термопластавтомата оказывают существенное влияние на напряженное состояние отливки в форме и результирующую усадку.

Линейная усадка может быть продольной (вдоль направления потока) и поперечной (перпендикулярно направлению потока, усадка в направлении толщины детали). Она подразделяется на свободную и затрудненную. Свободная усадка детали осуществляется в том случае, когда оформляющие элементы формы не препятствуют усадке материала. В отдельных случаях усадка некоторых элементов детали в форме вообще невозможна из-за геометрических ограничений. Например, усадка на отверстии происходит только после извлечения знака, оформляющего это отверстие. В общем случае время начала и величина линейной усадки отливки в форме определяется балансом сил, способствующих и препятствующих усадке.

Большое влияние на протекание свободной усадки кроме конструктивных элементов отливки оказывают шероховатость и текстура формирующих поверхностей. Чем грубее обработана оформляющая поверхность, тем выше сцепляемость ее с поверхностью отливки и тем, соответственно, выше сопротивление свободной усадке. В качестве подтверждения этого вывода можно привести следующий пример: линейная усадка после извлечения из формы пластины из полипропилена (ПП) для полости с гладкими формирующими поверхностями была 1,99%, тогда как для полости, у которой одна из формирующих поверхностей была гладкой, а другая имела высокую шероховатость, составила 1,45%.

Необходимо отметить, что разница между свободной и затрудненной усадками существует только при небольшом давлении. При повышении давления выдержки разница между этими усадками уменьшается.

Можно предположить, что понятие свободной усадки относится к условиям, при которых реализуется недостаточное уплотнение отливки, когда в направлении толщины есть возможность для линейной усадки.

При сравнении геометрии отлитой детали с геометрией оформляющей полости формы различают просто усадку, к которой относят деформации, обусловленные линейным уменьшением размеров, и коробление — деформации, которые характеризуют искажение формы отливки. Из-за влияния вязкоупругости, ориентационных, термических напряжений и других факторов значительные размерные изменения детали происходят в течение некоторого времени после извлечения ее из формы. Поэтому замеры детали, сделанные сразу после литья, не будут корректными. Для большинства полимерных материалов в соответствии с ГОСТ 18616 [2] рекомендуется проводить измерение размеров деталей не ранее чем через 16–24 ч

после литья, а для термопластичных эластомеров — не ранее чем через 40–48 ч.

Медленные процессы изменения размеров и напряженного состояния литьевых полимерных деталей могут происходить в течение месяцев и даже лет после их изготовления. Эти изменения могут быть связаны с различными процессами и воздействиями внешних факторов, например, вторичной кристаллизацией кристаллизующихся полимеров, влиянием повышенной температуры или влажности, солнечной радиации и ионизирующих излучений и т. п. Изменение линейных размеров деталей в течение длительного периода времени в условиях хранения или эксплуатации принято называть эксплуатационной усадкой.

В отдельных случаях для сокращения периода дополнительной усадки и снятия остаточных внутренних напряжений, возникающих в деталях после литья и механической обработки, детали выдерживают в течение определенного периода времени при повышенной температуре. (Время выдержки и величину температуры определяют в каждом конкретном случае в зависимости от материала и конструкции детали, а также от планируемых конкретных результатов.)

Необходимо отметить, что напряженное состояние и деформации, в том числе линейная усадка, имеют различные значения в конкретных элементах отливки, и добиться полного снятия напряжений и законченного процесса усадки в детали практически никогда не удается.

Методы прогнозирования усадки. Прогнозирование усадки по опытным образцам

В отечественной практике усадку конкретной детали в основном рассчитывают ориентировочно на основе значений усадки, определяемых на образцах согласно ГОСТ 13616-80 и имеющемуся опыте производства литых деталей. Определяется продольная (в направлении длины образца) и поперечная (в направлении ширины образца) усадки, а также анизотропия усадки — как отношение поперечной усадки к продольной.

В стандартах по усадке указано, что они разработаны для получения сопоставимых данных на стандартных образцах для оценки типичного поведения полимерного материала и не предназначены для прогнозирования значений усадки реальных деталей.

Различие усадки полимерного материала на стандартных образцах и усадки реальных деталей обусловлено разным напряженным состоянием образцов и реальных деталей в форме и после извлечения из нее, что связано с комплексным влиянием конструктивных и технологических факторов.

