

Прямоугольные электрические соединители

Изготовление пластмассовых изоляторов повышенной точности

Повышение точности деталей из пластмасс предусматривает решение теоретических и практических задач на стадии их проектирования и производства. Для этого следует разработать целевые научно-технические программы, предусматривающие прогнозирование показателей технического уровня изделий, развитие фундаментальных и прикладных исследований по проблемам качества и надежности, повышенные требования к полимерным композиционным материалам, оборудованию, средствам контроля и измерений и т. д.

Александр Сафонов
Леонид Сафонов

edef@online.debryansk.ru

Введение

Основная масса изоляторов электрических соединителей в настоящее время изготавливается из полимерных материалов (ПМ) или полимерных композиционных материалов (ПКМ), то есть из полимерных или наполненных пластмасс. Проблема повышения качества изоляторов, их точности и взаимозаменяемости многогранна, ее решение, в конечном счете, влияет на надежность и долговечность работы электрических соединителей.

Точность как одна из важнейших составляющих качества изоляторов определяет уровень требований, предъявляемых к материалам, технологии, оборудованию, оснастке и метрологическому обеспечению процесса производства.

Вопросы точности деталей из пластмасс постоянно находятся в сфере интересов ученых и практиков всего мира, однако нерешенных проблем в этой области остается еще достаточно много. Наиболее подробно эти вопросы в нашей стране изучал В. А. Брагинский, который обосновал необходимость разработки теоретических и прикладных проблем точности производства изделий из пластмасс.

Следует отметить, что создание теории переработки пластмасс начато сравнительно недавно. И естественно, что приоритетом были главные проблемы, которые относились к превращениям полимерных материалов при воздействии на них температурно-силовых полей во время переработки в изделия, а также вопросы обеспечения высокой производительности процессов переработки. Задачи повышения качества и точности деталей из пластмасс существенно усложняют и задачи, стоящие перед теорией переработки. Возникает новый ее аспект — теория точности производства деталей из пластмасс. Актуальность этого аспекта теории

переработки пластмасс особенно трудно переоценить сегодня, когда вопросы точности стоят в числе приоритетных, в связи с миниатюризацией радиоэлектронных компонентов и переводом их на новый уровень качества.

Производственные задачи обеспечения и повышения точности изоляторов

Многообразие возникающих в производстве задач, связанных с необходимостью изготовления изоляторов из пластмасс с заданной точностью, сводятся к нескольким схемам. Основные из них представлены на рис. 1.

- Первая ситуация (I) характеризуется воздействием систематических и случайных факторов на точность литых изоляторов из пластмасс. Она отражает тот факт, что при реализации технологического процесса литья изоляторов наблюдается значительное смещение (ϵ_1) середины поля рассеяния по отношению к середине поля допуска (δ), а само поле рассеяния, равное $\pm 3\sigma$, значительно шире поля допуска. Другое предельно возможное положение кривой рассеяния, обозначенное штриховой линией, относится либо к отверстию, либо к валу (соответствующий элемент изолятора оформляется в литьевой форме пуансоном-знаком или в матрице). Для введения процесса в норму, то есть ликвидации брака (заштрихованные площадки на рис. 1) в первой ситуации необходимо проведение настройки процесса литья (например, за счет изменения исполнительных размеров оформляющих элементов) и осуществления мероприятий по максимально возможному уменьшению колебания технологических режимов, свойств ПМ и прочих случайно влияющих факторов, вызывающих увеличенное рассеяние размеров изоляторов.

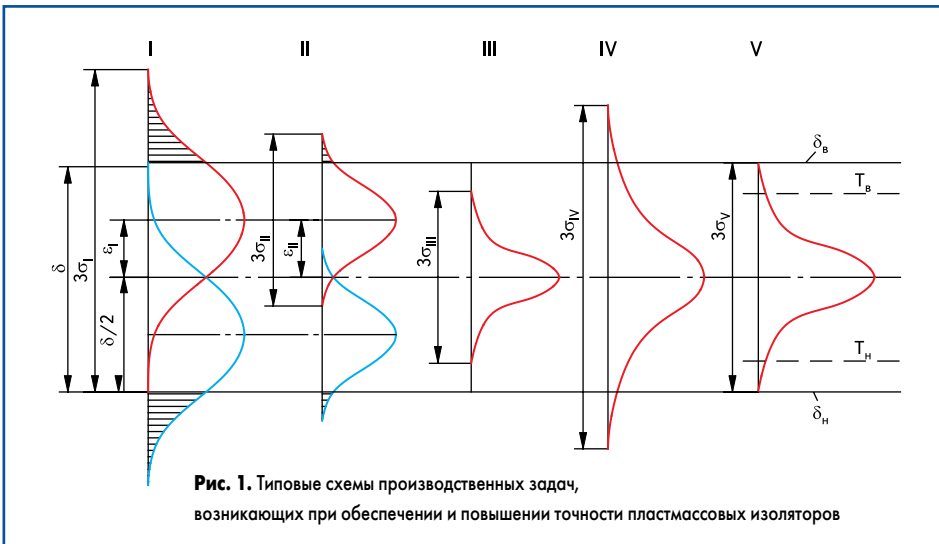


Рис. 1. Типовые схемы производственных задач, возникающих при обеспечении и повышении точности пластмассовых изоляторов

