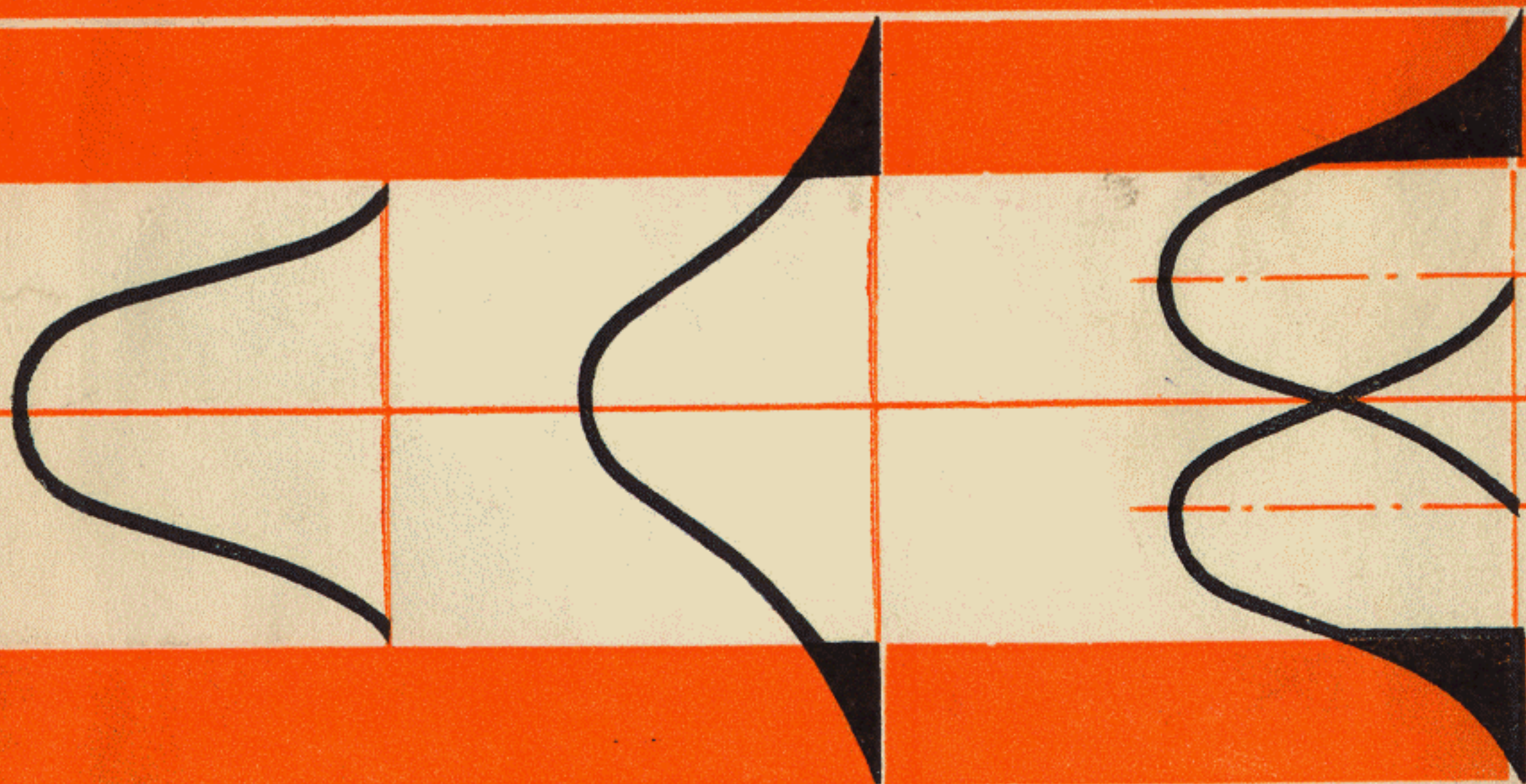


**ТОЧНОЕ
ЛИТЬЕ**
В.А.БРАГИНСКИЙ
**ИЗДЕЛИЙ
ИЗ
ПЛАСТМАСС**



// ХИМИЯ //



В. А. Брагинский

ТОЧНОЕ ЛИТЬЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПЛАСТМАСС



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ХИМИЯ»
Ленинградское отделение • 1977

Брагинский В. А.

Б 87 Точное литье изделий из пластмасс. Л., «Химия», 1977.

112 стр., 26 рис., 13 табл., список литературы 82 ссылки.

В книге рассмотрены основные вопросы изготовления точных и качественных деталей из термопластов литьем под давлением. Подробно анализируется технологический процесс. Приводятся методы расчета погрешностей изготовления отливок и выбора технологических допусков. Описаны средства и методы контроля качества отливок, пути повышения точности изготовления изделий.

Книга предназначена для инженерно-технических работников, конструкторов промышленности переработки пластмасс и смежных отраслей; она будет полезна преподавателям, студентам и учащимся соответствующих вузов и техникумов.

Б 31410-054
050(01)-77 54-77

6П7.55

ПРЕДИСЛОВИЕ

Основная цель книги — привлечь внимание производителей к важной народнохозяйственной проблеме изготовления точных изделий из пластмасс, и в частности, — к ряду первоочередных вопросов современной технологии, выделив такие их стороны, которые позволяют несколько по-новому очертить сферу действия, круг забот технолога современного массового автоматизированного пластмассового производства.

Точность продукции — это один из аспектов ее качества. Десятилетняя пятилетка развития народного хозяйства нашей страны — пятилетка эффективности и качества — создает благоприятные условия и для дальнейших работ в области проблемы точности деталей из пластмасс: в 1976—1980 гг. предусмотрено не только увеличить выпуск синтетических смол и пластических масс в 1,9—2,1 раза, но и существенно повысить качество и срок службы пластмасс (наряду с большим увеличением выпуска оборудования для переработки, приборов и измерительных устройств для контроля и управления технологическими процессами). Важно и то, что в десятой пятилетке предстоит значительно повысить качество, точность, надежность, долговечность практически всех машин и приборов, а современные изделия не мыслимы без деталей из пластмасс.

Объем книги относительно невелик: в определенной степени это связано с тем, что отечественная промышленность накапливает опыт изготовления точных изделий из пластмасс (поэтому необходимы широкая информация и обзор исследований, ведущихся за рубежом).

Больше всего точных* пластмассовых изделий делают в приборостроении; в машиностроении, станкостроении их в 2—3 раза меньше, а в химической промышленности — даже в 4—5 раз меньше, чем в приборостроении. Следует отметить, что, по имеющимся сведениям, только в 20—30% случаев такая точность изделий достигается путем их механической обработки.

На повестке дня сейчас не только расширение номенклатуры точных изделий, но и создание специализированных производств точных изделий из

* Условно отнесены к точным изделия, сопрягаемые с другими, т. е. включительно до 5 класса точности системы допусков и посадок ОСТ. Этот класс точности соответствует 12—13 квалитетам точности (IT) системы ИСО, которая будет использована в серии стандартов СЭВ «Единая система допусков и посадок», начиная с 1977 г. Более грубые, чем указанные квалитеты, применяют для нормирования точности несопрягаемых размеров.

пластмасс (например, специализированных заводов полимерных подшипников скольжения).

Книга посвящена точным литым (т. е. получаемым литьем) изделиям из пластмасс. Точное литье — понятие распространенное, хотя и условное. Оно постоянно актуально, поскольку соответствует тенденциям развития техники по повышению уровня точности и взаимозаменяемости готовой продукции.

Точное изделие — это результат конкретного технологического процесса*.

Технолог, решая задачи обеспечения и повышения качества и точности изготовления изделий из пластмасс, стоит перед необходимостью учета большого числа факторов (даже только главных, доминирующих, а не вообще всех). Мы знаем, что ЭВМ может быть помощником технологу при решении таких задач. Однако пока промышленность только готовится к широкому применению ЭВМ, определяются рациональные области использования последних, их возможности в производстве изделий из пластмасс. Период внедрения будет достаточно длителен. Необходимо умело учитывать резервы — технологические, конструктивные, метрологические — в каждом конкретном случае изготовления точного пластмассового изделия. Следовательно, решение производственных задач невозможно без совместного труда технолога с конструктором и метрологом. Это тем более важно, что требования потребителей бывают весьма сложными, а рекомендации соответствующих стандартов — жесткими.

Разработка теории переработки пластмасс начата сравнительно недавно. И естественно, что она до сих пор рассматривала только те главные проблемы, которые относятся к превращениям полимерных материалов при воздействии на них температурно-силовых полей во время переработки в изделия, а также к вопросам обеспечения высокой производительности процессов переработки. Задачи повышения качества и точности деталей из пластмасс существенно усложняют и задачи, стоящие перед теорией переработки. Возникает новый аспект ее, а именно: теория точности производства деталей из пластмасс.

Проблема точности изделий из пластмасс в течение ряда лет исследуется на кафедре «Физика и механика полимеров» ЛТИ им. Ленсовета. Помимо автора в этой работе непосредственно на разных ее этапах (в области литья изделий из пластмасс) участвовали кандидаты технических наук У. Зейферт, Ю. П. Ложечко (один из первых исследователей вопроса об остаточно-напряженном состоянии отливок), Э. Б. Райский, С. И. Сягаева, М. И. Горкер и др.

Автор надеется, что книга послужит делу внедрения точных изделий из пластмасс в народное хозяйство нашей страны. Все замечания и пожелания читателей будут приняты с благодарностью.

* См. ГОСТ 3.1109—73 «ЕСТД. Процессы технологические. Основные термины и определения» и ГОСТ 3.1409—74 «ЕСТД. Правила оформления документов на изготовление деталей из пластмасс».

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ЗАДАЧИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗДЕЛИЙ

Многообразие встречающихся на производстве задач, связанных с необходимостью изготовления изделий из пластмасс любой заданной точности и особенно в случаях, когда надо повышать точность и качество уже выпускаемых изделий (что может быть вызвано изменением потребительских требований), можно представить в виде нескольких типовых схем (ситуаций), которые, впрочем, характерны для любого производства.

Эти схемы изображены на рис. 1. Будем исходить из того, что δ — допуск размера (или другого параметра точности изделия — формы, шероховатости поверхности; или другого показателя качества изделия, например, прочности и т. д.). Величину δ устанавливают либо на основании соответствующего расчета, либо выбирают по аналогии, на основании предыдущего опыта, либо назначают условно, интуитивно. Ответственность за правильное и рациональное решение в отношении величины δ несет конструктор (для задач, относящихся к обеспечению размерной взаимозаменяемости деталей из пластмасс, некоторые рекомендации по методике расчета и выбору значений δ приведены на стр. 97).

Схемы на рис. 1 построены в предположении, что середина поля допуска (заданного на чертеже или в технических условиях) оптимальна. Размер, соответствующий середине поля допуска — это своеобразный номинал (не путать с номинальным размером из теории допусков и посадок, относительно которого определяются размеры и который служит также началом отсчета отклонений). Номинал на практике часто устанавливают в середине поля допуска (или в той его части, которая соответствует высшему сорту годной продукции). Но такое решение оптимально лишь в том случае, когда одновременно имеется: 1) симметричный по отношению к номиналу закон распределения отклонений; 2) одинаковая, симметричная по отношению к центру допуска или выбранной его части «цена» годной продукции и одинаковая стоимость продукции, выходящей за пределы допуска. Цену можно понимать не только буквально, но и как любое не стоимостное выражение результата. Таким образом, номинал будет соответствовать математическому ожиданию цены результата. Следует отметить, что в очень большом числе реальных технологических процессов законы распределения

отклонений от номинала несимметричны и также несимметрично распределение цены результата той или иной реализации производственной (технологической) операции. Во всех таких случаях надо исследовать вопрос о целесообразности и оптимальности смещения номинала по отношению к середине поля допуска. Необходимые математические решения приведены в [1]. Вопросы, подобные рассматриваемым, весьма актуальны для технологических процессов изготовления изделий из пластмасс, в том числе литьем под давлением. В первом приближении, однако, можно принять указанные выше условия для обоснования выбора середины поля допуска в качестве номинала. Кстати, на такой теоретической основе базируется известный метод расчета исполнительных размеров формующего инструмента для изготовления изделий из пластмасс [2].

Итак, первая типовая ситуация (рис. 1, I) относится к наиболее, пожалуй, распространенному варианту одновременного

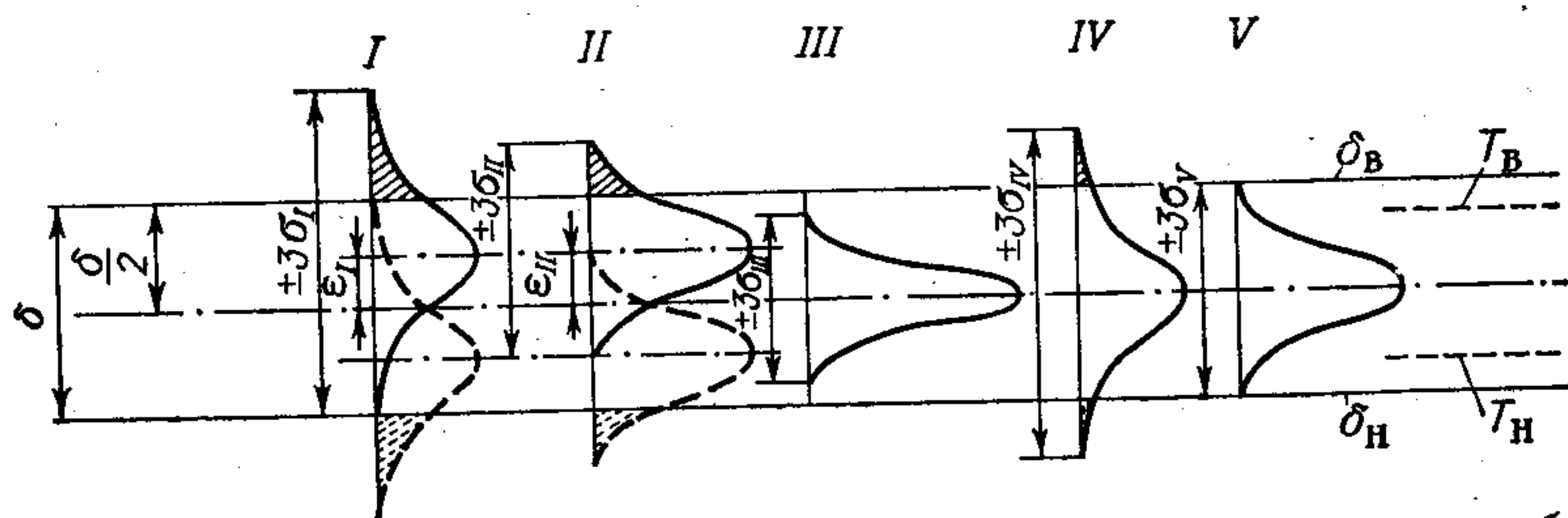


Рис. 1. Типовые схемы производственных задач, возникающих при обеспечении и повышении точности пластмассовых изделий.

воздействия систематических и случайных факторов на точность литых изделий из пластмасс. Она отражает тот факт, что при реализации технологического процесса изготовления пластмассовых изделий наблюдается значительное смещение ϵ_1 середины поля рассеяния по отношению к середине поля допуска, а само поле рассеяния, равное $\pm 3\sigma_1$, намного шире поля допуска. Штрихами показано другое предельно возможное положение кривой рассеяния; расположение кривых рассеяния зависит от того, относятся ли они к отверстию или валу (соответствующий элемент пластмассового изделия оформляется пуансоном-знаком или в матрице). Для введения процесса в норму, т. е. для ликвидации брака (на рисунке заштрихованные площади) в первой ситуации требуется проведение настройки процесса (например, за счет изменения исполнительных размеров формующего инструмента) и осуществления ряда мероприятий по максимально возможному уменьшению колебания технологических режимов, свойств сырья и прочих случайно влияющих факторов, вызывающих увеличенное рассеяние размеров изделий.

В отличие от первой, во второй ситуации (рис. 1, II) требуется только поднастройка процесса, так как легко убедиться,

что величины δ и $\pm 3\sigma_{11}$ совпадают*. Такая ситуация довольно часто встречается, и поэтому помимо указанного выше приема можно пользоваться любыми другими, позволяющими изменять в требуемую сторону — абсолютную усадку (усадочную деформацию) пластмассового изделия (в том числе, например, используя другой материал, если он обладает не только лучшими усадочными свойствами (т. е. меньшей усадкой и её колебаниями), но и удовлетворяет предъявляемым эксплуатационным требованиям.

Третья ситуация (III), как и первая, отражает несоответствие конкретных технологических возможностей заданным требованиям, но здесь это несоответствие создает некоторый «запас», и если он на протяжении достаточно длительного промежутка времени устойчиво сохраняется, то это свидетельствует о необоснованно заданном допуске размера δ .

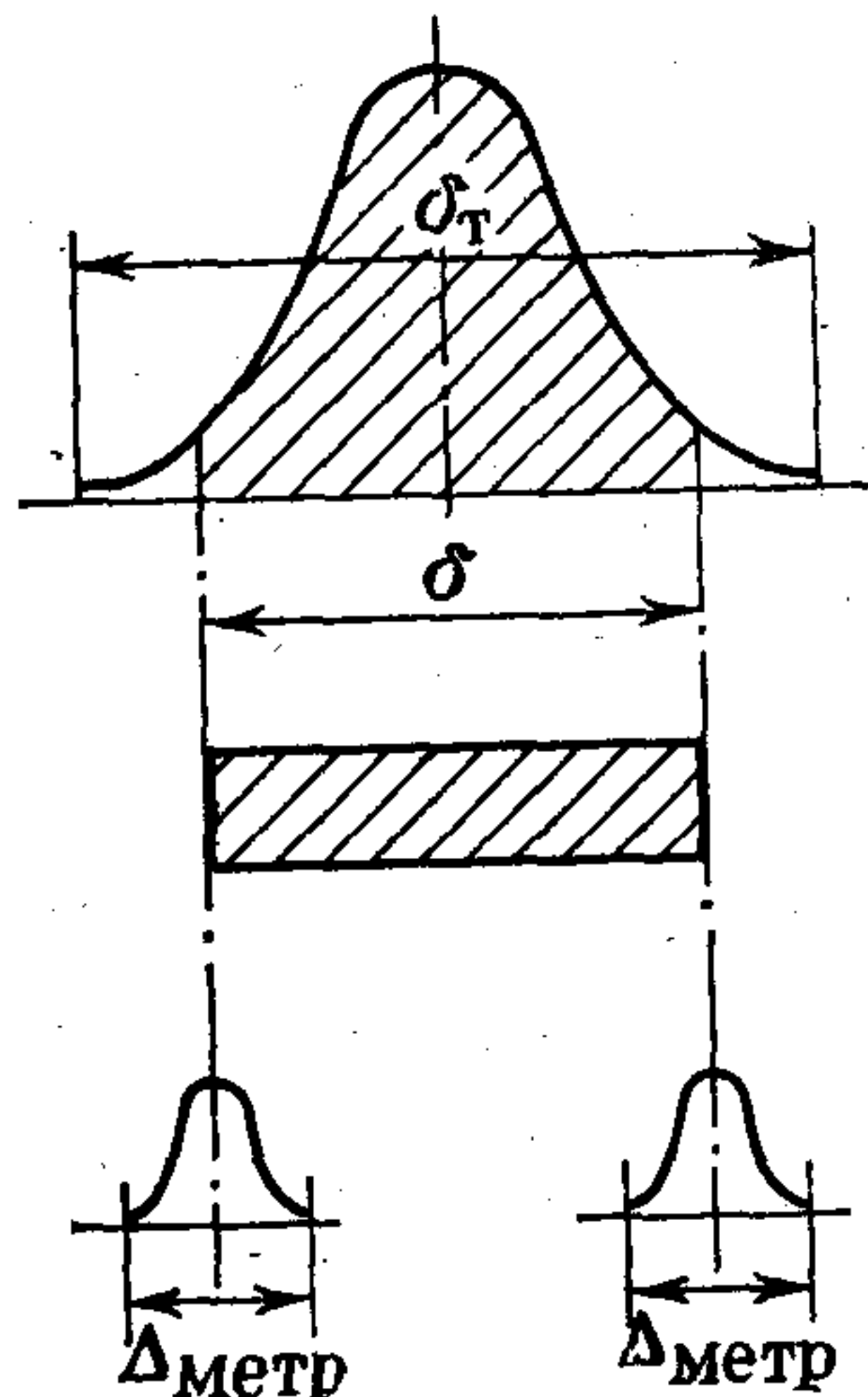
Четвертая ситуация (IV), в противоположность второй, не требует поднастройки, а нуждается только в уменьшении рассеяния. Наконец, последняя пятая ситуация (V) — это «идеальная» модель полного соответствия технического задания и технологических возможностей. Следует помнить, однако, что условно изображенные на рис. 1 кривые распределения размеров отражают некоторое мгновенное, статическое состояние процесса (и соответственно, мгновенную информацию о точности пластмассового изделия); но кривые можно рассматривать и как результат усреднения. В действительности же происходит своеобразный «дрейф» кривых распределения, они даже при идеальной ситуации смещаются, благодаря воздействию систематических (например, при замене формующего гнезда), переменных (например, износ оформляющих поверхностей формующего инструмента), случайных (новая партия материала) факторов.