Существует методика расчета размеров формообразующих деталей прессформ (ФОД) с использованием минимальных, максимальных и средних значений усадки, предусмотренная ГОСТ 15947 [1], а также варианты расчета ФОД, разработанные В. А. Бравинским, А. П. Пантелевым, Н. И. Басовым, В. Г. Бортниковым, Н. Б. Видгофом и др.

Важнейшими конструктивными факторами, влияющими на усадку, являются размеры формообразующей полости (толщина, длина) и конструкция литниковой системы. Увеличение толщины образца при равных прочих условиях в большинстве случаев приводит к росту усадки. При постоянном давлении выдержки с увеличением длины детали растет и неравномерность усадки. Предполагается, что для деталей равного сечения усадка повышается при увеличении расстояния от впускного литника. Это связано с тем, что в том же направлении уменьшается и давление расплава в полости формы. Изменение давления выдержки с уменьшением в конце цикла позволяет снизить неравномерность усадки.

Условия уплотнения в реальных формах могут очень сильно отличаться от условий, реализуемых в формах на образцы: чем сложнее конфигурация детали, тем больше отличие. Например, при использовании тонких впускных литниковых каналов давление в полости формы быстро снижается после застывания впускного литника, что приводит к повышению усадки и увеличивает ее неравномерность. Впуск расплава в тонкую часть детали приводит к значительному увеличению разброса усадки по длине детали, причем влияние уменьшения толщины в области впуска на разброс усадки может быть больше влияния длины детали.

Различия в усадке реальных деталей и образцов вызывают необходимость доработки ФОД после проведения испытаний прессформ. В этом случае литьевая форма выполняет функцию прототипа (опытной формы), размеры которой корректируются по фактической усадке размеров детали.

Использование прототипов форм и деталей

Невозможность точно спрогнозировать усадку для конкретной детали часто приводит к необходимости доработки прессформы после ее испытаний. Это влечет за собой дополнительные затраты, удлинение цикла изготовления прессформы и часто к уменьшению ее ресурса работы. С целью исключения таких издержек прибегают к применению прототипов деталей, воспроизводящих основные элементы конструкции детали, без точной детализации мелких элементов. Такой подход позволяет при сравнительно небольших затратах достаточно точно спрогнозировать будущую усадку на конкретную деталь.

Другим способом определения усадки является использование информации об усадочном поведении данного термопластичного материала при проектировании форм для аналогичных деталей. В этом случае предыдущие проекты играют роль прототипов.

Необходимо отметить, что при выборе прототипа влияние на усадку подвода литника к детали и конструкции литниковой системы может быть критичней, чем влияние конструкции детали. Поэтому в общем случае корректнее говорить о прототипе литьевой формы.

При оценке усадки по прототипам форм следует обращать внимание на материалы

ФОД, текстуру формирующей поверхности, технологические режимы литья и другие факторы, изменение которых может привести к изменению усадки.

Прогнозирование усадки при компьютерном анализе

Развитие моделирования процесса литья термопластичных материалов позволило разработать новые подходы к прогнозированию усадки. Компьютерный анализ литья термопластичных материалов с помощью программных продуктов дает возможность смоделировать все стадии процесса (заполнение формообразующих полостей, уплотнение материала, выдержка под давлением, охлаждение детали в форме) и получить необходимую информацию о поведении полимерного материала в форме на каждой стадии процесса. В числе контролируемых параметров процесса литья могут быть следующие: температура расплава, температура ФОД, давление в полости формы, ориентация наполнителя, изменение этих параметров в процессе технологического цикла и др. Полученная в таком объеме информация позволяет более точно прогнозировать напряженно-деформированное состояние отливки, в том числе и ее усадку.

Прогнозирование усадки при компьютерном анализе выполняется с рядом упрощений и допущений, например, предполагается отсутствие деформации отливки в форме до ее раскрытия, отсутствие обратимых деформаций формы под действием давления в ее полости и усилия смыкания и т. п. Все это вносит определенную погрешность в результаты оценки параметров усадки.