- В отличие от первой, во второй ситуации (рис. 1, II) требуется только поднастройка процесса, так как величина δ и $3\sigma_{II}$ совпадает. В данном случае необходимо лишь изменить в требуемую сторону усадку материала, в том числе, например, использовать другой ПМ, если он обладает не только лучшими усадочными свойствами (то есть меньшей усадкой и ее колебаниями), но и соответствует предъявляемым эксплуатационным требованиям.
- Третья ситуация (III), как и первая, отражает несоответствие конкретных технологических возможностей заданным требованиям, но с тем лишь различием, что здесь несоответствие создаст некоторый «запас», и если он на протяжении достаточно длительного промежутка времени устойчиво сохраняется, то это свидетельствует о необоснованно заданном допуске размера δ .
- Четвертая ситуация (IV), в противоположность второй, не требует поднастройки, а нуждается только в уменьшении рассеяния.
- Наконец, последняя, пятая ситуация (V) — это «идеальная» модель полного соответствия технического задания и технологических возможностей.

Следует учесть, что условно изображенные на рис. 1 кривые распределения размеров отражают некоторое мгновенное, статистическое состояние процесса, но эти же кривые с определенным допущением можно рассматривать и как результат усреднения. В действительности же происходит своеобразное «плавание» кривых распределения, они даже при идеальной ситуации смещаются вследствие воздействия систематических (например, при замене формирующего гнезда), переменных (например, износ оформляющих элементов формы), случайных (новая партия материала) факторов.

Необходимо учитывать и влияние метрологических погрешностей контроля, которые в сочетании с технологическим рассеянием размеров могут изменить окончательное положение и форму кривой рассеяния. При этом возможно, что некоторая часть негодных изоляторов может быть принята и, наоборот, годных забракована. Если бы метод измерения не давал погрешностей, то все действительно

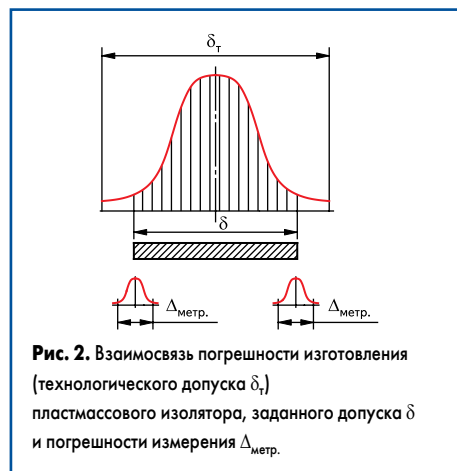


Рис. 2. Взаимосвязь погрешности изготовления (технологического допуска δ_t) пластмассового изолятора, заданного допуска δ и погрешности измерения $\Delta_{метр}$.

бракованные изоляторы были бы забракованы, а все изоляторы с размерами, не выходящими за пределы поля допуска, были бы признаны годными. Реальные погрешности измерения заметно искажают результаты разбраковки на участках кривой распределения, расположенных у границ поля допуска (рис. 2).

На практике удобно относительную погрешность измерения $A_{метр}$ оценивать как:

$$A_{метр} = \Delta_{метр} / \delta. \quad (1)$$

Приведенные соображения, наряду с другими, делают целесообразным назначение контрольных границ (верхней — T_v и нижней — T_n на рис. 1) внутри поля допуска и изготовление изоляторов в этих, более узких границах. Такое ограничение является основой всех методов статистического контроля качества изделий.

Продолжая анализ схем (рис. 1), следует отметить, что в любой из приведенных ситуаций, даже в «идеальной», существует противоречие между требованиями конструктора и возможностями технолога. Зачастую технологические возможности бывают исчерпаны ранее, чем достигается конструкторское требование. Возникающий конфликт тем острее, чем точнее должен быть изготовлен изолятор. Поэтому конструктор и технолог обязаны совместно учитывать конкретные условия производства, особенности применяемого ПМ и т. п. Однако главным при этом должно быть

обеспечение технически обоснованной точности изолятора.

При этом надо помнить, что чем выше требуемая точность, тем больше (гиперболическая зависимость) материальные и трудовые затраты на изготовление изделий (рис. 3), то есть чем допуск меньше, тем относительная себестоимость изделия ($C_{отн.}$) выше. Необходимо учитывать, что, кроме затрат на более точное оборудование, технологическую оснастку, контрольно-измерительные приборы, обеспечение более жесткого допуска связано с повышенным расходом средств на размерный брак. Возможное число забракованных изделий (q) увеличивается по мере уменьшения допуска также по гиперболической зависимости (рис. 3). Особенно большой размерный брак наблюдается на участке кривой «а-б», и если жесткий допуск на изолятор технически обоснован, а технологические резервы применяемого метода, например, литья под давлением, исчерпаны и нет возможности обеспечить требования конструкторской документации (КД), следует либо перейти на другой метод изготовления (включая даже использование механической обработки), либо искать резервы в организационно-технических мероприятиях (например, применение селективной сборки и др.). В общем, технолог несет ответственность за обеспечение требований КД с минимальными затратами.