Кроме того, надо учитывать влияние погрешностей контроля (метрологических погрешностей). Последние, в сочетании с технологическим рассеянием размеров, могут значительно — что особенно важно для размеров повышенной точности — изменять окончательное положение и форму кривой рассеяния. При этом возможно, что некоторую долю негодных изделий принимают и, наоборот, годные бракуют.

Это положение поясним на рис. 2. Если бы метод измерения совершенно не обладал погрешностью, то все действительно бракованные изделия оказались бы забракованными, а все изделия с размерами, не выходящими за пределы поля допуска, были бы признаны годными. Распределение измеренных пластмассовых изделий в таком случае представлено в виде усеченной

* Эта схема поясняет разницу в понятиях «точно» и «прецизионно», используемых особенно часто в иностранной литературе: «точно» применяется при совпадении середины поля рассеяния признака с серединой заданного поля допуска; «прецизионно» — при совпадении поля рассеяния с полем допуска; следовательно, ситуация II может быть охарактеризована как не точная, но прецизионная.

кривой нормального закона распределения (заштрихованная площадь на рис. 2). Реальные погрешности измерения заметно искажают результаты разбраковки на участках кривой распределения, расположенных у границ поля допуска (на рис. 2 кривые распределения метрологической погрешности — внизу). Чтобы изделие с отклонениями размера, выходящими за границу поля допуска (например, на $+5$ мкм), было признано годным, в момент контроля погрешность измерения должна иметь обратный знак и значение большее, чем эти отклонения (например, -6 мкм). Рассматриваемые события оцениваются вероятностным методом [3]. На практике удобно относительную погрешность измерения $A_{\text{метр}}$ оценивать так: $A_{\text{метр}} = \Delta_{\text{метр}}/\delta$.



Приведенные соображения, наряду с другими, делают целесообразным назначение контрольных границ (верхней T_v и нижней T_n) внутри поля допуска (см. рис. 1) и изготовление изделий в этих более узких границах. Такой прием — основа всех методов ста-

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

тистического контроля качества производства, в том числе производства изделий из пластмасс [4].

Продолжая анализ рис. 1, следует отметить, что в любой из приведенных ситуаций, даже в «идеальной», как бы скрываются две «противоположные пружины»: конструкторская и технологическая. Конструктор, как отмечалось, назначает допуск δ , а тенденция развития техники такова, что в целом от этапа к этапу развития повышаются требования, предъявляемые к точности изделий, т. е. ужесточается значение δ . При этом надо помнить, что чем выше требуемая точность, тем больше (гиперболическая зависимость) материальные и трудовые затраты на изготовление изделий (рис. 3), т. е. чем допуск меньше, тем относительная себестоимость изделия $C_{\text{отн}}$ выше. Необходимо учитывать, что кроме затрат на более точное оборудование, формирующий инструмент, контрольно-измерительные приборы, обеспечение меньшего допуска связано с повышенным расходом средств на размерный брак. Возможное число забракованных изделий q увеличивается по мере уменьшения допуска также гиперболически (рис. 3, кривая 2). Особенно большой брак наблюдается на участке $a-b$; и если соответствующий малый допуск изделия обязателен, а технологические резервы данного метода, на-

пример, литья под давлением, исчерпаны и он оказывается неэкономичным, следует либо перейти на другой метод (или способ, прием) изготовления (даже включая механическую обработку), либо пока этот другой технологический метод не разработан (или тоже неэкономичен), искать резервы в организационно-технических мероприятиях (например, для изделий, поступающих на сборку, большие возможности имеет метод селективной сборки). Таким образом, другая — технологическая работа — должна быть направлена на упрощение производства и удешевление продукции. В общем, технолог несет ответственность за обеспечение требований конструктора с минимальными затратами. Но зачастую технологические возможности бывают исчерпаны ранее, чем достигается конструкторское требование. Возникающий конфликт тем острее, чем точнее должно быть изготовлено изделие. Поэтому конструктор и технолог

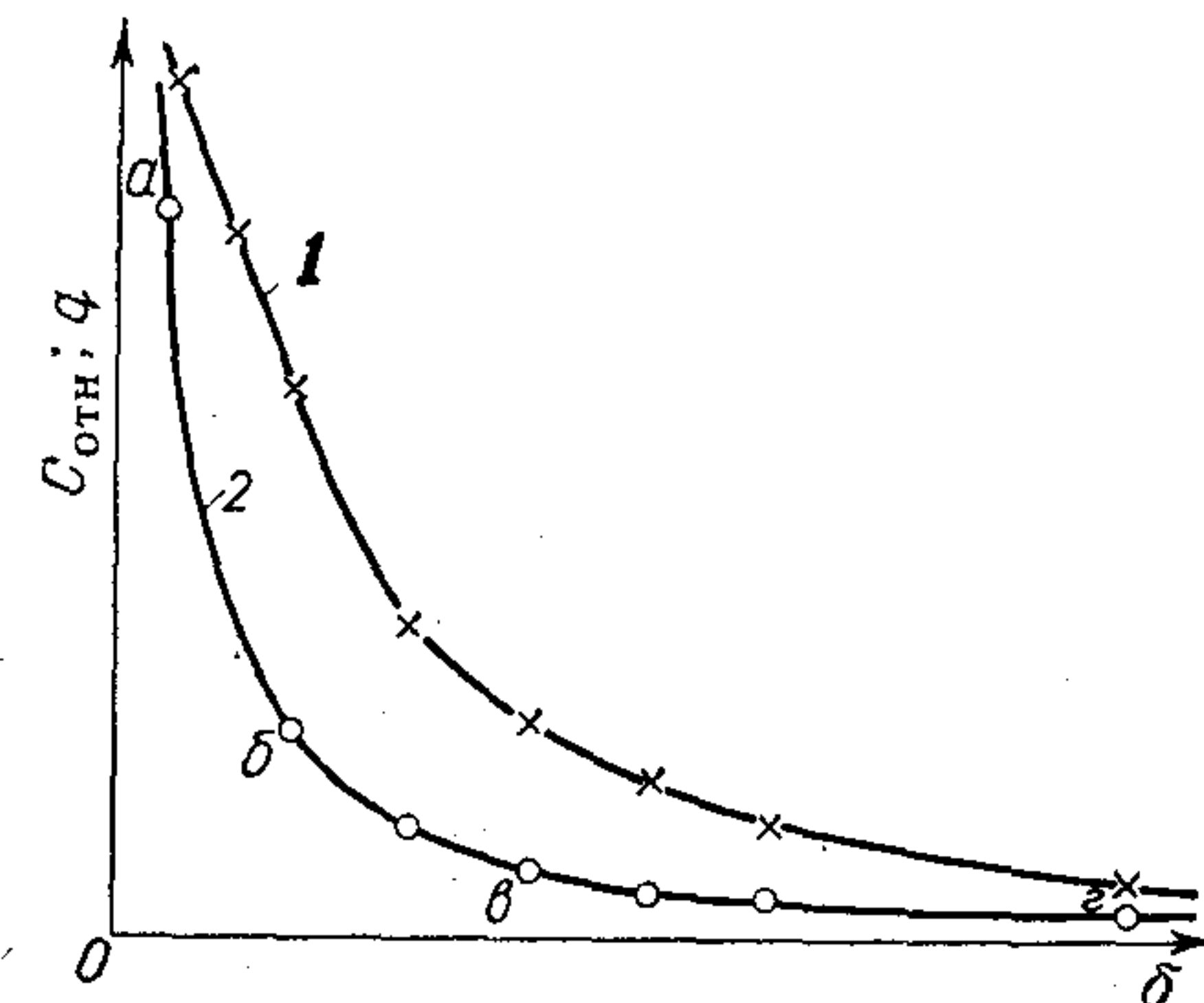


Рис. 3. Обобщенная зависимость относительной себестоимости пластмассовой детали $C_{\text{отн}}$ (1) и возможного количества размерного брака q (2) от величины допуска.

обязаны совместно максимально полно учитывать особенности перерабатываемых пластмасс, конкретные условия производства и т. п. Однако, главным при этом должно быть решение повысить точность изготовления изделий.

Понятие точности изготовления продукции по ГОСТ 16949—71 «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 частности, размерной точности, складывается из поля рассеяния Δ_c , возникающего под влиянием случайных факторов процесса, и алгебраической суммы неустраняемых систематических погрешностей при данном технологическом процессе $\Sigma \Delta_{\text{исист}}$, т. е. $\Delta_{\Sigma} = \Delta_c + \Sigma \Delta_{\text{исист}}$. Величина Δ_{Σ} — это технологическая погрешность. Используя опыт промышленности и результаты соответствующих исследований, можно нормировать величину Δ_{Σ} , устанавливая технологические допуски δ_t , что и было сделано для изделий из пластмасс.

Технологический допуск зависит от материала, метода переработки, применяемого оборудования и формирующего инструмента, режимов переработки и других технологических факторов. Только при непрерывном и надежном регулировании

точности изготовления изделий можно достичь такого положения, когда $\delta_t \approx \Delta_c$. Из отмеченного следует, что технологический допуск отражает достижимую в конкретных условиях точность изготовления. Сравнивая величины δ_t , можно устанавливать уровни экономически достижимой точности при различных способах литья. Технологические допуски указывают на чертежах изделий, используют для расчета припусков перед механической обработкой изделий и для расчета исполнительных размеров формующих элементов литевых форм.

Технологический допуск может быть определен не только по предельным границам поля суммарного рассеяния признака. Другой метод определения по эмпирическому распределению основан на том, что с определенной вероятностью P выбирают значение допуска, например, так, чтобы 0,9973 или 99,73% всех значений искомой величины x_i лежало в пределах $\bar{x} \pm 3\sigma$; $\bar{x}$, σ — соответственно среднеарифметическое значение размера и среднеквадратическое отклонение значений x_i от $\bar{x}$. В общем случае эти пределы равны: $\bar{x} \pm l$ (l зависит от P и разности $1-2\beta$, где β — показатель надежности, или доверительной вероятности; значения l для разных P и β приведены в соответствующих справочных таблицах [5]). Тогда $\delta_t = t_2 - t_1$, где $t_2 = \bar{x} + l$; $t_1 = \bar{x} - l$.

Для практики удобно установить отношение заданного на чертеже допуска δ к технологическому допуску δ_t . Это отношение — технологический запас точности: $K_{т.т.} = \delta/\delta_t$. Если $K_{т.т.} < 1$, то это означает, что технологические возможности не обеспечивают конструктивные требования. При $K_{т.т.} = 1$ заданная точность изготовления выполняется, однако все же надо стремиться, чтобы $K_{т.т.} > 1$ (целесообразно, чтобы $K_{т.т.} = 1,2 \div 1,5$). Тогда создается дополнительный ресурс, обеспечивающий более длительное сохранение заданной точности. Коэффициент $K_{т.т.}$ может быть использован, равно как и величины δ и δ_t , для оценки и сравнения точности изготовления изделий из пластмасс.

Если δ не задан, то возможны два варианта: либо этот допуск не нужен — в случае неотвеченных деталей или изделий типа игрушек, к которым предъявляются в качестве функциональных только, например, эстетические требования; либо априори его было невозможно установить, и теперь величина δ_t послужит основанием для указания на чертеже соответствующего значения δ так, чтобы $\delta \geq \delta_t$.

Таким образом, понятно стремление к максимально возможному сужению (в технико-экономическом плане) поля рассеяния размеров литых изделий из пластмасс и выбор (на этом основании) минимальных технологических допусков, а также необходимость настройки процесса по «средним» параметрам (середине заданного поля допуска размера). Практически для этого надо использовать литевые материалы с минимальными значениями усадки и ее колебаниями. Эти параметры важны, напри-

мер, при расчете исполнительных размеров литевых форм (одно из главных средств «настройки» процесса). С другой стороны, требования минимизации параметров усадки связаны с условиями оптимизации технологического процесса (чтобы он велся оптимально, т. е. с применением таких современных методов и средств, которые позволяют контролировать, регулировать и управлять рассеянием размеров литых деталей из пластмасс. Эти проблемы, как и вопросы нормирования точности (поскольку нормами закрепляется достигнутый современный уровень), рассматриваются в последующих разделах.

Значительные возможности повышения точности литых пластмассовых деталей, как показывает опыт, связаны с конструированием изделий и формующего инструмента. Здесь есть два аспекта: 1) коренное изменение конструкции; 2) модернизация ее.

В обоих случаях от степени технологичности изделия и формующего инструмента зависит уровень остаточных внутренних напряжений, усадочная деформация и точность изделий.

Известны два вида технологичности конструкции: производственная и эксплуатационная (см. ГОСТ 18831—73 «Технологичность конструкции. Термины и определения»).

Технологичность конструкции проявляется в сокращении времени и средств на конструкторскую и технологическую подготовку производства нового изделия, процессы изготовления изделия, организацию и управление процессом производства. Технологичной называют такую конструкцию, которая полностью отвечает предъявляемым требованиям к изделию и может быть изготовлена с применением наиболее экономичных технологических процессов (при принятом типе и масштабе производства).

Эксплуатационная технологичность конструкции изделия проявляется в сокращении затрат (средств и времени) на подготовку изделия к функционированию, на техническое обслуживание и ремонт изделия.

Главные факторы, определяющие технологичность конструкции: вид изделия, объем выпуска, тип производства.

Главные задачи, связанные с обработкой конструкции на технологичность: снижение трудоемкости изготовления изделия, стандартизация и унификация деталей, унификация элементов конструкции (кавалитетов точности, шероховатости поверхностей, размеры отверстий, радиусов закруглений и т. д.), возможность применения типовых технологических процессов изготовления и сборки, контроля, испытаний.

При обработке на технологичность конструкций отдельных деталей необходимо обращать внимание на рациональный выбор конструкторских баз, обеспечивающих возможность их использования и как технологических; однотипность поверхностей, построение рациональных размерных цепей, дающих требуемую точность функциональных параметров; четкую принадлежность конструкции детали к определенной классификационной группе, на представителя которой составляется типовой технологический процесс.

Несмотря на важность отмеченных вопросов, они автором, по существу, не затронуты, равно как и некоторые специальные вопросы точности формы изделий, шероховатости поверхности, точности специальных изделий (типа зубчатых колес) и т. д.

Производственные задачи обеспечения и повышения точности изделий из пластмасс рассматриваются, в первую очередь, в технологическом аспекте.

УСАДКА ЛИТЫХ ИЗДЕЛИЙ

Усадочные свойства пластмасс зависят от их структуры. Анализ структуры и переходов из одного физического состояния в другое позволяет разделить термопласты на три основные группы [6].

I. Аморфные или трудно кристаллизующиеся полимеры с жесткими макромолекулами, максимальная степень кристалличности которых не превышает 25% и температура стеклования T_c значительно превышает комнатную температуру. К этой группе относят нерегулярно построенные карбоцепные полимеры (полистирол, полиметилметакрилат, поливинилхлорид, сополимеры винилхлорида и др.) и гетероцепные (полифениленоксид, полисульфон, поликарбонаты, полиарилаты, полиамиды, например, фенилон и др.) полимеры. При комнатной температуре — это жесткие упругие материалы (полимерные стекла), верхний температурный предел эксплуатации которых ограничен T_c ; литье под давлением осуществляют при температурах выше температуры текучести T_t .

II. Кристаллизующиеся полимеры со средней степенью кристалличности, T_c которых довольно близка к комнатной температуре. К этой группе относят, например, пентапласт. Верхний температурный предел эксплуатации таких полимеров определяется степенью кристалличности и может колебаться от T_c аморфной фазы до температуры плавления $T_{пл}$ кристаллической, а переработка в изделия проводится при температурах выше $T_{пл}$.

III. Кристаллизующиеся полимеры с высокой степенью кристалличности, T_c аморфной фазы которых значительно ниже комнатной температуры. К этой группе относят полиэтилен, полипропилен, политетрафторэтилен, полиформальдегид и др. В нормальных условиях в этих полимерах сочетаются свойства, присущие аморфной фазе, находящейся в эластическом состоянии, и жесткой кристаллической фазе. Верхний температурный предел эксплуатации обычно ограничивается $T_{пл}$. Ниже T_c аморфной фазы полимеры становятся жесткими и хрупкими. Формование изделий литьем осуществляется при температурах выше $T_{пл}$.

В табл. 1 приведены сведения об усадочных свойствах термопластов. К усадочным свойствам условно отнесен и ряд физиче-

Таблица 1

Свойства некоторых термопластов [7]

Группа	Полимер	Удельный объем, см ³ /г		Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^5$, °C ⁻¹	Температура расплава при литье под давлением, °C	Сжимаемость расплава при давлениях до 60 МПа, ж·10 ¹⁰ , Па ⁻¹	Уменьшение линейных размеров при охлаждении до комнатной температуры, %		Технологическая усадка при литье под давлением, %
		при 20 °C	при температуре плавления или стеклования				от температуры плавления или стеклования	от температуры литья под давлением	
I	Полистирол	0,955	0,977	7	210	8	0,75	1,4	0,4—0,6
	Поливинилхлорид	0,715	0,727	7	180	—	0,46	2,3	0,5—1,0
II	Полиамид-6	0,88	1,01	8	240	5	4,2	4,6	0,8—2,0
	Полиамид-6,6	0,87	1,03	8	280	5	5,2	5,5	1,2—2,5
III	Полиэтилен низкой плотности	1,09	1,24	28	210	10,8	4,0	6,2	1,5—3,0
	Полиэтилен высокой плотности	1,035	1,26	20	240	10,4	6,0	7,6	2,5—5,0
	Полипропилен	1,1	1,30	16	240	9,7	5,1	6,4	1,3—3,5
	Полиформальдегид	0,71	0,846	8	205	5,6	5,3	5,7	2,1—3,0

* Методику определения см. стр. 40

ских параметров (удельный объем, температурный коэффициент линейного расширения и сжимаемость), от которых, как будет показано дальше, зависят изменения объема (и усадка) полимеров.