Программные продукты Autodesk Moldflow 2012 позволяют смоделировать процессы заполнения, уплотнения и охлаждения в форме и спрогнозировать распределение объемной усадки, а также ее изменение во времени вплоть до раскрытия формы.

Определение линейной усадки по методу остаточных деформаций

Полуэмпирический метод прогнозирования усадки, получивший впоследствии название метода остаточных деформаций, был разработан и реализован компанией Moldflow в 1990 году. В этом методе продольная S_{II} и поперечная S_{\perp} усадки определяются как сумма пяти компонентов усадки:

$$S_{II} = a_1 F_{PV_T} + a_2 F_c + a_3 F_r + a_4 F_o \Pi + a_5, \quad (8)$$

$$S_{\perp} = a_6 F_{PV_T} + a_7 F_c + a_8 F_r + a_9 F_o \perp + a_{10}, \quad (9)$$

где a_1 – a_5 — коэффициенты продольной усадки; a_6 – a_{10} — коэффициенты поперечной усадки; F_{PV_T} , F_c , F_r , $F_o \Pi$ и $F_o \perp$ — функции, определяющие компоненты усадки: F_{PV_T} — с равновесной объемной усадкой; F_c — со степенью кристалличности; F_r — с релаксацией, при нахождении отливки в форме; $F_o \Pi$ и $F_o \perp$ — с молекулярной ориентацией или ориентацией жесткого волокнистого наполнителя.

Коэффициенты усадки (a_1 – a_{10}) определяют экспериментальным методом по определенной технологии. Усадку в направлении толщины детали (S_{th}) с использованием предположения о монолитности отливки можно оценить по выражению:

$$S_{th} \approx S_v - (S_{II} + S_{\perp}). \quad (10)$$

Средние напряжения по толщине отливки перед раскрытием формы определяют в этом методе на основе рассчитанных значений усадки с использованием предположения о линейной зависимости напряжения и усадки.

Метод остаточных деформаций в большинстве случаев (особенно для деталей небольших размеров) дает хороший прогноз (102%) относительного изменения усадки при изменении толщины и технологических режимов литья, но при большой ошибке прогнозирования абсолютных значений усадки.

Определение линейной усадки по методу остаточных напряжений

Метод остаточных напряжений предусматривает расчет напряжений в отливке, находящейся в форме, перед ее раскрытием, а моделирование деформаций отливки выполняется при ее извлечении из формы.

Остаточные напряжения в отливке перед раскрытием формы в этом методе определяют на основе выбранного уравнения состояния. Необходимо отметить, что термин «остаточные напряжения» в данном случае используется применительно к напряженному состоянию отливки, находящейся в форме, с учетом протекающих в ней процессов релаксации напряжений, а не для напряжений в отливке после извлечения ее из формы.

В качестве уравнения состояния используют уравнение линейной термовязкоупругости или уравнение нелинейной вязкоупругости. Однако поведение многих термопластичных материалов не соответствует модели линейной термоупругости, а применение нелинейной модели уравнений вязкоупругости затруднено из-за высоких требований к быстродействию компьютерных систем, используемых для подобных расчетов.

Для практических целей целесообразно выполнять расчет усадки по упрощенной модели, как это предусматривается в программных продуктах Autodesk Moldflow 2012, с условием, что, во-первых, напряженное состояние детали формируется только с момента затвердевания полимерного материала, а во-вторых, упругое поведение материала предполагается после его затвердевания, а также в процессе выталкивания детали из формы.

При расчете усадки в этом программном продукте предусмотрено два варианта метода остаточных напряжений:

- нескорректированных;
- скорректированных.

Метод нескорректированных остаточных напряжений дает возможность рассчитать термические напряжения, а затем и усадку без

учета анизотропии. Для материалов с жестким волокнистым наполнителем удастся учесть и влияние анизотропии, вызванной ориентацией наполнителя. Недостатком этого метода является большая ошибка определения абсолютных значений усадки.

В методе скорректированных остаточных напряжений влияние анизотропии учитывается как для молекулярной ориентации полимера, так и для ориентации жесткого волокнистого наполнителя.