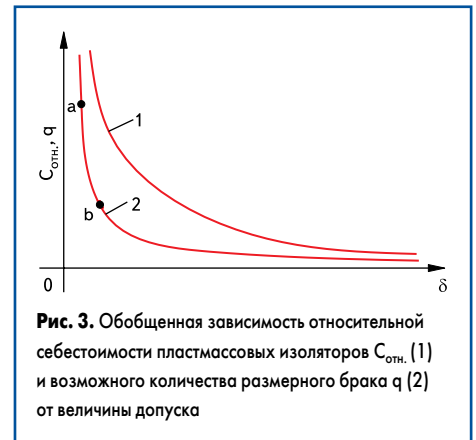


Рис. 3. Обобщенная зависимость относительной себестоимости пластмассовых изоляторов $C_{отн.}$ (1) и возможного количества размерного брака q (2) от величины допуска

Понятие точности изготовления продукции по ГОСТ 16949 «Качество. Статистическая оценка точности и стабильности качества изготовления продукции. Термины и определения» характеризует соответствие поля рассеяния $\pm 3\sigma$ признака качества изготавливаемой продукции заданному полю допуска δ и его расположению. Поле суммарного рассеяния $\Delta_{\Sigma} = \pm 3\sigma$ признака качества, в нашем случае размерной точности, складывается из поля рассеяния — Δ_c возникающего под влиянием случайных факторов процесса, и алгебраической суммы неустраняемых систематических погрешностей при данном технологическом процессе — $\sum \Delta i_{сист.}$. То есть:

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_c + \sum \Delta i_{сист.} \quad (2)$$

Величина Δ_{Σ} — это фактически технологическая погрешность процесса. Используя накопленные практические данные аналогичных технологических процессов и исследуя

систематические погрешности конкретного технологического процесса, можно нормировать величину Δ_{Σ} , устанавливая технологические допуски δ_T .

Технологический допуск зависит от вида и качества ПМ, метода переработки, применяемого оборудования, формирующего инструмента, режимов переработки и других технологических факторов. Только при непрерывном и надежном регулировании точности изготовления изоляторов можно достичь такого положения, когда $\delta_T \approx \Delta_{\Sigma}$. Из сказанного выше следует, что технологический допуск отражает достижимую в конкретных условиях точность изготовления. Сравнивая δ_T , можно устанавливать уровни экономически достижимой точности при различных условиях и способах литья.

Технологический допуск может быть определен не только по предельным границам поля суммарного рассеяния признака. Существуют и другие способы определения допуска, например вероятностный и др.

На практике удобно установить отношение заданного конструкторского допуска δ к технологическому допуску δ_T . Это отношение — технологический запас точности:

$$K_{TT} = \delta / \delta_T \quad (3)$$

Если $K_{TT} < 1$, то это означает, что технологические возможности не обеспечивают конструктивные требования. При $K_{TT} = 1$ необходимая точность выполняется, однако все же нужно стремиться, чтобы $K_{TT} > 1$ (целесообразно, чтобы K_{TT} находился в пределах 1,2–1,5). В данном случае будет создан дополнительный ресурс, обеспечивающий более длительное сохранение требуемой точности.

Свойство ПМ, влияющее на точность изоляторов

Допуски на размеры изоляторов, получаемых литьем под давлением, зависят от точности изготовления оформляющих элементов формы, состояния литейного оборудования и главное — от колебаний усадки материала. Значения усадки и ее колебания зависят в основном от природы полимерного материала (химического строения макромолекул, степени полидисперсности по молекулярной массе, способности к кристаллизации, ориентации и т. д.) и технологии переработки материала. Наибольшее влияние на колебания усадки термопластов оказывает текучесть расплава, критические параметры течения, тепловое расширение и сжимаемость полимеров.

Анализ структуры полимеров и переходов их из одного физического состояния в другое позволяет разделить термопласты на три основные группы.

I. Аморфные или трудно кристаллизующиеся полимеры, максимальная степень кристаллизации которых не превышает 25% и температура стеклования (T_c) значительно превышает комнатную температуру. К этой группе относятся: полистирол, поливинилхлорид, полифениленоксид, поликарбонаты, полиамиды и др.

II. Кристаллизующиеся полимеры со средней степенью кристалличности, T_c которых близка к комнатной температуре.

III. Кристаллизующиеся полимеры с высокой степенью кристалличности, T_c аморфной фазы которых значительно ниже комнатной температуры. К этой группе относятся: полиэтилен, полипропилен, полиформальдегид и др. В нормальных условиях в этих полимерах сочетаются свойства, присущие аморфной фазе, находящейся в эластичном состоянии, и жесткой кристаллической фазе. Ниже T_c аморфной фазы полимеры становятся жесткими и хрупкими.