Литьевые реактопласты по сравнению с пресс-материалами должны быть более стабильными. К литьевым фенопластам общего назначения относят материалы марок К-18-24, К-18-28, 015-010-75, 021-210-75. Фенопласты марок К-18-24 и К-18-28 (ТУ 6-05-031-491—73) представляют собой композиции на основе новолачной фенолоформальдегидной смолы № 18, древесной муки и минерального наполнителя с добавками отвердителя, смазки и красителей (указанные марки отличаются составом наполнителя), а марки 015-010-75 и 021-210-75 (ТУ 6-05-231-51—74) являются композициями на основе новолачной фенолоформальдегидной смолы, органического и минерального наполнителя с необходимыми добавками.

Для изготовления деталей с высокими электроизоляционными свойствами и повышенной водостойкостью применяют литьевые фенопласты марок Э 23-121-74 и Э 24-122-02 (ТУ 6-05-231-59—74).

К литьевым материалам с повышенными прочностными свойствами и теплостойкостью относят высокотекучий гранулирован-

ный стекловолокнит марки ВГС-18 (ТУ 6-11-15-423—73) на основе фенолоформальдегидной смолы. Материал ВГС-18 выпускают в виде гранул диаметром около 3 мм. Это обеспечивает хорошую дозировку, высокую текучесть при переработке, значительно снижает запыленность рабочего места.

Усадка литевых реактопластов колеблется в пределах 0,4—0,8%.

УСАДКА ПРИ ЛИТЬЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Термопласты

Усадку термопластов с физической точки зрения разделяют на термическую и структурную. Под термической усадкой понимают уменьшение объема массы при охлаждении, определяемое температурным коэффициентом линейного расширения α и сжимаемостью κ материала. Структурная усадка связана с уменьшением объема при ох-

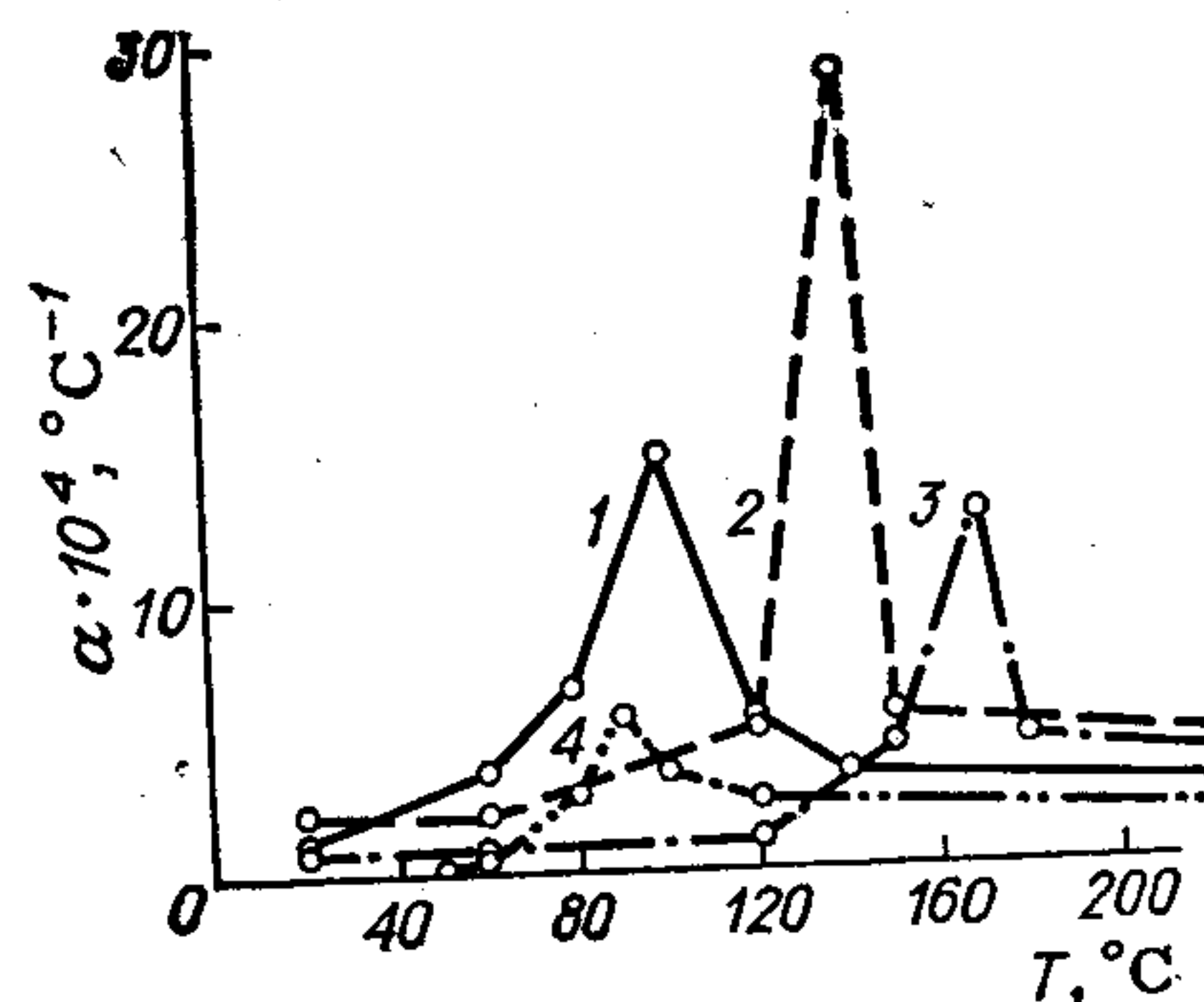


Рис. 4. Зависимость температурных коэффициентов линейного расширения термопластов от температуры при постоянном давлении [9]:

1 — полиэтилен низкой плотности; 2 — полиэтилен высокой плотности; 3 — полипропилен; 4 — полистирол.

лаждении, происходящим в результате преобразования структуры после формования за счет кристаллизации и релаксации ориентированного материала в аморфных областях или во всей отливке (последнее — для аморфных термопластов) [7—9]. Усадочные процессы при литье являются главной причиной последующей усадки отливок, они приводят к внутренним напряжениям. Усадка отливок при нормальных условиях в основном заканчивается через несколько часов после их изготовления.

Термическое расширение и сжимаемость. Возможность приближенного расчета величины усадки как разницы значений температурного коэффициента объемного расширения и сжимаемости полимера рассматривалась И. Ф. Канавцом и Л. Г. Баталовой [10]. Однако эти показатели зависят в значительной степени от состояния и термической предыстории отливок (температуры, давления литья), от точности измерения.

Коэффициент расширения определяется температурой материала, степенью его кристалличности, ориентацией макромолекул и скоростью охлаждения или нагревания. Из-за значительной сложности и многообразия факторов, влияющих на температурные коэффициенты расширения, в настоящее время для большинства термопластов они не определены [11, 12]. Поэтому для практических целей расчет усадки таким способом невозможен.

Экспериментами установлено, что ниже температуры размягчения или кристаллизации значение α относительно мало, в области температур переходов находится характерный пик, а при более высокой температуре α снова уменьшается (рис. 4). Поведение аморфных и кристаллизующихся термопластов резко отличается при температурах перехода, что объясняется образованием мелкозернистой структуры кристаллов.

Обнаружено, что у отливок из полиэтиленов вдоль направления ориентации α больше, чем перпендикулярно этому направлению. При постоянном давлении температурные коэффициенты

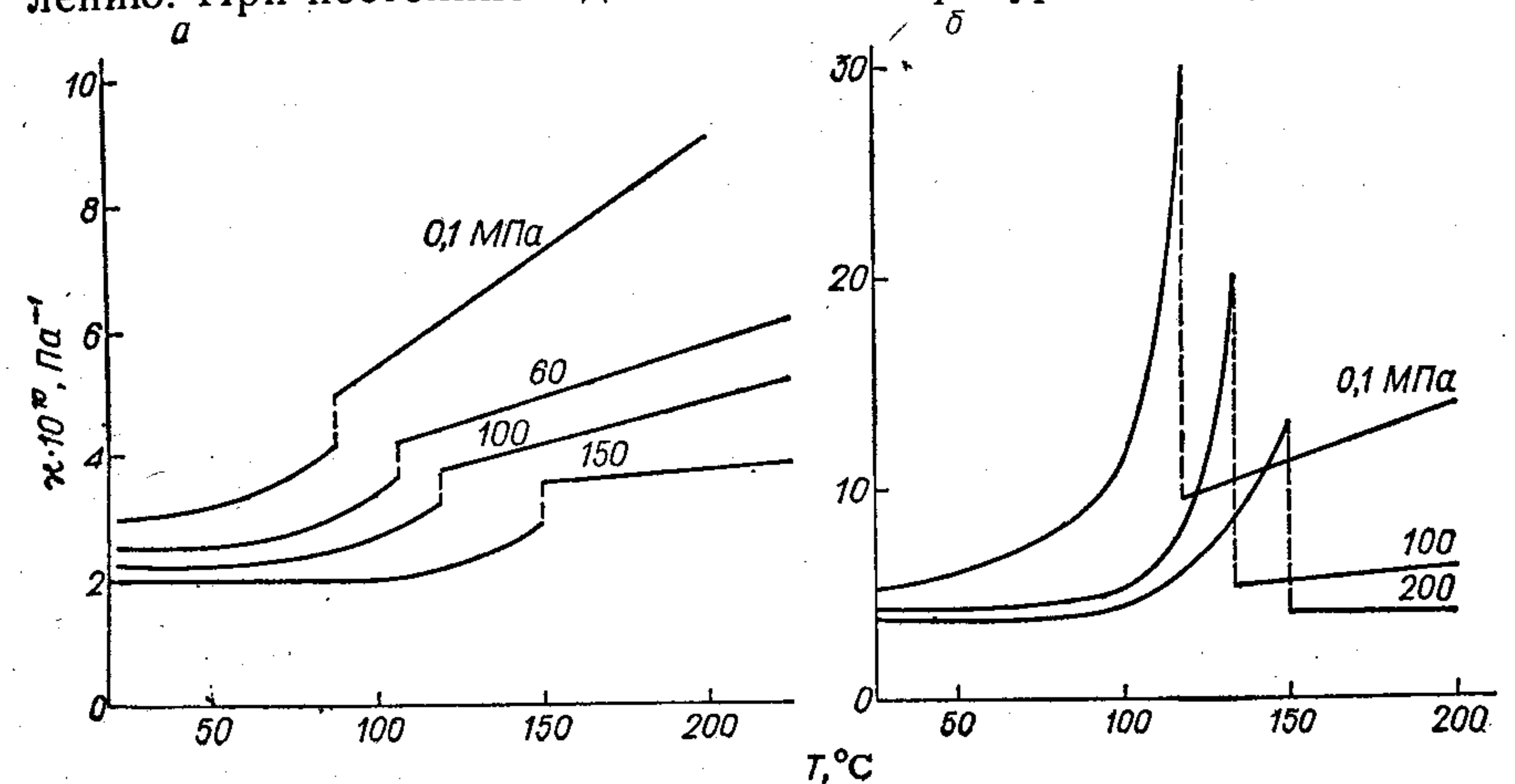


Рис. 5. Зависимость сжимаемости полистирола (а) и полиэтилена (б) от температуры и давления [14].

линейного α и объемного β расширения рассчитывают по формулам [13]:

$$\alpha = \frac{1}{L_0} \left(\frac{\partial L}{\partial T} \right)_p; \quad \beta = \frac{1}{V_0} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p$$

где L_0 и V_0 — исходная длина и объем отливки, L и V — длина и объем отливки при температуре T и давлении p .

В изотермических условиях линейную κ_L и объемную κ_0 сжимаемость термопластов определяют следующим образом [14]:

$$\kappa_L = \frac{1}{L_0} \left(\frac{\partial L}{\partial p} \right)_T; \quad \kappa_0 = \frac{1}{V_0} \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T$$

Сжимаемость зависит от давления, температуры, степени ориентации, внутренних остаточных напряжений и степени кристалличности (или плотности полимера). Эти зависимости различны для аморфных (рис. 5, а) и кристаллизующихся (рис. 5, б) полимеров: характерный скачок при температурах переходов более ярко выражен для кристаллизующихся полимеров. Из рис. 6 видно, что с повышением плотности ρ , иначе — степени кристалличности, уменьшение величины κ с возрастанием давления

будет меньше и потребуются меньшая компенсация усадки с помощью увеличения давления.

Кристаллизация. Кристаллизующиеся термопласты проявляют большую, чем аморфные полимеры, усадку (кристаллы имеют более плотную упаковку макромолекул, обладающую определенным порядком). Кристаллизация сразу не наблюдается, обычно она начинается не при температуре плавления, а ниже ее, после некоторого переохлаждения [15]. Время, необходимое

для появления первых признаков кристаллизации, называется индукционным периодом. Общеизвестная теория кристаллизации (по Мак-Келви) выражается следующим уравнением: $\ln \phi = -kt^n$, где ϕ — часть некристаллизовавшегося материала; t — время, с; k — обобщенная константа скорости кристаллизации; n — параметр, зависящий от природы и скорости роста центров кристаллизации ($n = 1, 2, 3, 4$).

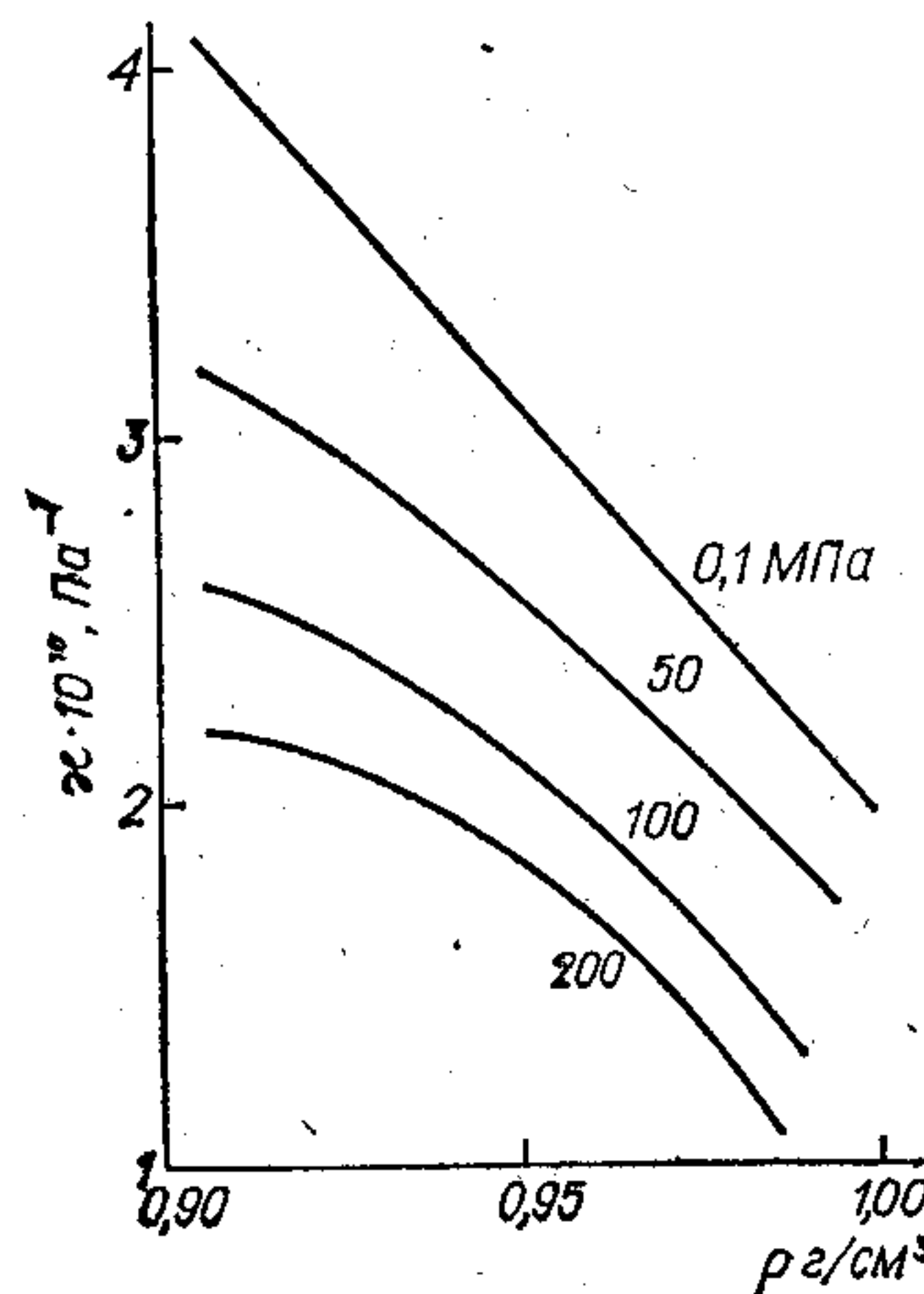


Рис. 6. Зависимость коэффициентов сжимаемости полиэтилена от его плотности (при 20 °С) и давления [14].

Величина ϕ и степень кристаллизации зависят от температуры, что объясняется ростом параметра n до некоторого значения температуры. Обобщенная константа k для многих систем при определенной температуре проходит через максимум. Температуры максимальной скорости кристаллизации находятся в пределах для полиэтиленов 102—120 °С, а для полипропилена 125—170 °С. Нижние и верхние границы интенсивной кристаллизации для полиэтиленов равны соответственно 70 и 130—134 °С, для полипропилена эти же границы равны 80 и 140—170 °С [16].

Образующиеся при литье под давлением надмолекулярные структуры также вызывают значительные изменения объема. На этот процесс влияют молекулярная масса и молекулярно-массовое распределение полимера, степень внутренней упорядоченности полимера перед охлаждением, скорость охлаждения, давление. При низкой скорости охлаждения образуются большие кристаллы и сферолиты, и степень кристаллизации, плотность, остаточные напряжения и усадка отливок оказываются большими [14, 17]. Степень кристаллизации (в отливках может быть до 98% объема кристаллической части) помимо усадки влияет на механические, химические, диэлектрические и другие свойства термопластов. Между степенью кристаллизации и плотностью существует линейная зависимость [18].