Для термопластов, не содержащих волокнистый наполнитель, уточнение рассчитанных изотропных напряжений σ_p выполняется следующим образом:

$$\sigma_{c\parallel} = \beta_1 \sigma_p + \beta_2 T + \beta_3, \quad (11)$$

$$\sigma_{c\perp} = \beta_4 \sigma_p + \beta_5 T + \beta_6, \quad (12)$$

где $\sigma_{c\parallel}$ и $\sigma_{c\perp}$ — скорректированные главные напряжения в направлении и перпендикулярно течению расплава соответственно; T — мера молекулярной ориентации полимера; β_1 – β_6 — константы, которые определяются по той же методике, что и для коэффициентов метода остаточных деформаций.

Метод скорректированных остаточных напряжений позволяет получать соответствие расчетных и экспериментальных результатов с меньшей погрешностью, чем другие методы прогнозирования усадки. В то же время при использовании этого метода возникает еще много вопросов.

Заключение

Усадка термопластичных материалов при литье под давлением — это результат сложных процессов, происходящих с отливкой в литьевой полости прессформы и после извлечения ее из прессформы.

Изучение механизмов усадочных процессов и разработка способов их моделирования привели к определенным успехам в прогнозировании усадки. В результате были разработаны компьютерные методы прогнозирования усадки. Преимущества использования компьютерного анализа по сравнению с традиционными подходами — это возможность комплексной оценки факторов, влияющих на усадку, в том числе факторов, связанных с конструкцией литьевой формы и детали, и оценка возможности управления усадкой за счет изменения технологических параметров процесса.

Наилучшую количественную оценку усадки из рассмотренных методов дает метод скорректированных остаточных напряжений. Он также позволяет провести корректную оценку влияния технологических и конструктивных факторов на литейную усадку.

Однако достигнутый уровень эффективности расчетных методов прогнозирования усадки не в полной мере обеспечивает все возрастающие требования к точности литых пластмассовых деталей. Поэтому на современном этапе развития методов прогнозирования усадки полезно сочетать возможности расчета с отдельными измерениями на прототипах форм и деталей, а также использовать имеющуюся информацию об усадочном поведении конкретного термопластичного материала при проектировании форм на аналогичные детали.

Кроме того, для особо точных пластмассовых деталей (для отдельных элементов) необходимо исполнительные размеры ФОД устанавливать с учетом точности прогнозирования усадки, возможности ее колебания в процессе литья, а также точности измерений. Так, для пуансонов и знаков это следует делать на верхнем пределе прогнозируемой усадки, а для матриц — на нижнем пределе. Это позволит в отдельных случаях при минимальной доработке ФОД обеспечить требуемую точность деталей.

Литература

- ГОСТ 15947. Детали формообразующие гладкие для формования изделий из пластмасс.
- ГОСТ 18616. Пластмассы. Методы определения усадки.
- Аскадский А. А., Матвеев Ю. И. Химическое строение и физические свойства полимеров. М.: Химия, 1983.
- Барвинский И., Барвинская И. Компьютерный анализ литья. Подходы и модели // Пластик. 2009 № 3–4.
- Брагинский В. А. Точное литье изделий из пластмасс. Л.: Химия, 1977.
- Калинчев Э. Л., Соковцева М. Б. Свойства и переработка термопластов. Л.: Химия, 1983.
- Калинчев Э. Л., Кацевман М. Л. Особенности структуры литьевых изделий из кристаллизующихся термопластов // Пластические массы. 1976. № 6.
- Казмер Д. О. Разработка и конструирование литьевых форм. Пер. с англ. под ред. В. Г. Дувидзона. СПб.: Профессия, 2011.
- Малкин А. Я., Папков С. П. Ориентационные явления в растворах и расплавах полимеров. М.: Химия, 1980.
- Менлес Г., Микаэли В., Морэн П. Как делать литьевые формы. Пер. с англ. под ред. Э. Л. Калинчева, В. Г. Дувидзона. СПб.: Профессия, 2007.
- Привалко В. П. Молекулярное строение и свойства полимеров. Л.: Химия, 1986.
- Ростовцев А. М. Контроль качества деталей из пластмасс. Л.: Химия, 1984.
- Сафонов А. Л., Сафонов Л. И. Прямоугольные электрические соединители. СПб.: Файнстрит, 2011.
- Сафонов А. Л., Сафонов Л. И. Неподвижные контакты электрических соединителей. М.: Машиностроение, 2012.