Поскольку расплавы термопластов являются неньютоновскими жидкостями, то их вязкость (коэффициент вязкости), определяемая как отношение напряжений сдвига τ к скорости сдвига $\dot{\gamma}$, убывает с возрастанием $\dot{\gamma}$ (рис. 4) (явление аномалии вязкости).



Рис. 4. Кривая течения термопласта

На рис. 4 OA — область ньютоновского течения, характеризуемого значением наибольшей ньютоновской вязкости η_n ; AB — область аномалии вязкости, определяемая постепенным уменьшением вязкости η с возрастанием скорости и напряжения сдвига; BC — область ньютоновского течения, характеризуемого значением наименьшей ньютоновской вязкости.

Уменьшение η при возрастании $\dot{\gamma}$ обусловлено усилением разрушения структуры полимера с ростом деформаций. Установившемуся течению (прямолинейный участок на кривой AB) соответствует динамическое равновесие процессов разрушения и восстановления структурных связей. В области наибольшей ньютоновской вязкости наблюдается течение полимера с условно не разрушенной структурой,

а в области наименьшей ньютоновской вязкости — течение системы с полностью разрушенной структурой, в связи с чем дальнейшее возрастание напряжения не может привести к еще более глубоким превращениям структуры. При переработке литьем под давлением участок BC кривой течения для промышленных полимеров реализовать не удастся.

Вязкость влияет на значения давления в оформляющей полости формы, потери давления при течении расплава, степень уплотнения отливки и величину усадки. Колебания вязкости приводят к изменениям давления и, как следствие, колебаниям усадки.

Потери давления при впрыске расплава в форму определяются сопротивлением его течению расплава:

$$P = (12 \times \eta Q l) / (b h^3 l f), \quad (4)$$

где P — давление на входе в оформляющую полость; η — вязкость расплава; Q — объемная скорость впрыска (объем расплава, проходящий через сечение литникового канала в единицу времени); l, b, h — соответственно длина, ширина и толщина канала; f — коэффициент течения (зависит от формы сечения канала: для квадратного сечения — 0,4217, для круглого — 0,294, полукруглого — 0,447).

Область аномалии вязкости большинства промышленных полимеров находится в интервале напряжений сдвига примерно 10^3 – 10^5 Па. Скорость сдвига, при которой наблюдается аномалия вязкости, обычно более 10^2 s^{-1} . Повышение температуры, снижение давления, увеличение содержания влаги, уменьшение молекулярной массы вызывают снижение вязкости расплава. Значение вязкости типичных расплавов термопластов составляет от десятков Па·с (полиамиды, полиэтилентерефталат) до 10^3 – 10^5 Па·с (полиэтилен, полипропилен, полистирол).

Скорость сдвига, обычно реализуемая при литье под давлением, составляет примерно 10 – 10^4 s^{-1} и в сотни раз снижается при переходе от стадии заполнения к стадии подпитки. В этом диапазоне скорости возможно развитие как ньютоновского, так и аномально-вязкого течения. На рис. 5 представлены типичные кривые изменения вязкости полимеров, обладающих различной чувствительностью к сдвигу.

Кривая 1 характерна для полимеров с большой протяженностью (по скорости сдвига) области ньютоновского течения, а также

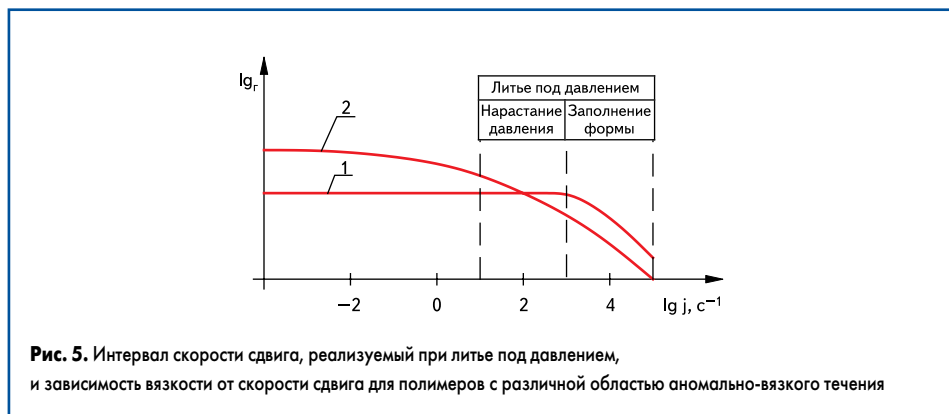


Рис. 5. Интервал скорости сдвига, реализуемый при литье под давлением, и зависимость вязкости от скорости сдвига для полимеров с различной областью аномально-вязкого течения

для полимеров со сравнительно узким молекулярно-массовым распределением (ММР) (полиамиды, полиацетали, поликарбонаты, полиалкилентерефталаты, полисульфон). Кривая 2 характерна при переходе к аномальному течению при малых напряжениях и скоростях сдвига, она характерна для полимеров с более широким ММР (полиолефины, полистирол, пластик АБС).