Ориентационные и релаксационные эффекты. Во время литья под давлением термопластов при температурах выше темпера-

туры плавления происходит пластическая и эластическая деформации [9]. В последней разделяют энергетическую и энтропийную упругость. Энергетическая упругость проявляется в деформации валентного угла между молекулами в цепи. Энтропийная упругость — это потенциальная энергия, которая создается при ориентации макромолекул. Макромолекулы, как известно, не находятся в термодинамическом равновесии, они стремятся к минимальному содержанию свободной энергии (в соответствующих состояниях) и максимальной энтропии. Этот релаксационный процесс происходит благодаря броуновскому движению макромолекул при достаточно высокой температуре. Энергетический баланс можно представить уравнением [19]:

$$P' \triangleq \left(\frac{\partial F}{\partial L} \right)_{T,V} = \left(\frac{\partial U}{\partial l} \right)_{T,V} - T \left(\frac{\partial S}{\partial l} \right)_{T,V} \quad (1)$$

где P' — сила реакции изменения равновесной структуры молекул (представляет собой обратную силу при перемещении части молекулы на расстояние dl); F — энергия Гельмгольца; U — внутренняя энергия; S — энтропия; T — температура; V — объем молекулы.

Первый член уравнения (1), характеризующий энергетическую упругость в условиях литья под давлением, благодаря большой подвижности молекул во много раз (от 10^2 до 10^3) меньше второго члена (энтропийная упругость), и им можно пренебрегать [20].

Ориентация макромолекул возникает под влиянием напряжения сдвига между молекулами в направлении течения, уменьшая внутреннее сопротивление течению. Степень ориентации тем больше, чем выше вязкость, напряжение сдвига и показатель структурной вязкости. Если энергетическая упругость равна 0, то сила реакции одной молекулы в направлении перемещения при ориентации P' будет равна [20]:

$$P' = \frac{3KTl}{za^2} \quad (2)$$

где K — константа Больцмана; l — перемещение конца макромолекулы цепи при вязкоупругом движении; z — число подвижных элементов макромолекулярной цепи; a — длина молекул.

Для оценки внутреннего напряжения, возникающего при вязкоупругом состоянии расплава вследствие неравновесия, используя теоретическую модель Максвелла, описывающую релаксацию полимерной цепи единичной длины Δl , получают следующее выражение:

$$\sigma_r(t) = \frac{1}{F_r} \sum_{i=1}^n P'_{r-1}(t-t_{\max})_i e^{-t/t_{p,ri}} \quad (3)$$

$$t_{\max} = \frac{\Delta T}{v_{\text{охл}}}; \quad r = \frac{T_p - T_{\text{пом}}}{\Delta T}; \quad r = 1, 2, \dots, s$$

$$S = a \sum_{r=1}^s \sum_{j=1}^m \sigma_{jr} \frac{1}{E_{jr}} \cdot 100$$

где индексы ам — аморфная, кр — кристаллическая часть полимера, k — номер отдельной объемной части.

В случае расплава полимера третий, четвертый и пятый члены приведенных уравнений равны нулю.

Однако применение уравнений (5) и (6) на практике для расчета изменений объема или длины отливок пока нереально из-за отсутствия и сложности экспериментального накопления необходимой информации.

Имеются попытки исследования изменений объемов полимеров в широких диапазонах температур и давлений. Такие эксперименты проводятся при определенных идеальных условиях (т. е. изобарных, изотермических и с образцами, находящимися в термодинамическом равновесном состоянии). Например, в работе [14] получены трехмерные диаграммы $V = f(T, p)$ для полиэтилена низкой и высокой плотности при изотермических условиях ($T = 0 - 200^\circ\text{C}$; $p = 0 - 200$ МПа). Однако для предварительного расчета усадки при литье под давлением эти диаграммы, как и уравнения (5) и (6), пока не имеют практического значения.

Уравнения состояния. Для оценки изменений объема пластмасс в процессе переработки используют уравнение состояния:

$$(p + \pi)(V_0 - b) = RT \quad (7)$$

где p — внешнее давление; V_0 — удельный объем образца; π , b — константы; R — универсальная газовая постоянная.

Уравнение (7) является преобразованным уравнением Ван-дер-Ваальса. Спенсер и Джилмор первыми показали возможность его применения для описания поведения высокомолекулярных полимеров [21]. Они исходили из предположения, что полимерный материал однороден, отличается гомогенной внутренней структурой, при которой объем изменяется только в результате изменения температуры и давления, никакого изменения объема вследствие других внутренних физических или химических процессов не должно быть. Средняя усадка $\bar{S}$ при отмеченных условиях будет равна [21]:

$$\bar{S} = 1 - \sqrt[3]{Y}; \quad Y = \frac{MV_0(p + \pi)}{RT + Mb(p + \pi)} \quad (8)$$

где V_0 — удельный объем полимера при комнатной температуре и атмосферном давлении; M — молекулярная масса.

Исходными данными для определения значений констант уравнения состояния являются сжимаемость как функция от давления $\kappa = f(p)$; объем как функция от температуры $V = f(T)$, а также плотность $\rho = f(p, T)$ или $V = \psi(p, T)$. Подробное описание методики определения значений констант уравнения (8) приводится в работе [9]. Значения констант для разных полимеров, опубликованные в [9, 21, 22], имеют относительно большой разброс.

Константа b отражает физическое состояние полимера и в значительной мере определяется давлением и температурой; константа π — связана с внутренним давлением, вызываемым силами притяжения, действующими между молекулами, и зависит от условий измерения. Это существенный недостаток, мешающий применению уравнения состояния.

Значения констант ниже и выше температуры перехода значительно отличаются друг от друга. Для расчета объемных изменений полимеров нужно знать соответствующие интервалы температуры разных морфологических состояний. Выше отмечалось, что на температуры перехода влияют условия охлаждения или нагревания и точное определение ее затруднительно. Все это, в свою очередь, также мешает практическому использованию уравнения состояния.

Ниже температуры плавления кристаллизующихся полимеров отклонение от линейной закономерности изменения объема по уравнению (7), вызванное образованием кристаллов, оказывается значительным и большим, чем у аморфных. Эти процессы, связанные со стремлением материала к термодинамическому равновесному состоянию, приводят к изменению значений констант, особенно π . При переработке уровни неравновесия системы могут быть весьма различными. Но определение значений констант для всех вероятных вариантов уровней слишком трудоемко.

Уравнение состояния (7) не учитывает таких характерных свойств полимерных материалов, как объемную вязкость, способность к ориентации, релаксации и, главное, влияние фактора времени на изменение объема и размеров отливок. Оно учитывает только объемное или среднее линейное изменение массы. Но в литьевых изделиях усадка в значительной степени зависит от направления течения расплава, а также от характерных параметров процесса литья под давлением, и в этом заключаются дополнительные ограничения применению уравнения состояния (7).

Следовательно, уравнение (7) позволяет вычислять только необходимое уплотнение расплава с целью компенсации термического расширения (термической усадки) [9].

В работе [23] при определении необходимой плотности объема отливки из полиамида, перерабатываемого литьем под давлением, достигнута погрешность между расчетом по уравнению (7) и экспериментом, равная 0,94%. Такая погрешность в определении объема приводит к погрешности размера, равной приблизительно 0,54%. При этом еще не учитывается дальнейшее изменение объема за счет внутреннего переструктурирования, несмотря на постоянную массу. Реальная погрешность такого расчета при определении усадки окажется еще большей, что (учитывая среднее ее значение, равное около 2%) недопустимо.

Предпринимали также попытки использовать эмпирические уравнения, учитывающие нелинейное изменение объема поли-

мера:
по [22]

$$V_0 = [1 + a_1 p + a_2 p^2 + a_3 p^3 + T(b_0 + b_1 p + b_2 p^2 + b_3 p^3) + T^2(c_0 + c_1 p + c_2 p^2 + c_3 p^3)] V'_0 \quad (9)$$

по [24]

$$V_0 = V_{T_1, 0} \{1 + \beta_{T_1, 0} (T - T_1) - [\kappa_{T_1, 0} + \kappa_0 (T - T_1)] p^* \ln(1 + p/p^*)\} \quad (10)$$

по [13]

$$V_0 = V'_0 + [\beta_0 T - (\kappa'_0/a') (1 + b'T) \ln(1 + a'p)] V'_0 \quad (11)$$

где V_0 — удельный объем полимера при давлении p и температуре T ; V'_0 — удельный объем полимера при 0,1 МПа и 0°C; $V_{T_1, 0}$ — удельный объем полимера при 0,1 МПа и температуре T_1 ($T_1 < T$); β_0 и $\beta_{T_1, 0}$ — температурные коэффициенты объемного расширения при 0°C и температуре T_1 соответственно; κ_0 и $\kappa_{T_1, 0}$ — сжимаемость при 0°C и температуре T_1 соответственно; $a_1, \dots, a_3, b_1, \dots, b_3, c_1, \dots, c_3, a', b', \kappa'_0, p^*$ — константы.

Константы подобных уравнений зависят от реальных условий проведения процесса литья под давлением.

Уравнения (9) — (10) используют лишь для теоретического анализа объемных изменений, а не для практических целей расчета усадки термопластов.

Технологические факторы. Закономерности возникновения и протекания усадочных процессов при переработке связаны с энергетическим состоянием полимерных материалов, зависящим от двух основных факторов: температуры и деформации. Чем точнее сведения об изменении энергии материала как функции времени и места в ходе процесса, тем ближе к разрешению важная практическая проблема получения точных пластмассовых изделий [9].

Энергетический баланс процесса литья под давлением, описываемый в соответствии с законами термодинамики, схематически можно представить (при условии, что масса впрыскиваемого материала постоянна, т. е. $m = \text{const}$) рядом зависимостей:

1) исходное состояние (энергия Гиббса Z_1 — минимальна)

$$E_1 = U_1$$

$$S_1 = U_1/T_1 \approx S_{\text{равн}} = S_{\text{макс}}$$

2) изобарное нагревание (энергия Гиббса Z_2 — минимальна)

$$E_2 = E_1 + Q_H = U_2 + Ip_1(V_2 - V_1)$$

$$S_2 = \frac{U_2 + Ip_1(V_2 - V_1)}{T_2} \approx S_{\text{равн}} = S_{\text{макс}}$$

3) изотермическое уплотнение и впрыск

$$E_3 = U_2 + Ip_2(V_3 - V_2) + Imv^2/2g$$

$$S_3 = \frac{U_2 + Ip_2(V_3 - V_2) + Imv^2/2g - Z_3}{T_2}$$

4) охлаждение

$$E_4 = E_3 - Q_{\text{охл}}$$

5) конечное состояние (энергия Гиббса $Z_5 \gg 0$)

$$E_5 = U_1 + Z_5$$

$$S_5 = (E_5 - Z_5)/T_1 \neq S_{\text{равн}}$$

где E — содержание свободной энергии в соответствующих состояниях; I — переводной коэффициент между работой и теплотой; p и V — давление и объем, занимаемый полимером в соответствующем состоянии; T — температура полимера; U — внутренняя энергия; S — энтропия; Q — количество теплоты; m — масса впрыскиваемого материала; g — ускорение свободного падения; $S_{\text{макс}}$ — максимальная энтропия; $S_{\text{равн}}$ — энтропия, соответствующая равновесию; v — скорость течения расплава.

Сравнивая исходное и конечное состояния, получим:

$$U_1 = U_5; \quad T_1 = T_5; \quad S_1 > S_5; \quad Z_1 < Z_5 \quad (12)$$

Условия (12) полностью определяют все трансформации в полимерах, обуславливающие усадочные процессы. Однако для реальных деталей количественную оценку энергетического баланса литья под давлением дать пока возможно лишь в общем, учитывая, что разница энергетических уровней объясняется состоянием термодинамического неравновесия, а вся система стремится к уменьшению энергии, характеризуемой величиной P по уравнению (1).

Остается путь качественного анализа отдельных этапов процесса, выяснения доминирующих факторов влияния и оценка этого влияния соответствующими методами. Рассмотрим вкратце эти отдельные этапы.

Пластфикация заключается в размягчении сырья, гомогенизации массы и доведении материала до состояния, при котором он может заполнить форму. Качество пластфикации зависит от однородности температуры расплава по всем направлениям. Однородность и степень пластфикации, в свою очередь, существенно влияют на режим работы литьевой машины, а также на усадку материала и ее колебание.

В работах, например [9, 22], приводятся уравнения, описывающие процесс пластфикации в современных литьевых машинах (для расчета количества теплоты, образующейся при трении расплава о витки шнека и цилиндра, теплового потока с поверхности гранул, теплообмена между горячим цилиндром и расплавом и т. д.). Однако точный расчет для нестационарных условий пока невозможен. Препятствием к использованию уравнений теплообмена является и отсутствие точных значений вязкости, удельной теплоемкости и плотности полимера (при конкретных

условиях пластикации). Расчет конвекции при пластикации полимеров вообще пока невозможен, потому что современная теория конвекции пренебрегает неньютоновским течением, внутренним нагреванием и неизотермическими условиями [22]. Несмотря на эти объективные затруднения, установлено, что изменение и неоднородность свойств и размеров гранул ведут к колебаниям температуры расплава, следовательно, изменяется и однородность массы; с увеличением частоты вращения шнека увеличится внутреннее трение и, таким образом, однородность температуры расплава [9].

Заполнение формы разделяют на две фазы: впрыск и уплотнение, имеющие большое значение для протекания усадочных процессов при литье, но влияние их принципиально различно.

Основная цель впрыска — обеспечение затекания расплава в относительно холодную форму. На это влияют текучесть расплава и его давление перед литниковым каналом. Для характеристики впрыска используют время впрыска. Текучесть расплава является функцией его температуры и скорости сдвига. Температура может изменяться во время впрыска (при передвижении больших масс). Давление зависит от геометрических особенностей полости формы и литниковой системы. В общем, впрыск расплава представляет собой нестационарный и неизотермический процесс. Течение расплава полимеров (неньютоновских жидкостей) описывается, как правило, степенным законом: $\dot{\gamma} = (1/\eta)\tau^m$, где $\dot{\gamma}$ — скорость сдвига; η — вязкость; τ — напряжение сдвига; m — индекс текучести. Из этого закона получены для различных форм поперечного сечения каналов уравнения для оценки скоростей и напряжений сдвига. Эти уравнения косвенно определяют влияние ориентации материала, а она — одна из главных причин усадки. Напряжение и скорость сдвига способствуют усадке вдоль направления течения расплава.

Необходимое давление для впрыска или потери давления Δp при впрыске зависят от сопротивления течению расплава:

$$\Delta p = \frac{12\eta QL}{BH^3} \frac{1}{f} \quad (13)$$

где η — вязкость расплава; Q — временной расход (объем расплава, проходящий через сечение литникового канала в единицу времени), см³/с; h — длина канала; B и H — размер большой и малой сторон сечения канала; f — коэффициент течения (зависит от формы сечения: для квадрата 0,4217; круга $12\pi/128$; полукруга 0,447).

Потери давления при впрыске (из-за охлаждения расплава) являются своеобразным критерием для установления максимально достигаемого давления расплава при дальнейшем уплотнении: небольшая площадь сечения, высокая вязкость и большая длина течения увеличивают (из-за большой потери давления) часть усадки, возникающую за счет расширения или сжимаемо-

сти расплава. При политропных условиях в форме при впрыске заметную роль играет теплообмен. Из-за него быстро возрастает η , и Δp параболически увеличивается с длиной течения. Поэтому элементы одной отливки, удаленные от литника, имеют большую усадку, чем те, которые ближе к нему (то же характерно для разных отливок в многогнездных формах).

Вязкость расплава влияет на ориентационные и релаксационные процессы, т. е. на степень ориентации, на давление уплотнения и его распределение, а отсюда и на усадку. Низкая температура и большая молекулярная масса увеличивают усадку вдоль направления течения (повышаются η и τ) и снижают ее в перпендикулярном направлении (образец немного набухает). При низкой вязкости уменьшается степень ориентации, повышается максимальное давление уплотнения расплава и его распределение становится более однородным и, таким образом, снижается усадка и ее колебания.

Свойства полимеров, влияющие на текучесть расплавов, тоже влияют на усадку.

При более широком распределении молекулярной массы вязкость уменьшается с возрастанием скорости сдвига, но при этом увеличивается усадка и, прежде всего, анизотропия усадки [25]. Видимо, та часть полимера, которая обладает большей молекулярной массой, несмотря на меньшую общую вязкость расплава, вызывает частичную, но значительную ориентацию без соответствующей релаксации.

Время впрыска (от начала перемещения шнека до переключения к подпитке, поджатию) зависит от режима, конфигурации литьевой системы и формы отливки. Оптимально состояние расплава должно быть одинаковое до и после впрыска; практически наблюдается некоторое охлаждение расплава, а при слишком большой нагрузке возможна и деструкция полимера [26].

Влияние впрыска на усадку легко проанализировать по температурному балансу:

$$T = T_{\text{пласт}} + \Delta T_{\text{тр}} + \Delta T_{\text{раб}} - \Delta T_{\text{охл}} - \Delta T_{\text{р}}$$

где $T_{\text{пласт}}$ — температура расплава после пластикации; $\Delta T_{\text{тр}}$ — изменение температуры вследствие внутреннего трения; $\Delta T_{\text{раб}}$ — изменение температуры, связанное с уменьшением объема расплава; $\Delta T_{\text{охл}}$ — изменение температуры из-за охлаждения расплава по пути течения; $\Delta T_{\text{р}}$ — изменение температуры вследствие расширения расплава (при перепаде давления).

Слишком большое время впрыска ведет к охлаждению расплава, возрастанию η и степени ориентации. В результате получается большая продольная усадка. Кроме того, происходит увеличение потерь давления. Эти потери вызывают меньшее уплотнение массы и, следовательно, увеличивают объемную усадку. Большую роль играет температура расплава: чем она выше, тем меньше будет из-за достаточно низкой вязкости влияние

времени впрыска на усадку [27]. Наоборот, с уменьшением времени впрыска асимптотически снижается продольная усадка.

Время впрыска влияет на колебание усадки: чем оно меньше, тем колебания усадки больше: вероятно, образуется свободная струя при большой скорости впрыска и нерегулярном заполнении. Неоднородность пластикации вызывает колебания времени впрыска и соответственно усадки.

Процесс заполнения формы очень важен с точки зрения усадки. Точное знание условий заполнения позволило бы не только математически описать процесс, но и применять измеренную усадку одной конфигурации отливок для оценки усадки других конфигураций [28]. Характер заполнения формы влияет на усадочный процесс. Различают заполнение полости формы струей и фронтом. Первое происходит при слишком низкой вязкости расплава, большой скорости сдвига и малой площади

впускного канала. Образование струи ведет к неравномерному заполнению формы, ухудшению качества изделия, в том числе увеличивается усадка и ее колебание. Заполнение фронтом бо-

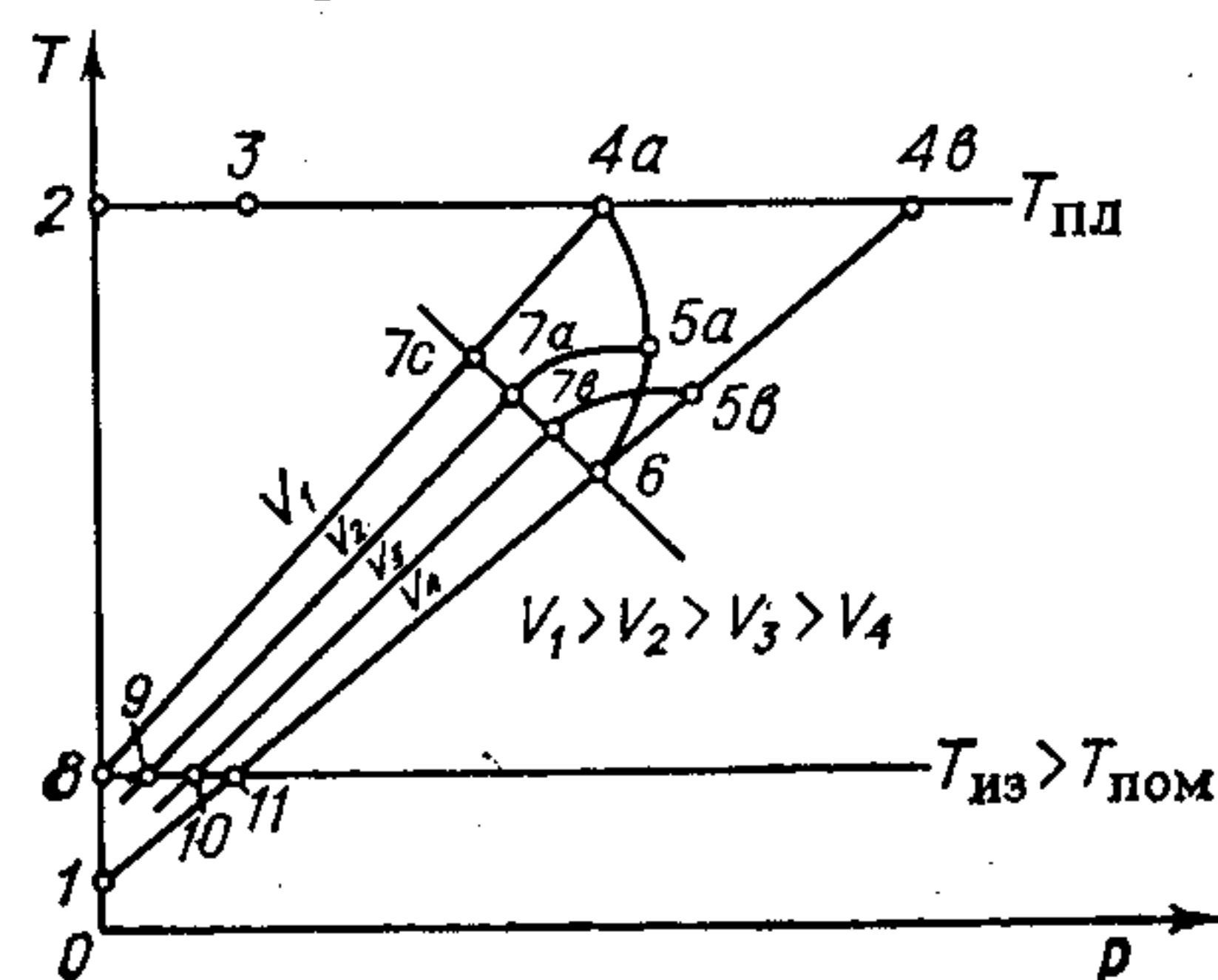


Рис. 8. Схематическая диаграмма уплотнения термопластов при литье под давлением.

лее оптимально, особенно для расплавов, гомогенных по вязкости и температуре. При этом менее вероятно наступление деформации, и наблюдается относительно небольшое колебание усадки. Если температура неоднородна и понижена, то усадка колеблется больше, хотя масса отливок практически сохраняется постоянной [28]. Соответственно изменению скорости сдвига, вязкости, температуры и давления расплава во время заполнения формы в отливке образуются места с разной структурой и свойствами, что является причиной колебания усадки. Варьируя временем впрыска, можно не только регулировать процесс заполнения, но также устранять или уменьшать колебание усадки. Из-за упомянутых выше причин в многогнездных формах обычно колебания усадки больше, потому что условия заполнения изменяются от гнезда к гнезду и во времени [29].

Уплотнение имеет большое значение для обеспечения качества отливки. Давление поджатия, время выдержки под давлением и температура расплава при этом определяют окончательную плотность отливки, которая обратно пропорциональна усадке.

Ход процесса уплотнения кристаллизующихся термопластов схематически представил, используя [9], У. Зайферт с помощью диаграммы $p-T$ (рис. 8). Точки 1, 2 и 3 последовательно пока-

зывают стадии пластикации при температуре $T_{пл}$, впрыска и частичного сжатия, после которого уже существует некоторое давление на расплав в полости формы. Окончательное давление после уплотнения соответствует точке 4а. Если затем отливка охлаждается без поджатия, то при извлечении в форме нет остаточного давления (точка 8). Но полученная величина удельного объема V_1 не может компенсировать температурную усадку. На практике применяют более высокое давление впрыска, соответствующее, например, точке 4в, после которого шнек литевой машины находится в переднем крайнем положении и он не поджат. Если же работают с поджатием, то шнек некоторое время после впрыска под давлением добавляет расплав в форму (из точки 4а в точку 5а).

Если время выдержки под давлением или время пребывания шнека в переднем крайнем положении больше времени затвердевания литника (точка 6), то удельный объем изделия V_4 будет очень небольшим; температурную и структурную усадку в большей степени можно компенсировать, а в результате общая усадка уменьшится. Полностью, правда, это осуществить невозможно (и, прежде всего, у кристаллизующихся полимеров), потому, что остаточное давление (точка 11) в форме (при температуре извлечения $T_{из}$ большей температуры помещения $T_{пом}$) мешает извлечению отливки и способствует ее деформированию. Компромиссное решение получают, если время выдержки под давлением (точка 5а), время пребывания шнека в переднем крайнем положении (точка 5в), меньше времени затвердевания литника (соответственно точки 7а и 7в). После отхода шнека происходит утечка из формы некоторого количества расплава, удельные объемы V_2 , V_3 увеличатся, а остаточные давления уменьшатся (точки 9, 10). Компенсация температурной и структурной усадок будет меньше, но облегчается извлечение отливок из формы.

Граница охлаждения после затвердевания литника (на рис. 8 проведена по точкам *б*, *7а*, *7в*, *7с*) у кристаллизующихся полимеров в действительности нелинейна из-за нелинейного изменения объема.

Условия уплотнения в общем можно описать двумя уравнениями (7) и (13), последнее — выраженное через $\dot{Q} = f(t_{\text{выд}})$. Уравнение (7) показывает влияние давления. Удельный объем отливок обратно пропорционален давлению, т. е. с повышением давления усадка уменьшается. Предельное давление обычно соответствует максимальной упаковке молекул, но его не удастся достигнуть из-за особенностей литьевых машин. Слишком большие давления впрыска и уплотнение отливок приводят к высоким значениям внутренних напряжений и к значительному колебанию усадки. Многими исследователями доказано, что при определенном давлении (в зависимости от изделия и формы, диаметра литника) существует минимум величины колебания усадки ΔS . В работе [30] механизм этого влияния связывают не

с внутренними напряжениями, а с затвердеванием. Однако точный механизм действия давления на колебания усадки мало изучен, а известные результаты противоречивы.

Неравномерная дозировка, которая характерна для современных литевых машин (выполняется ходом шнека), может вызывать неточность размеров изделия. При этом слишком большая или малая доза расплава влияет на S и ΔS так же, как и высокое или низкое давление, потому что масса отливок пропорциональна давлению.

Однако если ΔS зависит в большей степени от внутренних напряжений, а не от колебания массы, то отмеченная пропорциональность отходит на второй план. В работе [31] приводится как общее правило: колебанию массы от 0,1 до 0,5% соответствуют ΔS от 0,05 до 0,15%. Из-за уплотнения отливок, полученных на поршневых машинах, ΔS больше, чем у отливок, полученных на шнековых машинах.

По уравнению (7) прослеживают и влияние температуры при уплотнении, но оно в действительности сложнее. Согласно уравнению, температура пропорциональна удельному объему, т. е. с ее повышением плотность отливки уменьшается и усадка возрастает. С другой стороны, одновременно снижается перепад давления, масса будет уплотнена больше и уменьшится остаточная ориентация. Кроме того, высокая температура увеличит структурную усадку. Следовательно, в зависимости от конкретных условий процесса литья под давлением температура расплава может повышать, снижать или вообще не влиять на усадку. Это также подтверждено данными исследований разных авторов. Для тонкостенных изделий, где перепад давления и ориентация доминируют, обычно увеличение температуры улучшает уплотнение и обеспечивает релаксацию до окончания поджатия и тем самым уменьшает усадку [32]. Колебание усадки при литье под давлением снижается с повышением температуры в производственных условиях, так как более высокая температура способствует большей однородности расплава.

Уравнение (13) позволяет косвенно оценить влияние времени выдержки под давлением $t_{\text{выд}}$. С возрастанием его до времени затвердевания литника увеличится масса и плотность отливки, а усадка уменьшится. Минимально и максимально возможные времена выдержки под давлением зависят от размеров литника и толщины изделия [33]. Пока еще нет достаточного уплотнения, с увеличением $t_{\text{выд}}$ ΔS несколько снижается [30], однако в дальнейшем возрастает колебание усадки, а поджатие после затвердевания литника вызывает значительные внутренние напряжения в отливке. Кроме того, возникает нежелательная ориентация по всему сечению отливки [9]. Степень ориентации пропорциональна времени выдержки под давлением прежде всего для тонкостенных изделий. У толстостенных изделий время выдержки под давлением может способствовать процессу релаксации и уменьшать ориентацию.

Охлаждение охватывает время от начала впрыска до охлаждения отливки до температуры помещения. Главные факторы, влияющие на охлаждение отливки, — температуры расплава и формы, скорость, время охлаждения и форма отливки. Чтобы предотвратить либо утечку массы, либо создание чрезмерного напряжения при поджатии (через уже почти остывший литник) нужно знать время затвердевания материала в литниковой системе. Пока его определяют эмпирически для конкретных производственных условий. Установлено, что расплав должен застыть к тому моменту, когда отливка затвердевает на $2/3$ толщины [34]. Имеется уравнение для расчета времени затвердевания литника в зависимости от температур расплава и формы и толщины изделия. Для реальных производственных условий оно дает весьма приближенный результат. Предлагают и другие методы расчета, например, для определения давления и температуры при затвердевании литника [35]. Но и эти методы обладают рядом ограничений, часто существенных с точки зрения точности результатов.

В охлаждаемой отливке трехмерное распределение температуры и нестационарный теплообмен. Происходят следующие тепловые процессы: теплопередача в отливке и форме; передача теплоты от отливки к стенке формы и от формы к охлаждающей среде; отвод теплоты охлаждающей средой.

Расчетное уравнение для оценки времени охлаждения учитывает только одномерное (по оси x) распределение температур [36]. Такое упрощение часто приемлемо, так как при небольшой толщине стенок отливок преобладает процесс охлаждения только в одном направлении. Кроме того, уравнение «работает» при выполнении следующих исходных условий (допущений): 1) заполнение формы — изотермический процесс; 2) температуру расплава можно измерить или она заранее известна; 3) температура поверхности формы равна температуре охлаждающей среды; 4) отливка при охлаждении постоянно касается стенки формы; 5) можно пренебречь теплообменом по осям y и z и зависимостью $\alpha = f(T)$.

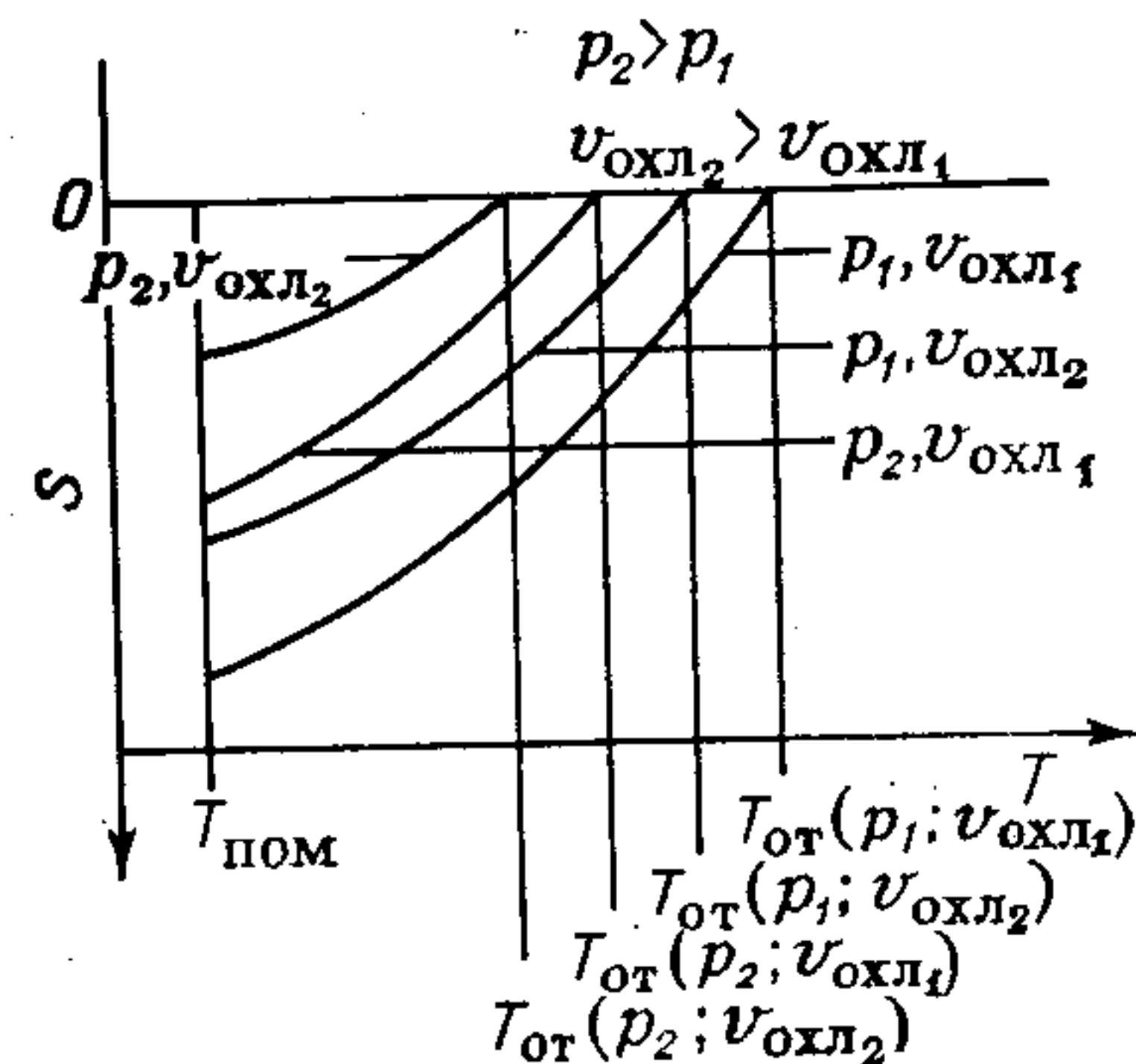
В действительности заполнение формы не является изотермическим процессом, а температура поверхности формы на 30—50°C превышает температуру охлаждающей среды. У кристаллизующихся полимеров большая усадка приводит при охлаждении к относительно раннему отрыву отливки от стенок формы; допущение, что возможно пренебречь зависимостью $\alpha = f(T)$, по существу, неприемлемо. Таким образом, расчетные зависимости (например, для оценки времени охлаждения полимерной пластины [37]):

$$t_{\text{охл}} = \frac{h^2}{\pi^2 a} \ln \left[\frac{4}{\pi} \left(\frac{T_p - T_{\text{ф}}}{T_{\text{из}} - T_{\text{ф}}} \right) \right]$$

где h — толщина пластины; a — температуропроводность; T_p , $T_{\text{ф}}$ и $T_{\text{из}}$ — температуры расплава, стенки формы и извлечения

отливки соответственно дают возможность анализировать процесс в качественном плане, а количественные результаты, как правило, нуждаются в дополнительной корректировке в период производственных испытаний.

В точном соответствии с двумя стадиями охлаждения отливки — в форме и вне ее — происходит и усадка. Первая стадия усадки начинается при впрыске и заканчивается извлечением отливки из формы. В зависимости от типа полимера, конструкции изделия и особенностей литьевой машины усадку на этой стадии можно частично (иногда — значительно) компенсировать уплотнением. Исключение составляют, как правило, кристаллизующиеся полимеры, для компенсации усадки которых



нужно очень большое давление (особенно для литья тонкостенных изделий), тогда как у толстостенных отливок степень кристаллизации гораздо больше, что увеличивает, в свою очередь, необходимое давление уплотнения.

Рис. 9. Изменение усадки отливки из кристаллизующихся термопластов при охлаждении.

Вторая стадия усадки происходит при температуре помещения. Эту часть усадки отливки определяют: разница температур отливки и помещения, некоторая остаточная кристаллизация и релаксация полимера. Установлено, что усадка при температурах в диапазоне от 2 до 80 °C и ниже температуры теплостойкости для всех полимеров уже незначительна, а кристаллизация полиэтилена или полипропилена ниже 70—80 °C — неинтенсивна [10, 16].

На этой второй стадии усадочного процесса создаются условия для проявления в дальнейшем последующей усадки. Она составляет, например, для полиэтилена высокой плотности величину 0,2—0,3% от общей усадки и 90% этой доли заканчивается, как отмечалось в начале данного раздела, через 10 ч после извлечения отливки, остальные 10% приблизительно через 10 дней [12].

Изменение ΔS отливки из полиэтилена при охлаждении схематично представлено на рис. 9.

До температуры отрыва отливки от стенки формы $T_{от}$ усадка компенсируется уплотнением расплава. Большое давление снижает $T_{от}$ и этим улучшает возможности охлаждения формы, снижает усадку. Высокая скорость схлаждения $v_{охл}$, как отмечалось, затрудняет кристаллизацию и релаксационные процессы, и этим уменьшает усадку. Из рис. 9 видно, что с увели-

чением $v_{охл}$ отливка отрывается от стенки формы при более низкой температуре, что способствует охлаждению. Дальнейшая усадочная деформация отливки будет меньше из-за падения подвижности макромолекул. Одновременно понижается степень кристаллизации и затрудняются релаксационные процессы, что, в свою очередь, снижает усадку. Но большая скорость охлаждения увеличивает анизотропию усадки, потому что увеличивается ориентация вдоль направления течения расплава при заполнении, а релаксация ориентации вызывает большую продольную усадку по сравнению с поперечной усадкой [7, 9, 32].

Извлечение отливок при более высокой температуре, а также уменьшение времени охлаждения обычно вызывает увеличение усадки и ее колебания из-за большего градиента температур [31]. С позиций достижения максимально высокой точности размеров отливки такие мероприятия не рациональны. Они применимы, когда решение склоняется в пользу производительности, и можно поступиться небольшим увеличением ΔS .

Упрощенно действительную усадку S_d можно найти из выражения: $S_d = adL \cdot 100$, где коэффициент $a < 1$.

Можно отметить, что a уменьшается с повышением скорости охлаждения, с увеличением толщины стенки, сложности и площади наружной поверхности отливки, числа знаков в форме; независимого эталона для его вычисления нет.