ММР полимеров характеризует соотношение количества макромолекул разной молекулярной массы в конкретном образце полимера. ММР полимера характеризуют значениями среднечисловой \bar{M}_w и среднечисловой \bar{M}_n молекулярных масс и их соотношением \bar{M}_w/\bar{M}_n , отражающим статистическую ширину ММР. Для полимеров с узким ММР $\bar{M}_w/\bar{M}_n \leq 2$, с широким ММР — $\bar{M}_w/\bar{M}_n > 2$.

Для получения точных изоляторов предпочтительнее использовать полимеры, вязкость которых при литье изменяется по кривой 1 (рис. 5). При этом на стадии нарастания давления, определяющей главным образом величину усадки, вязкость расплава будет постоянной, что приведет к минимуму колебаний давления в оформляющей полости формы, а следовательно, и колебаний усадки.

Переход от ньютоновского к неьютоновскому течению развивается в диапазоне скорости сдвига, который тем шире, чем шире ММР. Поэтому для литья точных изоляторов предпочтительны полимеры с узким ММР. Следует отметить, что для ряда инженерных пластиков (полиамиды, поликарбонаты, полиацетали, полиалкилентерефталаты и др.) переход в нелинейную область происходит примерно при одинаковой скорости сдвига, и в этом случае влиянием ММР на вязкость можно пренебречь.

Эффективная вязкость с возрастанием скорости сдвига уменьшается тем сильнее, чем выше жесткость полимерной цепи, больше молекулярная масса и ниже температура.

Температурная зависимость вязкости хорошо описывается формулой Френкеля-Эйринга-Аррениуса:

$$\eta = e^{E/RT}. \quad (5)$$

где E — энергия активации течения, характеризующая температурную зависимость вязкости, обычно $E \approx 30-100$ кДж/моль; R — газовая постоянная ($R = 8,314$ кДж/моль·К); T — абсолютная температура.

Уравнение (5) удовлетворительно описывает изменение ньютоновской вязкости. При скоростях сдвига больше 10^3 с⁻¹ для большинства термопластов изменять температуру с целью регулирования текучести неэффективно. Переработка при высоких скоростях сдвига характеризуется меньшим влиянием неустойчивости температурного режима на вязкость.

Влияние давления на вязкость полимеров

Вязкостные свойства некоторых полимеров значительно зависят от давления. Повышение давления приводит к сближению макромолекул, что вызывает возрастание вязкости рас-

Таблица. Сорбция воды термопластами и ее влияние на весовые и размерные характеристики образцов

Наименование термопласта	Увеличение массы, мг*	Насыщение влагой при 23 °С и 50%-ной относительной влажности (состояние равновесия)		Насыщение влагой при 20 °С (состояние насыщения)	
		Увеличение массы, %	Линейное удлинение по отношению к сухому образцу, %	Увеличение массы, %	Линейное удлинение по отношению к сухому образцу, %
Полиамид	100–500	2,5–3,0	1,1–1,2	8–9	2,3–2,8
Полиамид стеклонеполненный (30% стекловолокна)	–	1,5–2,0	0,15	5,5–6,0	0,4–0,6
АБС-пластик	20–70	–	–	0,5–0,52	0,1–0,12
Полиэтилен, полипропилен	0,01	–	–	0,001	0,01
Полистирол	3–4	–	–	0,05	0,02
Поликарбонат	10	–	–	0,3	0,06

Примечание. * — данные, полученные на дисках диаметром 50 мм и толщиной 3 мм после выдержки их в воде при 23 °С в течение 4 суток.

плава. Особенно это характерно для ньютоновской вязкости. Наиболее сильное влияние давление оказывает на вязкость аморфных термопластов (полистирол, поликарбонат, полисульфон и др.). Для кристаллизующихся термопластов (полиамиды, полиацетали, полиалкилентерефталаты) характерна более слабая зависимость вязкости от давления.

Возрастание давления вызывает уменьшение свободного объема в полимерах. Это становится существенно при $P > 40-60$ МПа, когда обнаруживается заметное повышение вязкости. При дальнейшем повышении давления вязкость резко увеличивается по экспоненциальной зависимости $\eta \approx e^P$.

При повышении $P = 200-300$ МПа η возрастает в десятки раз, что необходимо учитывать при разработке технологии литья точных изоляторов.

Влияние влажности на качество изоляторов

Некоторые термопласты (полиамиды, поликарбонат и др.) гигроскопичны. Вода в полимерах оказывает существенное влияние на технологию литья точных изоляторов. Оно проявляется через изменение вязкости и термостабильности расплава, а также размеров изоляторов в результате сорбции влаги.

Процесс поглощения воды полимерами имеет диффузионный характер и зависит от соотношения между площадью поверхности детали и ее объемом. Чем больше поверхность, тем быстрее достигается состояние насыщения. Поглощение воды приводит к увеличению массы изолятора и к изменению его размеров. В таблице приведены данные о сорбции влаги некоторыми инженерными пластиками и ее влияние на весовые и размерные параметры деталей.

С повышением влажности вязкость расплава снижается, особенно в ньютоновской области. При низком влагосодержании (0,01–0,02%) вязкость расплава полимеров практически не зависит от влажности, в этом случае величина вязкости определяется температурой и молекулярной массой полимера.