Затруднения в протекании усадочных процессов на реальных отливках существуют всегда, потому что время релаксации полимера для выравнивания его энергетического состояния при обычных условиях охлаждения отливок слишком большое по сравнению со временем пребывания отливок при данной температуре. Теоретически только очень малая скорость охлаждения простой отливки, например бруска небольшого размера, могла бы дать $a = 1,0$.

Конструктивные факторы. Существенно влияет на качество отливки, в том числе на усадку и точность ее, конструкция литниковой системы. Конфигурация, размеры сечения и длина литника влияют, как и технологические факторы, на перепад давления, повышение температуры расплава за счет внутреннего трения, ориентацию, текучесть расплава при заполнении формы, скорость и напряжение сдвига. Установлены следующие общие требования к литниковой системе, способствующие возникновению минимальной усадки: по возможности должны быть наименьшими потери давления в литниковой системе; отношение площади поверхности литников к их объему; ориентация расплава после прохождения литниковой системы. Эти требования противоречивы и в каждом конкретном случае выполняются компромиссно.

Точечный литник, например, благодаря турбулизации потока снижает ориентацию, вызывая дополнительное нагревание расплава. В результате анизотропия усадки падает, хотя абсолютное значение общей усадки возрастает (перепад давления

большой, а поджатие кратковременно, так как быстро затвердевает впускной литник).

Обычный цилиндрический литник с большой площадью поперечного сечения способствует обратному: перепад давления будет меньше и поджатие продолжительнее, а большая ориентация увеличит анизотропию усадки, хотя отдельные ее значения (вдоль и поперек сечения) будут меньше, чем при точечном литнике [7, 32].

Щелевой литник особенно активно способствует продольной ориентации, поэтому анизотропия усадки будет большой.

Конструкция отливок влияет на уровень всех факторов, от которых зависит усадка, а именно: уплотнение и температуру расплава, ориентацию и релаксацию полимера, скорость охлаждения отливки, степень затрудненности усадочной деформации. Толщина стенок отливки, разнотолщинность, разница в значениях площади поперечного сечения формирующей полости по длине течения расплава существенно влияют на усадочную деформацию отливок. Простые, небольшие и симметричные отливки при прочих равных условиях имеют меньшие значения S и ΔS . В больших, сложной формы отливках усадка затрудняется и возникают дополнительные внутренние напряжения и коробление. У отливок с тонкими стенками усадка ниже, так как скорость охлаждения больше. Анизотропия усадки, наоборот, возрастает, потому что ориентация проявляется в большей степени. У отливок с толстыми стенками анизотропия усадки меньше, а усадка выше. В этом случае проявляются ориентационные процессы. Одновременно снижение внутренних напряжений при медленном охлаждении уменьшает колебание усадки.

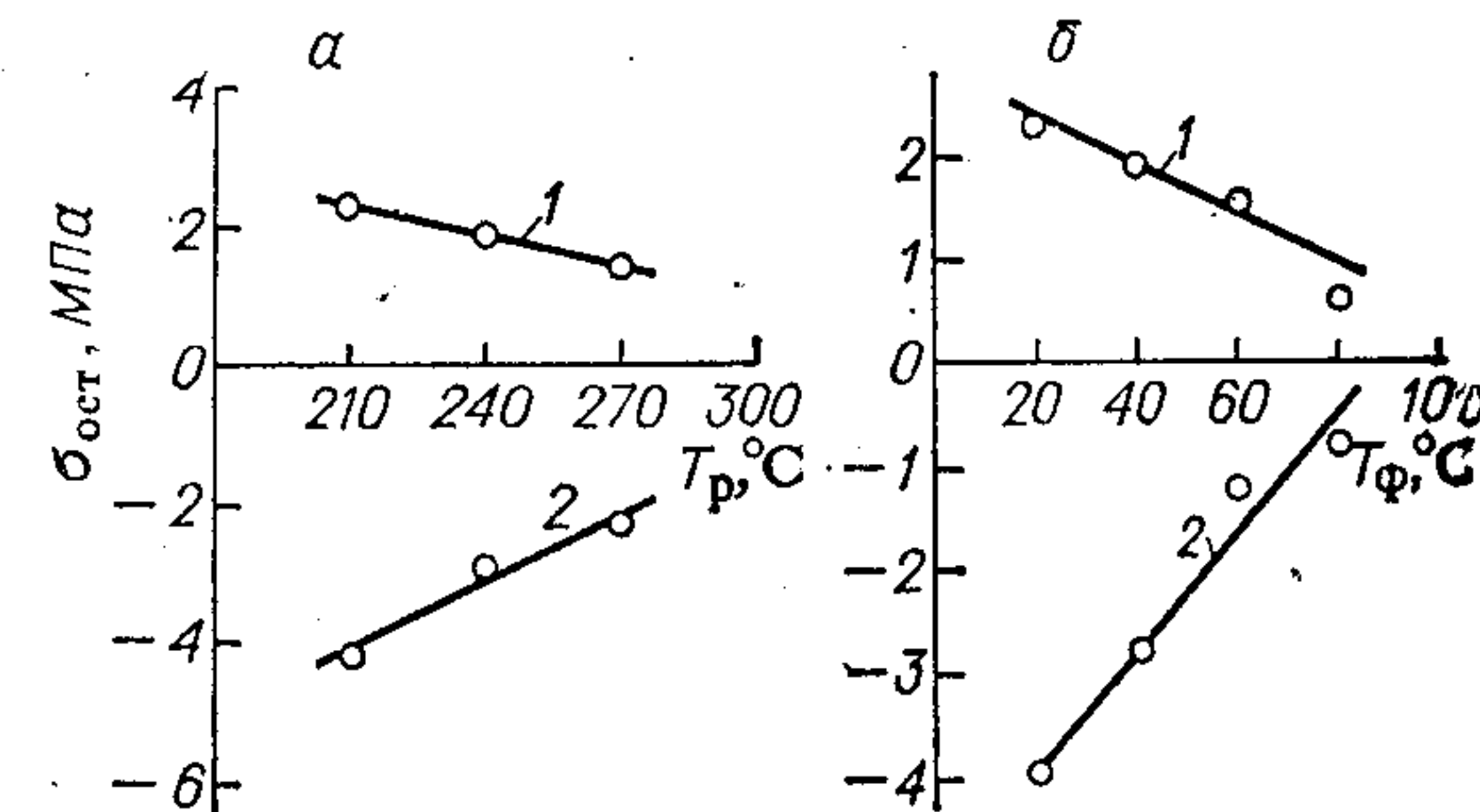
Для получения максимально объективных данных об усадке полимеров выработаны требования, предъявляемые к образцам и условиям их получения (см. стр. 40).

Напряженное состояние отливки, существенно зависящее от конструктивных факторов, объективно отражает общий уровень ее качества (прочностные показатели, точность размеров и формы, чистота поверхности, внешний вид). В общем напряженное состояние характеризуется собственными напряжениями (они называются также внутренними). Собственные напряжения являются упругими внутри твердого ненагруженного тела, они взаимно уравновешиваются: общая равнодействующая сила и результирующий момент в каждой данной точке имеют нулевые значения. По характеру происхождения собственные напряжения разделяют на следующие: временные, исчезающие после удаления вызвавшей их причины (термические напряжения из-за неравенства температуры в различных частях отливки, исчезающие после выравнивания температур); остаточные, остающиеся в отливке после удаления вызвавших их причин.

Для изделий из пластмасс характерными являются остаточные напряжения первого рода, т. е. такие, которые уравновешиваются в областях, имеющих размеры одного порядка с разме-

рами отливки. Они вызываются неравномерным распределением массы, неоднородными силовыми и тепловыми полями внутри отливки, т. е. зависят от энергетического баланса процесса формирования. Уже отмечалось, что под влиянием температуры и внешних сил во время формирования происходит изменение морфологического состояния полимера и геометрического положения молекул. Подведенную таким образом к отливке энергию нужно отводить в конце литьевого процесса, чтобы полимер был в состоянии внутреннего равновесия (любая система стремится к такому состоянию). Если же это не удастся сделать, то в отливке и остаются остаточные напряжения. Как правило, при литье под давлением так и происходит, поскольку достижение «идеального» состояния без остаточных напряжений на практике

Рис. 10. Зависимость упругих остаточных напряжений $\sigma_{ост}$ во втулках из полистирола от температуры расплава T_p (а) и формы T_f (б): 1 — в середине втулки; 2 — на поверхности втулки. Размеры втулки (мм): наружный диаметр 45,6, внутренний 39,5, высота 100; литник цилиндрический центральный.



вступает в противоречие с соображениями рентабельности производства. В результате происходит «замораживание» некоторого напряженного состояния (ориентации) в отливке. Корнели (и другие авторы) устанавливают три главные причины возникновения остаточных напряжений [9]: 1) изменение молекулярной структуры; 2) препятствия проявлению термической усадки; 3) ориентационные и релаксационные эффекты.

Возникшие остаточные напряжения могут приводить к большому колебанию размеров изделия, изменению размеров (последующая усадка), короблению (изменение размеров и формы отливки) и даже к трещинам.

Экспериментально установлено, что остаточные напряжения упругого характера (термические напряжения), возникающие при литье под давлением термопластов, непостоянны ни по сечению, ни по величине и знаку, и что они зависят от всех основных технологических факторов процесса литья под давлением: температуры, скорости, времени и давления [38]. На рис. 10 показаны примеры изменения величины остаточных напряжений, полученные Ю. П. Ложечко по экспериментальным данным для втулок из полистирола, в зависимости от температуры расплава T_p (рис. 10, а) и формы T_f (рис. 10, б). Следует отметить — что особенно важно — эти параметры относятся к разряду регулируемых при литье под давлением (см. стр. 45).

Исходя из описанной выше модели образования остаточных напряжений, ясно, что более высокие значения T_p и T_f

приводят, во-первых, к образованию весьма однородных по температуре пристенных слоев, отвердевших к концу этапа заполнения формы, и, во-вторых, к меньшему перепаду температур между жесткой оболочкой и расплавом внутренней зоны к моменту застывания литника (а последнее, как было показано, и обуславливает минимальные остаточные напряжения при литье под давлением). Третьей и весьма очевидной причиной меньших напряжений при повышении T_p и T_f является более интенсивная релаксация напряжений при повышенных температурах на всех этапах формования.

Последующая термическая обработка при температуре ниже температуры перехода может уменьшить упругие остаточные напряжения благодаря релаксации, но это связано со значительным изменением размеров, а у кристаллизующихся полимеров — со вторичной кристаллизацией, что может вызвать дополнительные внутренние напряжения.

Остаточные ориентационные напряжения, вызывающие высокоэластическую остаточную деформацию, определяются, как правило, по дополнительной тепловой усадке. При этом происходит процесс восстановления равновесного состояния («размораживание» материала), который описывается формулой: $T = Ae^{\alpha S_T}$, где T — температура нагревания отливки; A и α — постоянные, зависящие от материала и условий формования; S_T — усадка отливки после нагревания при температуре T . Таким образом, величина усадки S_T является количественной мерой ориентационных напряжений.

Рассматривая напряженное состояние отливки, часто выделяют еще остаточные напряжения диффузионного характера, возникающие после формования в результате поглощения или потери влаги материалом изделия. В случае изготовления отливки с металлической (или другой) арматурой, необходимо считаться с возникновением остаточных напряжений армирования.

При оценке суммарного воздействия остаточных напряжений в отливке надо принимать во внимание взаимодействие различных видов остаточных напряжений. Установление фактических значений остаточных напряжений отливок связано с трудоемкими и сложными экспериментами и обработкой полученных данных.

Итак, все факторы, которые способствуют усадочным процессам, влияют на уменьшение последующей усадки, являющейся «итогом», реализацией действия остаточных напряжений. Следует заключить, что не всегда надо стремиться к изготовлению изделий без остаточных напряжений; в ряде случаев они играют положительную роль: если они направлены противоположно действию внешней нагрузки, то величина допустимых для данной конструкции напряжений не изменяется, а при снятии остаточных напряжений надежность конструкции будет повышаться.

Реактопласты

Усадка реактопластов при литье под давлением определяется особенностями физико-химических превращений этих материалов. В работе [2] подробно описаны причины усадки реактопластов и факторы, на нее влияющие при изготовлении изделий прессованием и пресс-литьем. Здесь нет возможности детально анализировать проблему усадки реактопластов, но следует напомнить, что она зависит от типа связующего, наполнителя (состав, консистенция), их соотношения в композиции и других ингредиентов; от условий предварительной подготовки материала к формованию и режимов формования. Усадка связана с процессами, происходящими в замкнутом объеме литьевой камеры (цилиндре) и в форме: в литьевой камере — одновременное расплавление и сближение частиц «рыхлого» расплава и уменьшение пористости, а затем выдавливание (и ориентация) расплава по литниковым каналам в формирующую полость; в форме — пластическая деформация частиц сжатием (уплотнением) расплава в монолитную массу, выделением при этом летучих; отверждением (под действием температуры и давления) связующего, сопровождающимся уменьшением его объема и дополнительным выделением паров воды и газов (так называемая химическая, или релаксационная, усадка).

Сведений об объемном деформированном состоянии расплавов реактопластов пока недостаточно для получения оценочного уравнения, аналогичного уравнению (7).

Значительные объемные изменения реактопластов происходят за короткий период (несколько секунд) размыкания формы и извлечения изделия: после снятия давления (при условии, что оно действует на массу, пока форма сомкнута) проявляется «память» материала как реакция на сжатие по линии приложения давления и ориентацию частиц наполнителя. Кроме того, в этот момент изделие испытывает термоудар (разница температур около 150—180 °C) и начинается неравномерное охлаждение. Отмеченные причины вызывают анизотропию усадки реактопластов.

Основные процессы, происходящие при литье под давлением реактопластов, связаны с пластикацией материала, заполнением формы и — в отличие от термопластов — отверждением массы.

Главные параметры пластикации — частота вращения шнека реактопластавтомата, давление пластикации, температура цилиндра, объем пластицируемого материала. Частота вращения шнека определяет сдвиговые усилия и количество теплоты, полученной материалом в результате внутреннего трения. Давление пластикации и частота вращения шнека влияют на температуру материала, повышая ее. Пластикация, естественно, влияет в дальнейшем на условия формования литьем под давлением. Например, длительная пластикация может привести к преждевременному отверждению материала в цилиндре машины.

Заполнение формы чаще всего струйное. Масса, поступающая из материального цилиндра, в литниковой системе и форме дополнительно нагревается. Нагревание и отверждение материала, а также приток новых порций массы влияют на изменение давления в форме во время формования. Но после отверждения материала в литниковых каналах форма изолируется от сопла машины и дальнейшее отверждение основной массы отливки происходит без притока новых порций. При любой температуре формы количество теплоты, подводимой к впрыскиваемой массе в цилиндре и возникающей за счет экзотермической реакции, остается постоянным. В идеале температуры расплава и формы должны быть равны. Это условие наиболее благоприятно для протекания усадочных процессов в форме.

Экспериментами установлено, что усадка реактопластов при литье под давлением при увеличении самого давления снижается в тангенциальном (поперек) и радиальном (вдоль) направлениях, а с увеличением времени отверждения — растет, особенно в радиальном направлении. С возрастанием температуры формы увеличивается и абсолютное значение, и анизотропия усадки (минимальная анизотропия наблюдается при 150 °С). При увеличении выдержки изделия в форме, так же как при повышении давления свыше 50 МПа, возрастает пористость материала из-за интенсивного выделения летучих. При температурах выше 190 °С качество поверхности изделий ухудшается, появляются поры, увеличивается усадка [39].

УСАДКА ПРИ ЛИТЬЕ БЕЗ ДАВЛЕНИЯ

Усадка при литье без давления рассматривается на примере капролона. Как известно, характерной особенностью получения капролона является совмещение в одном технологическом процессе синтеза полимера с его переработкой в изделие. Такое перспективное сочетание связано еще с одной существенной технологической возможностью — формовать изделие без приложения давления.

Капролон — новый материал из группы полиамидов (см. табл. 1). Его получают методом блочной полимеризации ϵ -капролактама. Этот метод называют также низкотемпературной скоростной полимеризацией ϵ -капролактама в присутствии щелочных катализаторов (металлический натрий) и сокатализаторов (ацетилкапролактамы, продукты 102Г и 102Т) в атмосфере инертного газа (азота или аргона).

Полимеризация ϵ -капролактама происходит при атмосферном давлении непосредственно в формах, нагретых до 170—180 °С. Время полимеризации с момента заполнения форм 30—60 мин. После окончания полимеризации отливки медленно охлаждаются со скоростью 5—10 °С/ч до 20—40 °С. Из капролона (МРТУ 6-05-988—66) могут быть отлиты блоки практически неограниченных размеров, заготовки и готовые детали.

Создалось мнение, что при литье без давления, когда масса свободно заливается в форму, а затем происходит ее полимеризация, невозможно избежать значительной усадки, а тем более управлять ею. Последнее — в особенной степени важно, и для этого необходимо четко представлять механизм протекания усадочных процессов. Одно из немногих исследований, посвященных этому вопросу, проведено С. И. Сягаевой [40].

Механизм усадочных процессов проявляется на стадиях полимеризации, кристаллизации, охлаждения.

При полимеризации получается полимер определенной молекулярной массы и ММР (зависит от функциональности активатора, концентрации активатора и катализатора), которые влияют на объемные изменения. В то же время эти изменения зависят и от максимальной температуры материала после полимеризации (на нее воздействуют: энергия активации, скорость полимеризации; она воздействует на скорость кристаллизации), и от наличия в массе низкомолекулярных соединений.

Кристаллизация ответственна за однородность структуры, наличие пор, усадку и остаточные напряжения (основные факторы — температура, скорость кристаллизации, зависящая от наличия искусственных зародышей структурообразования, направление кристаллизации). Кристаллизация связана с охлаждением. Следует отметить, что кристаллизация полимера непосредственно после полимеризации существенно отличается от процесса кристаллизации гранулированных термопластов (перерабатываемых литьем под давлением): в первом случае все центры кристаллизации должны возникнуть самопроизвольно, тогда как во втором такими центрами служат частицы первоначальной кристаллической структуры.

Усадочный процесс при анионной полимеризации ϵ -капролактама можно рассматривать как состоящий из трех этапов: 1) усадки в жидком состоянии при переходе мономера в полимер $S_{ж}$; 2) усадки за счет объемных изменений при кристаллизации полимера $S_{кр}$; 3) усадки твердого полимера при охлаждении от температуры структурообразования до нормальной температуры $S_{кр}$. Тогда общая усадка будет равна:

$$S_{\Sigma} = \underbrace{S_{ж} + S_{кр}}_{S_{хим}} + \underbrace{S_{кр}}_{S_{терм}}$$

Физический смысл этих величин связан с тем, что у полимеров происходит не только термическое сжатие, а и сокращение объема (размеров) в результате химической реакции. Причем процесс протекает не в интервале от температуры начала затвердевания до нормальной, а наоборот, при повышении температуры. Анализ процесса получения отливок анионной полимеризацией ϵ -капролактама позволяет предположить, что основными причинами появления усадки и внутренних напряжений являются следующие: 1) химическая усадка в результате процессов полимеризации и кристаллизации; 2) повышение

температуры из-за выделения теплоты при полимеризации и кристаллизации; 3) разница между термическим расширением материала формы и отливки при охлаждении от температуры структурообразования до нормальной; 4) релаксация напряжений, активируемая высокими температурами, возникающими в процессе формообразования.

В зависимости от температурных условий может быть кристаллизация: *направленной* и протекать слоями, эквидистантными наружной поверхности, при этом $T_{\text{макс}}/T_{\text{крит}} > 1$; *одновременной*, проходящей во всем объеме отливки, так что $T_{\text{макс}}/T_{\text{крит}} \leq 1$ ($T_{\text{макс}}$ — это максимальная температура после полимеризации; $T_{\text{крит}}$ — температура образования зародышей критического размера, для капролона равна около 190°C), или *смешанной*.

Например, направленную кристаллизацию цилиндрической заготовки в условиях всестороннего равномерного теплообмена можно представить как перемещение фронта кристаллизации с одинаковой скоростью от поверхности к центру. При этом наружные слои образуют твердую корку. По мере продвижения фронта кристаллизации к центру увеличивается толщина уплотненной корки. В начальный момент имеется возможность компенсировать сокращение объема подпиткой материала из внутренних слоев. Но вскоре подпитка прекращается. Материала для формирования структуры с плотностью, соответствующей условиям кристаллизации, оказывается недостаточно из-за увеличения объема, образованного жесткими поверхностными слоями. Непропорциональность объема и массы возрастает. Уплотнение ведет к возникновению разрежения в центральной зоне. Внешние слои отливки начинают сдерживать уменьшение объема внутренних в результате их кристаллизации и испытывать сжимающие усилия. Из-за направленной кристаллизации температуры по сечению отливки распределяются неравномерно, и поэтому разные слои кристаллизуются в различных термических условиях. В этом случае возникают растягивающие напряжения, локализованные в центральных областях отливки. Эти напряжения не зависят от коэффициента теплообмена и значения их тем выше, чем больше разность температур охлаждающей среды и структурообразования. Аналогичная зависимость существует и для термических напряжений при охлаждении.

В затвердевшем материале возникают остаточные растягивающие напряжения. Дефицит массы, возрастающий с увеличением перепада температур, является причиной образования пороков в виде мелких пор и раковин, локализованных, в основном, в осевой зоне отливки, где разрежение достигает максимума. Их возникновение тем более вероятно, чем больше отношение высоты отливки к диаметру. Поры и раковины возникают в том случае, когда недостаток массы слишком велик даже для формирования самой рыхлой (псевдоаморфной) структуры. Разрежение, создающееся при высоких температурах, близких

к температуре плавления полимера, может вызвать разложение низкомолекулярных фракций и незаполимеризовавшегося мономера.

Температура выше 190°C неблагоприятно влияет на каталитическую систему, вызывает ее окисление.

Усадочные деформации в процессе кристаллизации несколько снижаются за счет увеличения объема, происходящего с ростом температуры в момент кристаллизации. Кроме того, сразу же после появления усадочных напряжений начинается их релаксация. Интенсивность релаксации зависит от напряжений, температуры и времени выдержки, а также от скорости охлаждения.

Так как кристаллизация поли-ε-капролактама и дальнейшая выдержка происходят в области переходных температур, то естественно предположить, что происходит интенсивная релаксация напряжений.

Структурными исследованиями обнаружено, что материал внутренних слоев содержит кристаллические области, чередующиеся с участками вынужденно аморфных зон (из-за деформаций растяжения). Со стороны поверхности, открытой при отверждении, образуется усадочная раковина, форма которой соответствует представлению о последовательной, направленной от поверхности к центру отливки, кристаллизации.

Условия для одновременного образования центров кристаллизации во всем объеме отливки возникают в том случае, если после полимеризации температура во всей массе образовавшегося полимера близка к критической температуре зародышеобразования. При этом создаются условия для одновременной кристаллизации, которая протекает при постоянной температуре, т. е. адиабатически. Если температура твердой фазы во время кристаллизации остается постоянной в течение всего процесса затвердевания, то напряжения равны нулю. Начинаясь изнутри кристаллизация ведет к равномерному сокращению объема отливки и способствует получению более однородной структуры, с меньшим разбросом плотности по сечению отливки. Однако адиабатическое протекание процесса затвердевания необходимо, но недостаточно, чтобы получить однородную структуру и плотность во всем объеме и минимальные остаточные напряжения. Важным фактором при этом является скорость охлаждения.

Начинающийся с поверхности процесс охлаждения отливки из-за низкой теплопроводности капролона характеризуется градиентом скорости охлаждения по сечению. Это приводит к возникновению термоупругих напряжений. Чем больше перепад температур между центральными и поверхностными слоями, тем больших напряжений следует ожидать. Для каждого бесконечно малого слоя разница в скоростях свободной термической и общей усадки будет компенсироваться упругой деформацией.

В первый момент скорость охлаждения наружных слоев больше, чем внутренних. Дальнейшее охлаждение приводит к состоянию, когда скорость охлаждения внутренних областей превышает скорость охлаждения наружного слоя. В результате этого начинается более интенсивное сокращение объема внутренних слоев отливки. Наружные слои препятствуют этому уменьшению. Соппротивление одних слоев отливки усадке других вызывает появление температурных напряжений, которые при высоких температурах не приводят к разрушению, однако при $T < T_c$ могут вызвать разрушение отливки, если величина возникших напряжений превысит предел прочности материала.

После охлаждения в наружных слоях отливки зафиксированы сжимающие тангенциальные напряжения, а во внутренних — растягивающие. Остаточные напряжения будут тем больше, чем значительнее перепад температур по сечению, чем выше скорость охлаждения и чем, следовательно, меньшая часть напряжений успеет отрелаксировать. Кроме того, на остаточные напряжения решающее влияние оказывает наличие арматуры, препятствующей свободному протеканию усадочных процессов.

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ УСАДКИ

Для решения практических задач выделяют усадку технологическую и эксплуатационную.

Технологическая усадка — это абсолютное или относительное уменьшение размеров изделия по сравнению с соответствующими размерами оформляющей полости формы, происходящее ко времени охлаждения извлеченной из формы отливки до температуры окружающей среды. В технической литературе, на производстве часто опускают определение «технологическая», но именно эту усадку имеют в виду.

Кинетика технологической (т. е. связанной с переработкой) усадки описывается экспоненциальной зависимостью:

$$\Delta L_i = \Delta L_{0i} (1 - e^{-\gamma t}); \quad L_i = L_{0i} - \Delta L_i$$

где ΔL_i — отклонение размера; ΔL_{0i} — коэффициент пропорциональности; L_i — измененный номинальный размер изделия; L_{0i} — первоначальное номинальное значение размера; t — время (продолжительность) процесса; γ — коэффициент, характеризующий физические свойства материала.

Если сравнивают размеры горячей формы и полностью остывшего изделия, то получают действительную линейную технологическую усадку S_d , а если сравнивают размеры формы и изделия при $20 \pm 2^\circ\text{C}$, то получают удобную для практики расчетную линейную технологическую усадку S . Учет технологической усадки, как отмечалось, необходим при конструировании формующего инструмента (для расчета исполнительных размеров форм) и изделий (для оценки достижимой точности изготовления по колебанию усадки); определение технологической усадки

проводят для сравнительной оценки технологических свойств разных типов, марок и партий полимерных материалов при контрольных, приемочных и арбитражных испытаниях.

Эксплуатационная усадка — это абсолютное или относительное уменьшение размеров по сравнению с первоначальными, происходящее в результате воздействия соответствующих внешних факторов (температуры, среды и т. д.) в течение определенного времени работы изделия (частный случай — длительное хранение изделия). Кинетика эксплуатационной усадки (в общем случае — закономерности размерных изменений изделий) описывается в зависимости от действующих доминирующих процессов по линейному ($\Delta L_i = \Delta L_{0i} t$ для теплового расширения, размерного износа), параболическому ($\Delta L_i = \Delta L_{0i} t^2$ — для водопоглощения), экспоненциальному (для различных процессов, связанных со старением) законам.

Учет эксплуатационной усадки необходим для сравнительной оценки работоспособности изделий (при определении величины компенсации зазора или натяга соответственно в подвижном или неподвижном соединении деталей), для предпочтительного выбора пластмассы в качестве конструкционного материала (при заданных требованиях к точности и прочности деталей).

Усадочные изменения, происходящие при длительном хранении, устанавливают по так называемой дополнительной усадке (абсолютное или относительное изменение размеров перед и после термообработки при заданных температуре и времени).

Расчетную S и дополнительную HS усадку пластмасс вычисляют (в %) по ГОСТ 18616—73 (составлен с учетом РС СЭВ 399—65) на стандартных образцах — брусках ($120 \times 15 \times 10$ мм; $120 \times 10 \times 4$ мм; $50 \times 6 \times 4$ мм) и дисках ($\varnothing 100 \times 4$ мм; $\varnothing 50 \times 2$ мм):

$$S = (l_1 - l) \cdot 100 / l; \quad HS = (l' - l_2) \cdot 100 / l'$$

где l — размер образца; l_1 — размер формы; l' — размер образца перед термообработкой; l_2 — размер образца после термообработки.

Кроме того, вычисляют анизотропию технологической усадки a и дополнительной усадки a' (в %):

$$a = S_b / S_l; \quad a' = HS_b / HS_l$$

где S_b , HS_b , S_l и HS_l — усадка и дополнительная усадка образца вдоль и перпендикулярно направлению литья соответственно.

Образцы должны быть изготовлены в одном гнезде формы. Условия ее заполнения строго не нормируются, но, решая этот вопрос, необходимо руководствоваться рекомендациями, приведенными на стр. 31—32.

Размеры форм и образцов измеряют всегда при $20 \pm 2^\circ\text{C}$, причем для определения S — через $16 \div 24$ ч после изготовления образцов, HS — непосредственно до и после испытаний. Предусмотрена также выдержка образцов в кондиционированных

условиях. Точность применяемых измерительных средств $\pm 0,01$ мм. Испытания проводят на пяти образцах, так что в результате получают средние значения $\bar{S}$, $\overline{HS}$, $\bar{a}$ и $\bar{a}'$.

Для получения максимально полной информации следует вычислять еще и соответствующие среднеквадратические отклонения (но это целесообразно делать все же на большем числе отливок выборочной контрольной партии), а именно: σ_S , σ_{HS} , σ_a , $\sigma_{a'}$. Целесообразно затем оценить величину колебания усадки. Если известно значение σ_S , то его надо умножить на толерантный коэффициент e , определяемый в зависимости от числа измеренных образцов n :

n	e	n	e	n	e	n	e
3	5,6	7	3,9	11	3,5	15—17	3,3
4	4,9	8	3,8	12	3,5	18—21	3,2
5	4,4	9	3,7	13	3,4	22—27	3,1
6	4,1	10	3,6	14	3,4	Свыше 27	3,0

Примечание. Данные подсчитаны для статистической уверенности $Q=0,85$ в том, что 99,73% возможных результатов будут попадать в интервал $\pm e\sigma_S$, причем значение e уменьшено на 15% для компенсации погрешностей измерений и увеличено на $\sqrt{n/(n-1)}$ для коррекции среднего квадратического отклонения σ_S .

Затем получим: $\pm \Delta S/2 = \pm e\sigma_S$ и, следовательно, $S = \bar{S} \pm \Delta S/2$. Чтобы убедиться в отсутствии грубых ошибок, подсчитывают максимально и минимально возможную усадку:

$$S_{\max} = \bar{S} + \Delta S/2; \quad S_{\min} = \bar{S} - \Delta S/2$$

Результаты измерений не должны выходить за эти пределы. Вероятность нахождения рассчитанных значений усадки внутри заданного интервала называют статистической уверенностью Q . Точностью P определения средней усадки $\bar{S}$ называют интервал, в котором при данном числе измерений n можно со статистической уверенностью Q предположить нахождение истинного значения средней усадки для данного испытания.

Колебание усадки $\pm \Delta S/2$ (или ΔS) — это интервал, в котором можно со статистической уверенностью Q предположить нахождение всех возможных значений усадки для данного испытания.

Оценка результатов контроля заключается в сравнении полученных значений усадки и ее колебания с данными, установленными ГОСТ или ТУ на материалы. Подобные расчеты рекомендуются в [41].

Точность полученных результатов устанавливают, пользуясь графиком, приведенным, например, в [2, стр. 62]. Зная число n измеренных образцов (горизонтальная ось), а также среднеквадратическое отклонение усадки σ_S (наклонные линии на графике), на вертикальной оси находят точность определения средней усадки.

Если $\bar{S}$ и ΔS находятся в предусмотренных пределах, то качество материала признается удовлетворительным. Если же

эти значения выходят за предусмотренные пределы, то повторно контролируют эти показатели, по крайней мере, для 10 образцов. Если опять будет наблюдаться выход показателей за пределы, предусмотренные оценкой по графику, то качество материала признается неудовлетворительным, а партия материала — бракуется. В противоположном случае — качество материала признается удовлетворительным, несмотря на данные первоначального контроля.

Стандартные образцы, как метрологическая мера, позволяют получать сравнительные данные, традиционно считающиеся усадкой материала. На изделиях наблюдают усадочную деформацию, которая проявляется в каждом случае специфически, зависит от остаточных напряжений, действующих в изделии, и, как правило, отличается от усадки материала. На изделиях можно выделить участки свободно или затрудненно усаживающиеся. Усадочная деформация (или усадка) изделия, а также колебание его усадки, требуются для решения конкретных инженерных задач по повышению прочности и точности изделий.

ВЗАИМОСВЯЗЬ УСАДКИ И ТОЧНОСТИ

Подробно этот вопрос рассмотрен в [2] на примерах пресованных деталей из реактопластов. Однако общие положения можно уверенно распространить и на литые пластмассовые детали. Эта рекомендация относится также к методам решения важных производственных задач, отмеченных выше (стр. 5), среди которых значительное место занимают задачи, связанные с выбором оптимальных соотношений между допусками на размеры пластмассовых деталей и соответствующих размеров форм, в которых деталь изготавливается. Напомним, следуя [42], упрощенную схему необходимых в таком случае рассуждений.

Если допуск при комнатной температуре на размер формы P_{ϕ} составляет величину δ_{ϕ} , тогда возможный общий размер формы будет $P_{\phi} \pm \delta_{\phi}$. Аналогичным образом размер готовой детали при заданном допуске будет $P_d \pm \delta$. При максимальном размере формы $P_{\phi} + \delta_{\phi}$ и минимальной усадке $S_{\min}$ готовой детали его размер может составить величину $P_d + \delta$. С другой стороны, размер детали $P_d - \delta$ может быть получен в том случае, если формуемый материал имеет максимальную усадку $S_{\max}$, а форма выполнена с отрицательным допуском, т. е. $P_{\phi} - \delta_{\phi}$. В общем виде имеем:

$$(P_{\phi} + \delta_{\phi}) - (P_{\phi} + \delta_{\phi}) S_{\min} = P_d + \delta$$

$$(P_{\phi} - \delta_{\phi}) - (P_{\phi} - \delta_{\phi}) S_{\max} = P_d - \delta$$

Исходя из того, что $\delta_{\phi} S_{\min}$ и $\delta_{\phi} S_{\max}$ пренебрежимо малы, уравнения приведены к виду:

$$P_{\phi} + \delta_{\phi} - P_{\phi} S_{\min} = P_d + \delta \quad (14)$$

$$P_{\phi} - \delta_{\phi} - P_{\phi} S_{\max} = P_d - \delta \quad (15)$$

После их суммирования и введения средней усадки, получаем уравнение, связывающее исходные размеры формы и детали со средней усадкой $\bar{S}$:

$$P_{\phi}(1 - \bar{S}) = P_d \quad (16)$$

Если решить уравнения (14) и (15) относительно величин допусков, то получается соотношение:

$$\delta_{\phi} = \delta - P_{\phi}(S_{\max} - S_{\min})/2 \quad (17)$$

Уравнения (16) и (17) непосредственно связывают размеры детали и формы и показывают, как по допуску на деталь рассчитать допуск на изготовление формы.

Допуск на деталь δ зависит, в первую очередь, от разброса значений средней усадки $\bar{S}$ и от точности изготовления формы. Согласно уравнению (17) можно записать:

$$\delta > P_{\phi}(S_{\max} - S_{\min})/2$$

В процессе эксплуатации формы следует также принимать во внимание ее износ. Поэтому в общем случае можно использовать величину $P_{\phi} \pm (0,5 \div 0,6)\delta_{\phi}$. В тех случаях, когда форма имеет сложную конфигурацию и подвижные части, контроль износа поверхностей приобретает важное значение. Целесообразно для его уменьшения применение различных смазок, в частности, хорошие результаты получены при использовании дисульфида молибдена.

Методика выбора допусков на размеры пластмассовых изделий рассматривается ниже (см. стр. 97). Здесь важно отметить, что уравнения (14) — (17) не противоречат разработанному и описанному в [2] методу расчета исполнительных размеров формующего инструмента для изделий из пластмасс.

ТОЧНОСТЬ ЛИТЫХ ИЗДЕЛИЙ

Рассмотрим зависимость процесса формования от переменных факторов на примере литья под давлением термопластов. Этими факторами являются изменяющиеся характеристики сырья (полимерного материала), технологического процесса и особенностей литейной машины (гидравлического и электрического приводов машины, узла пластикации и впрыска, узла смыкания литейной формы). Ниже рассматриваются те переменные, которые связаны с технологическим процессом как доминирующие. Их можно разделить на входные, промежуточные, выходные и целевые.

Входные независимые переменные состоят из регулируемых и нерегулируемых (возмущающих) переменных.

Входные регулируемые переменные — это факторы, которые устанавливает оператор на соответствующих устройствах, регулирующих процесс, т. е. на них можно непосредственно воздействовать.

Нерегулируемые (возмущающие) переменные — это параметры процесса литья, на которые невозможно воздействовать в течение цикла литья (режим работы машины, характеристика сырья, температура помещения, влажность воздуха, колебания напряжения в электросети). Воздействие на процесс нерегулируемых переменных приводит к неполной воспроизводимости показателей качества в литых изделиях.

К промежуточным переменным относятся выходные параметры, определяемые по окончании отдельных (или нескольких) стадий процесса литья (производительность пластикации, давление в форме при впрыске и выдержке под давлением; продолжительность цикла, расход электроэнергии).

Выходные переменные характеризуют уровень стабилизации (точность, изменение во времени) входных и промежуточных переменных процессов. Они зависят от стабильности всего процесса. Следует учитывать, что промежуточные переменные процесса литья почти все взаимозависимы. Так, изменение температуры расплава в зоне сопла ведет к изменению давления и скорости впрыска, последние влияют на времена выдержки под давлением и охлаждения. Это значительно усложняет управление процессом.

Целевые переменные позволяют оценить качество процесса литья и его экономичность (затраты энергии, времени, материала, а также качество изделий).