При повышенном содержании влаги в расплавах полимеров протекают процессы химической деструкции молекул (гидролитический

распад, гидролиз цепей). В результате этого происходит снижение молекулярной массы, в объеме полимера накапливаются низкомолекулярные, в том числе летучие продукты. При этом вязкость расплава резко снижается, ухудшаются показатели свойств материала. Обычно реакции гидролитического распада протекают по закону случая и приводят к беспорядочному расщеплению макромолекул. При гидролизе происходит присоединение воды и, как правило, отщепление мономерных звеньев от макромолекул, в результате чего изменяется химический состав полимера. Концентрация воды в полимерах, выше которой в расплавах протекают интенсивные деструктивные процессы, составляет 0,02–0,05%. Чувствительность макромолекул к гидролитическим реакциям определяется природой функциональных групп и строением основной цепи. Поэтому одни полимеры (полиолефины, полистирол и его сополимеры и др.) устойчивы к гидролизу, другие (полиамиды, полиэфир, полисульфон и др.) менее устойчивы, третьи склонны к гидролизу (например, полиметилметакрилат) и обладают пониженной стойкостью к деструкции.

Неслучайно вопросам влажности полимеров в процессе переработки и насыщения готовых изоляторов водой в статье уделено особое внимание. Повышенное содержание влаги снижает стабильность технологического процесса литья, ухудшает механические и электрические свойства отлитых изоляторов, не позволяет получить отливки с заданными размерами.

Следует отметить, что в материальном цилиндре термопластавтомата наряду с гидролитическими процессами одновременно протекают процессы термической и термоокислительной деструкции, сшивания, дополиконденсации. При определенном содержании влаги между этими процессами наступает динамическое равновесие, и в течение длительного времени вязкость расплава изменяется незначительно.

Из рассмотренного видно, что основными параметрами, влияющими на вязкость расплава термопластов, являются температура переработки, влажность материала в момент переработки, молекулярная масса и молекулярно-массовое распределение полимера. При формировании точных изоляторов значения этих параметров должны быть таким, чтобы соответствующие колебания вязкости

не превышали +10%, для более точных изоляторов эти колебания должны иметь еще меньшие значения. Давление литья и скорость сдвига также влияют на вязкость, это влияние необходимо учитывать исходя из особенностей конструкции изолятора и возможностей литьевого оборудования.

Усадка при литье под давлением

Усадку термопластов с физической точки зрения можно разделить на термическую и структурную. Термическая усадка характеризуется уменьшением объема массы при охлаждении и определяется температурным коэффициентом линейного расширения α и сжимаемостью материала. Структурная усадка связана с уменьшением объема при охлаждении, которое происходит в результате преобразования структуры после формования за счет кристаллизации и релаксации ориентированного материала в аморфных областях или во всей отливке — для аморфных термопластов. Усадочные процессы при литье являются главной причиной последующей усадки изоляторов, они приводят к внутренним напряжениям. Усадка изоляторов при нормальных условиях в основном заканчивается через несколько часов после их изготовления.

Величина усадки определяется различиями в объеме расплавленного и твердого полимера. Изменение объема полимера может быть охарактеризовано с помощью таких характеристик, как объемный или линейный коэффициенты термического расширения. Однако эти коэффициенты могут изменяться в различных интервалах температур, причем характер изменения различен для аморфных и кристаллизующихся термопластов.

Экспериментами установлено, что ниже температуры размягчения или кристаллизации значение температурного коэффициента линейного расширения α относительно мало, в области температур переходов находится характерный пик, а при более высокой температуре α снова уменьшается. Это можно проследить на графике зависимости α от температуры при постоянном давлении для некоторых термопластов (рис. 6).

Тепловое расширение полимеров характеризуется следующими коэффициентами:

- температурный коэффициент объемного расширения β :

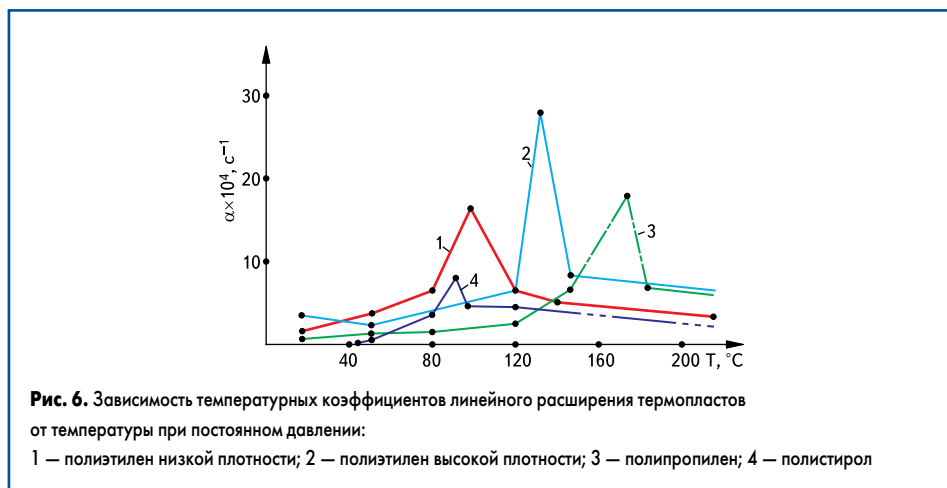
$$\beta = \frac{1}{v} \left(\frac{dv}{dT} \right) P; \quad (6)$$

- температурный коэффициент линейного расширения α :

$$\alpha = \frac{1}{l} \left(\frac{dl}{dT} \right) P; \quad (7)$$

- мольный коэффициент теплового расширения ε_m :

$$\varepsilon_m = \left(\frac{dV_m}{dT} \right) P. \quad (8)$$



В формулах (6–8) V — объем изолятора; T — температура; P — давление; l — линейный размер тела; V_m — мольный объем вещества.

Связь между коэффициентами β , α и ε_m определяется соотношениями:

$$\beta = 3\alpha, \quad \varepsilon_m = \beta, \quad V_m = \beta (M/\rho), \quad (9)$$

где M — молекулярная масса моля вещества; ρ — плотность вещества.

Значения мольных коэффициентов теплового расширения в стеклообразном (ε_s) и высокоэластичном (ε_e) состояниях, а по ним — и величины α и β , могут быть определены по методу Ван-Кревелена расчетным путем.

Результаты расчета температурных коэффициентов расширения могут использоваться для предварительного анализа величины возможной усадки при литье под давлением.

При охлаждении расплавов кристаллизующихся полимеров резкое снижение удельного объема наблюдается при температуре, соответствующей максимальной скорости кристаллизации. Для большинства полимеров максимум скорости кристаллизации достигается при практически постоянных абсолютных температурах кристаллизации, равных 0,8–0,83 от температуры плавления. Соответственно, при температуре оформляющих элементов формы при литье под давлением, равной температуре максимальной скорости кристаллизации, усадочные процессы в полимере будут протекать наиболее полно.

Удельный объем полимеров зависит от температуры и давления. Способность полимеров изменять объем под влиянием давления называют сжимаемостью и характеризуют коэффициентом сжимаемости k :

$$k = \frac{1}{v} \left(\frac{dv}{dP} \right)_T. \quad (10)$$

Сжимаемость обусловлена наличием свободного объема в полимере, не занятого собственными молекулами. С учетом k удельный объем расплава полимера под давлением P и температурой T может быть определен по формуле:

$$V = V_0 [1 + \beta(T - T_0) - k(P - P_0)], \quad (11)$$

где V_0 — удельный объем при T_0 и P_0 ; T_0 — температура, равная температуре плавления

для кристаллических полимеров и температуры стеклования для аморфных полимеров.

Сжимаемость термопластов с повышением температуры увеличивается, а с повышением гидростатического давления снижается и различна для разных полимеров. Так, например, при давлении 100 МПа объем расплава полиамида 66 уменьшается на 4%, а полистирола и полипропилена — на 7 и 8,5% соответственно. Сжимаемость расплавов термопластов важна в технологии точных изделий, получаемых литьем под давлением, поскольку за счет сжатия расплава полимера происходит компенсация усадки.

Наиболее низкие значения температурных коэффициентов расширения имеют аморфные полимеры (поликарбонат, полисульфон, полифениленоксид, полиарилат, полистирол, полиметилметакрилат и др.). Их температурный коэффициент изменяется в пределах $4,7\text{--}28 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, поэтому при охлаждении у них наблюдается большая усадка.

Высокая сжимаемость характерна для полимеров с большим свободным объемом строения. Установлено, чем выше сжимаемость расплава, тем чувствительнее колебания усадки полимера к колебаниям давления при переработке; чем выше температурный коэффициент линейного теплового расширения, тем больше колебания усадки при колебаниях температуры литья. Для литья точных изоляторов предпочтительно использовать полимеры с низкими значениями α и k .

Величина усадки и ее колебания в значительной степени зависят от молекулярной и надмолекулярной организации полимера в отливках, которая определяется не только природой и состоянием исходного сырья, но и значениями технологических параметров переработки, конструкцией литниковой системы и оформляющих полостей формы.

Управление процессом литья под давлением

Обеспечение высоких показателей точности пластмассовых изоляторов для современных высокотехнологичных электрических соединителей требует постоянного контроля и регулирования многих технологических параметров технологического процесса литья.

Изменения усадки, а также ее колебаний можно достичь, регулируя удельный объем путем изменения температуры и давления. В современной технологии литья точных изделий программирование процесса литья осуществляется путем построения идеальной зависимости удельного объема от давления и температуры, записываемой на дисплее мини-ЭВМ термопластавтомата, и последующей подстройкой технологических параметров литья, чтобы реальная диаграмма $P-V-T$ максимально приближалась к идеальной.

Установлено, что точность и большинство других показателей качества изоляторов зависит преимущественно от одного параметра — давления расплава в оформляющей полости формы. Для каждой конкретной формы и каждого конкретного термопласта можно определить оптимальное давление для получения отливок требуемого качества.

Программное изменение давления литья осуществляется путем программного изменения скорости впрыска и давления подпитки. На основании теоретических исследований и практического опыта переработки полимеров установлено, что целесообразно многоступенчатое изменение скорости впрыска. Высокая скорость в конце операции заполнения может привести к частичному раскрытию формы. Кроме того, при большой кинетической энергии шнека затруднено переключение режимов в требуемый момент времени, что приводит к неконтролируемым скачкам давления в форме. Слишком большая скорость впрыска в начале заполнения может вызвать нежелательный в ряде случаев режим заполнения. Малая скорость, постоянная в течение всей стадии заполнения, может вызвать переохлаждение расплава во время течения, волнистость поверхности, недопрессовки и другие виды брака изоляторов. На первом этапе впрыска шнек в материальном цилиндре должен перемещаться с достаточно высокой скоростью, что необходимо для быстрого заполнения литниковой системы вплоть до впуска. На втором этапе он должен двигаться со значительно меньшей скоростью, чтобы расплав, проходя через впуск, медленно заполнял оформляющую полость. Это условие предотвращает повышение сдвиговых напряжений и чрезмерную ориентацию макромолекул, исключает образование летучих композиционных материалов из-за термодеструкции при сдвиге и расслоении.

При поступлении первой порции расплава в оформляющую полость скорость впрыска может быть снова увеличена, так как наличие материала в полости формы снижает вероятность струйного течения. Перед окончательным заполнением полости формы, на стадии «подпитки» скорость снова снижается, что способствует исключению грата, обеспечивает плавную точную подачу расплава и достижение заданного давления в оформляющей полости формы. На заключительной стадии рекомендуется снижать скорость впрыска до 5–20% от максимальной. Использование вышеизложенных рекомендаций позволит в значительной степени стабилизировать процесс литья и повысить качество изоляторов.

Заключение

Точность изделий из пластмасс характеризует только одну из сторон их качества. Под качеством понимается совокупность свойств изделия, в нашем случае изолятора, обуславливающих его пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с его назначением. Показатель «точность» имеет сложную структуру, так как он может реализовываться как точность размеров, формы, массы и т. д. или в сочетании этих показателей, а также в их изменении во времени. Поэтому точность изоляторов из пластмасс следует рассматривать в общем плане их конструктивной определенности.

Конструктивная определенность изолятора из пластмасс — функциональное свойство, благодаря которому сохраняются необходимые эксплуатационные показатели в допустимых пределах при воздействии на них в течение жизненного цикла комплекса внешних и внутренних воздействующих факторов (нагрузки, температуры, структурных изменений и т. д.).

Точность пластмассового изолятора означает степень соответствия его размеров, указанных на чертеже, в любой момент жизненного цикла. Подобное определение точности, по мнению авторов, позволяет не только фиксировать фактическую исходную точность, определяемую прямым измерением изолятора, но и предполагает возможность прогнозирования будущей фактической точности через любой реальный задаваемый промежуток времени.

Фактическая точность пластмассового изолятора в процессе хранения или эксплуатации может отличаться от ранее вычисленной на этот же период прогнозируемой точности. Это различие будет тем меньше, чем ближе к реальности описание процессов, протекающих в период хранения и эксплуатации, и чем точнее будут исходные данные для расчета.

В данной статье рассмотрены типовые схемы производственных задач, возникающих при обеспечении и повышении точности пластмассовых изоляторов, а также определена зависимость между конструкторским и технологическим допусками. Приведен анализ структуры полимеров и переход их в различные состояния в процессе литья. Определена степень влияния различных технологических параметров и свойств полимеров на точность и качество отливаемых изоляторов, даны рекомендации по управлению процессом литья под давлением.

Использование приведенной информации и рекомендаций в области теоретических и практических знаний позволит в значительной степени оптимизировать процесс изготовления точных пластмассовых изоляторов и значительно уменьшить издержки производства.

Литература

1. Ростовцев А. М. Контроль качества деталей из пластмасс. Л.: Химия, 1984.
2. Альшиц И. Я., Благов Б. Н. Проектирование деталей из пластмасс. М.: Машиностроение, 1977.

3. Привалко В. П. Молекулярное строение и свойства полимеров. Л.: Химия, 1986.
4. Брагинский В. А. Точное литье изделий из пластмасс. Л.: Химия, 1977.
5. Штурман А. А., Берлин А. Н. Качество поверхности деталей из пластмасс. Л.: Химия, 1987.
6. Старжинский В. Е., Фарберов А. М., Песецкий С. С. Точные пластмассовые детали и технология их получения. Минск: Наука и техника, 1992.
7. Аскадский А. А., Матвеев Ю. И. Химическое строение и физические свойства полимеров. М.: Химия, 1983.
8. Калинин Э. Л., Саковцева М. Б. Свойства и переработка термопластов. Л.: Химия, 1983.
9. Сафонов А. Л., Сафонов Л. И. Прямоугольные электрические соединители. Требования к изоляторам и материалам для их изготовления // Технологии в электронной промышленности. 2009. № 5.