Независимость переменных факторов следует понимать как возможность установки на литьевой машине соответствующих параметров независимо друг от друга. Это не означает, что они не взаимосвязаны. Напротив, изменение одной переменной ведет к изменению другой и пренебрежение этой связью переменных приводит к искажению реального процесса, нарушению его закономерностей; например, давление впрыска, давление подпитки, скорость впрыска, времена цикла зависят от температуры расплава в цилиндре и от всего процесса пластикации, поэтому их можно считать промежуточными переменными, хотя они могут устанавливаться произвольно. Все это отражено в ориентировочной классификации переменных факторов процесса литья, приведенной на схеме 1.

Рассматривая переменные факторы процесса в аспекте возможности регулирования и управления ими, следует обратить внимание на те, которые характеризуют состояние полимерного материала на различных стадиях процесса литья или характеризуют степень воздействия узлов машины на полимерный материал. По опыту к этим переменным можно отнести из входных — n , T_{1-5} , s_d , T_b , $p_{впр}$, Q_b , $v_{впр}$, $p_{п}$, $t_{выд}$, $t_{охл}$; из промежуточных T_p , $\Delta T_{p.ф}$, η , $t_{пл}$, $T_{ф}$, $\Delta p_{р.ф}$, $\Delta T_{р.ф}$, $\Delta p_{гидр}$, s_p .

Для определения выходных переменных, значительно влияющих на стабильность процесса литья и качество изделий, необходимо показать взаимосвязь приведенных выше входных и промежуточных переменных факторов. Это сделано в виде феноменологических уравнений:

пластикация

$$t_{пл} = f_1(T_{1-5}, n, s_d, p_{пр})$$

$$T_p = f_2(T_{1-5}, t_{пл})$$

$$\eta = f_3(T_p, t_{пл})$$

впрыск

$$p_{впр} = \psi_1(T_p, \eta)$$

$$v_{впр} = \psi_2(T_p, \eta, G_{ф})$$

подпитка и охлаждение в форме

$$s_p = \varphi_1(T_p, v_{впр})$$

$$p_{п} = \varphi_2(T_p, \Delta p_{р.ф}, s_p, v_{впр})$$

$$\Delta p_{р.ф} = \varphi_3(p_{п}, p_{впр}, v_{впр}, \Delta T_{р.ф}, T_{ф}, G_{ф})$$

$$\Delta T_{р.ф} = \varphi_4(\Delta p_{р.ф}, v_{впр}, T_p, T_{ф}, G_{ф}, p_{п})$$

$$t_{охл} = \varphi_5(\Delta p_{р.ф}, \Delta T_{р.ф})$$

$$t_{выд} = \varphi_6(p_{п}, \Delta T_{р.ф})$$

качество изделия после окончания процесса

$$K_i = q(T_p, \Delta T_{р.ф}, \eta, \Delta p_{р.ф}, T_{ф}, s_p, p_{впр}, v_{впр}, t_{выд}, t_{охл}, G_{ф})$$

Многие из переменных факторов могут быть рассчитаны или определенным образом выбраны [7]. Но такие переменные факторы, как вязкость или геометрическая характеристика отливки (формы) не могут быть учтены или рассчитаны заранее. Это значительно осложняет анализ процесса и вносит элемент интуиции при выборе оптимальных значений переменных факторов процесса литья. Из приведенных уравнений видно, что наиболее

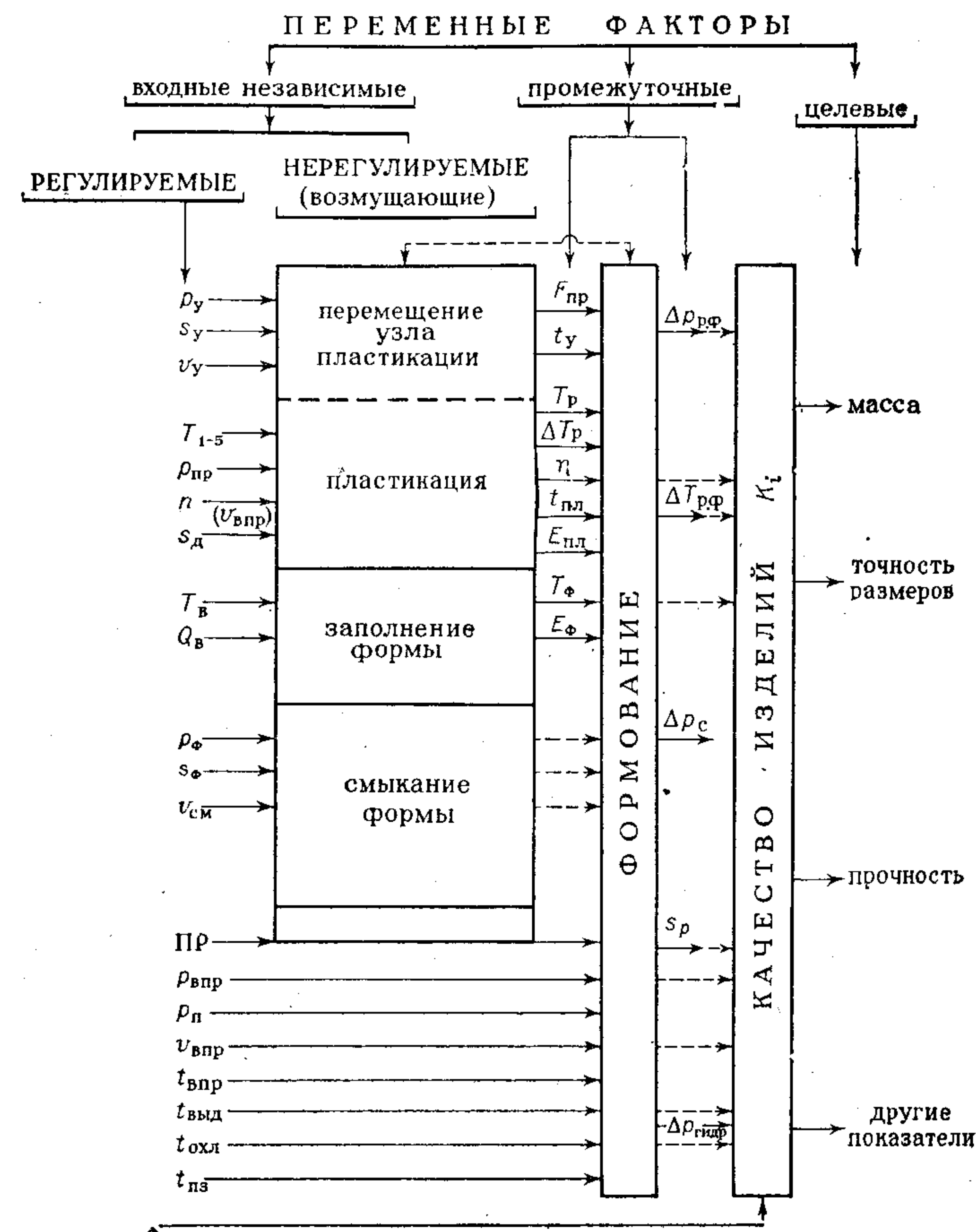


Схема 1. Ориентировочная классификация переменных факторов, влияющих на процесс литья под давлением полимерных материалов

Условные обозначения. p_y — давление в узле пластикации перед впрыском; s_y — величина перемещения узла пластикации; v_y — скорость перемещения узла пластикации; T_{1-5} — температура зон цилиндра машины; $p_{пр}$ — противодействие при пластикации; n — частота вращения шнека; s_d — перемещение шнека при дозировке; T_b — температура воды, охлаждающей форму; Q_b — расход воды, охлаждающей форму; $p_{ф}$ — давление запираания формы; $s_{ф}$ — перемещение формы при смыкании; $v_{см}$ — скорость перемещения полуформы (подвижной) при смыкании; PR — прочие входные величины; $p_{впр}$ — давление впрыска; $p_{п}$ — давление подпитки; $v_{впр}$ — скорость впрыска; $t_{впр}$ — время впрыска (время переключения с впрыска на подпитку дополнительно); $t_{выд}$ — время выдержки под давлением; $t_{охл}$ — время охлаждения; $t_{пз}$ — время на паузы; $G_{ф}$ — геометрическая характеристика отливки (полости формы) и литниковой системы; $F_{пр}$ — сила прижатия сопла к форме; t_y — время перемещения узла пластикации; T_p — температура расплава в сопле; ΔT_p — изменение (распределение) температуры расплава; η — вязкость расплава; $t_{пл}$ — время пластикации разового объема впрыска $v_{впр}$; $E_{пл}$ — энергия пластикации; $T_{ф}$ — температура стенки формующей полости; $E_{ф}$ — расход энергии на термостатирование; $\Delta p_{р.ф}$ — изменение давления в форме во времени (кривая изменения давления); $\Delta T_{р.ф}$ — изменение температуры расплава в форме во времени (кривая изменения температуры); Δp_c — изменение давления в сопле литьевой машины; s_p — толщина подпорного слоя; $\Delta p_{гидр}$ — изменение давления в гидросистеме во времени.

значительное взаимодействие промежуточных переменных происходит на последней стадии процесса — подпитке и охлаждении в форме. Введение двух промежуточных переменных $\Delta p_{p.f}$ и $\Delta T_{p.f}$ обусловлено тем, что они, давая непосредственную информацию о состоянии полимера в форме при введении соответствующих устройств управления, позволят поддерживать их достаточно точно. Кроме того, из анализа кривых изменения давления $\Delta p_{p.f}$ и температуры $\Delta T_{p.f}$ можно определить характер заполнения формы расплавом, гидравлическое сопротивление литниковой системы, истинное значение времени выдержки под давлением и времени охлаждения. А эти переменные факторы в значительной мере определяют качество изделия.

Таким образом, на основании анализа и классификации переменных факторов процесса литья под давлением термопластов можно сформулировать *основные задачи регулирования и управления* процессом: обеспечение точности регулирования переменных факторов процесса литья; обеспечение стабильности качества изделий и одновременно — сокращение времени выхода литьевой машины на заданный режим работы.

Эти задачи взаимосвязаны. В настоящее время постоянно возрастают требования к улучшению качества и повышению точности изделий из пластмасс. Это, в свою очередь, зависит от возможностей регулирования, от точности и надежности управления процессом литья. Суть регулирования и управления — воздействие на состояние материала, осуществление связи характеристик состояния с показателями качества изделий (ими могут быть, как указывалось, размерная точность, усадка, колебание усадки, масса, комплекс физико-механических свойств, прозрачность, морозостойкость, плотность). Для регулирования, а тем более управления этими свойствами материала в изделии необходимо контролировать показатели качества непосредственно в процессе литья, рассматривать систему машина — литьевая форма — изделие как единое целое.

Указанные выше три основные задачи взаимосвязаны. При обеспечении повышенной точности регулирования переменных факторов процесса исходят из предпосылки, что постоянные значения переменных (установленные в предельно узких допусках) при постоянном качестве сырья обеспечат стабильность точности и качества изделий (обеспечение постоянства качества изделия практически вытекает из решения первой задачи). Но с изменением качества сырья возникает необходимость скорректировать величину показателя качества изделия (вторая задача). Для этого и нужны средства контроля этого комплексного показателя. Измерение показателя качества непосредственно в конце каждого цикла обеспечивает быстроту корректировки переменных факторов литья при незначительном изменении характеристик сырья (например, вязкости). Однако разработанные в настоящее время системы управления имеют задачу лишь обеспечить высокую точность поддержания переменных литья. Слож-

ность устройств, т. е. необходимость применения в системах ЭВМ объясняется тем, что переменные факторы литья под давлением взаимосвязаны (корректировка их, например, при изменении температуры расплава в зоне сопла должна осуществляться по температуре сопла, давлению впрыска, скорости впрыска). Решение третьей задачи — сокращение времени установления в машине заданного режима — вытекает из решения первой задачи.

Феноменологические уравнения позволяют получить только качественную оценку состояния процесса литья под давлением. Изыскание оптимальных путей регулирования точности и качества изделий требует нахождения количественных оценок взаимосвязей факторов. Определенные эффективные решения в этом направлении позволяет получить теория надежности, использованная для исследования технологического процесса и литьевой системы как объекта регулирования.

ЛИТЬЕВАЯ СИСТЕМА КАК ОБЪЕКТ РЕГУЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ

Применение методов теории надежности к исследованию технологических процессов началось совсем недавно и практически одновременно в отечественной промышленности [43] и за рубежом [44].

Процесс литья под давлением характеризуется в целом так называемой длительной надежностью, охватывающей большое число последовательных циклов литья, и краткосрочной надежностью, относящейся к конкретному циклу литья. Собственно технологический процесс, состоящий из отдельных технологических операций, является — с точки зрения теории надежности — технологической системой.

Надежностью технологической системы называется ее свойство выполнять заданные функции (сохраняя показатели качества и ритм выпуска готовой продукции в течение определенных промежутков времени эксплуатации) или требуемую наработку [45]. Технологическую систему следует считать надежной в том случае, если она обеспечивает выполнение задания по показателям качества продукции и по параметрам производительности. Параметры и свойства технологической системы и ее элементов изменяются в процессе функционирования, поэтому в определенный момент времени система может находиться в работоспособном или неработоспособном состоянии.

Технологическая система находится в состоянии работоспособности, если она может обеспечивать: изготовление продукции в единицу времени в заданном объеме и в соответствии с показателями качества (указаны в технической документации). В определенные моменты времени технологическая система может быть работоспособна по параметрам (показателям) качества и неработоспособна по параметрам производительности (и наоборот). В каждом из этих случаев технологическую систему следует считать неработоспособной.

Отдельные нарушения в технологической системе, так называемые отказы, могут перевести систему из работоспособного состояния в неработоспособное. Отказы в технологических системах могут быть внезапными и постепенными. К постепенным относят отказы, вызванные непрерывным или дискретным характером изменений в состоянии технологической системы и приводящие к постепенной потере работоспособности. К внезапным — отказы, обусловленные отдельными нарушениями, момент наступления которых практически невозможно прогнозировать.

Понятие надежности технологического процесса принципиально отличается от понятий точности и стабильности. Под *точностью*, как известно, понимается свойство технологического процесса обеспечивать соответствие поля рассеяния значений показателя качества изготовления продукции заданному полю допуска и его расположению; *стабильность* — свойство технологического процесса сохранять показатели качества изготавливаемой продукции в заданных пределах в течение некоторого времени. Точность характеризует технологический процесс в некоторый фиксированный момент времени; стабильность — только с позиции сохранения в заданных пределах показателей качества продукции и не распространяется на изменение производительности за определенное время. Кроме того, стабильным будет и такой технологический процесс, при котором изготавливается продукция с одними и теми же отклонениями от требований технической документации. Надежность — понятие динамическое. Точность необходимо рассматривать как составную часть свойства надежности системы. Технологический процесс может быть стабильным, но иметь низкую надежность. Обратное утверждение неверно, так как надежный технологический процесс должен обладать и высокой стабильностью.

Оценка надежности технологических процессов обычно начинается с составления структурной схемы: последовательной, параллельной или последовательно-параллельной. Сложные технологические процессы разделяют на части (блоки).

В результате такого построения технологический процесс представляется в виде многоуровневой (иерархической) структуры. В зависимости от сложности процесса число уровней может быть различно. Расчет надежности проводят, начиная с нижнего уровня структуры.

На разных уровнях может быть принята различная схема структуры. Технологический процесс литья под давлением в момент времени t обеспечивает выполнение задания по показателю качества (параметру) i , если выполняется неравенство:

$$\delta_{ниj} \leq y_{ij}(t) \leq \delta_{виj}$$

где $\delta_{ниj}$, $\delta_{виj}$ — нижняя и верхняя границы допуска; $y_{ij}(t)$ — показатель качества, по которому проводится оценка надежности технологического процесса.

Например, в случае односторонних допусков, отдельные $\delta_{ниj}$ или $\delta_{виj}$ могут быть равны 0 или быть неограниченными, т. е. изменяющимися до бесконечности.

Вероятность выполнения приведенного неравенства характеризует надежность технологической системы по показателю y_i . Вероятность выполнения задания по всем i показателям определяется из условия одновременного выполнения m неравенств:

$$P\{\delta_{ни1j} \leq y_{1j} \leq \delta_{ви1j}\} = P_{1j}(t)$$

$$P\{\delta_{ни2j} \leq y_{2j} \leq \delta_{ви2j}\} = P_{2j}(t)$$

$$\dots\dots\dots$$

$$P\{\delta_{нимj} \leq y_{mj} \leq \delta_{вимj}\} = P_{mj}(t)$$

Если вероятность выполнения задания по одному или нескольким показателям качества на последовательных технологических операциях $O_1, O_2, \dots, O_n$ (например, подготовка сырья, формование, контроль и т. д.) соответственно равна $P_1(t), P_2(t), \dots, P_n(t)$, то при условии независимости погрешностей обработки на каждой из операций, вероятность выполнения задания по показателям качества всей технологической системой за время t будет равна:

$$P(t) = \prod_{j=1}^n P_j(t) = P_1(t) P_2(t) \dots P_n(t)$$

В [45] рассмотрена методика расчета надежности технологического процесса в случае независимости погрешностей, возникающих на отдельных его стадиях.

Если теперь выделить из большой технологической системы ту ее часть, которая ответственна за формование изделия, т. е. непосредственно литьевую систему, то, как видно из схемы 1, она подвержена влиянию случайных и систематических факторов, а также воздействию случайных или систематических остановок процесса (выталкивание изделия, нанесение смазки, установка арматуры и т. д.), нарушающих термическое равновесие системы.

Критерием термического равновесия является постоянство температурного поля гнезда формы при каждом цикле литья (оно может характеризоваться средней температурой). Это постоянство одновременно и залог постоянства свойств отлитых изделий, в том числе усадки, колебания усадки и, в итоге, точности размеров. Поэтому представляя литьевую систему как объект регулирования и управления с целью обеспечения (и повышения) качества литых изделий из пластмасс, целесообразно наряду с такими двумя обязательными элементами, как литьевая машина и форма, выделить третий обязательный элемент системы: термостат. Понятие «термостат» в известной степени условное (например, к нему относится и охлаждающая вода из заводской сети). В работах [46, 47] подробно анализируется

литьевая система как объект регулирования и управления и экспериментально (на аморфных и кристаллизующихся термопластах) доказана значимость взаимосвязи указанных трех элементов. Такие элементы образуют систему (с позиций кибернетики).

Литьевую систему можно рассматривать как реальную и как относительно изолированную, когда связь окружения с входом и выходом слабее внутренней связи между элементами системы. Для выявления необходимых и дополнительных элементов в процессе литья можно воспользоваться обычной логической моделью — черным ящиком, где X и Y означают соответственно вход и выход.

При исследовании процесса литья плодотворным оказался математический метод символических матриц [47]. Рассмотрим его подробнее. В замкнутой литьевой системе машина M , форма Φ и термостат T взаимосвязаны и непосредственно влияют на изделие. Процесс литья и передачи информации при литье описывают квадратичной матрицей, в которой «1» означает наличие связи или переход к другому состоянию, а «0» — отсутствие связи или прекращение процесса. Взаимодействие в литьевой системе с точки зрения материального и энергетического обмена представлено на схеме 2, с точки зрения обмена информации — на схеме 3, а соответствующие матрицы приведены ниже:

Матрица процесса литья под давлением

	Е	М	Ф	Т	А
Е	0	1	1	1	0
М	0	0	1	0	1
Ф	0	0	0	1	1
Т	0	0	1	0	1
А	0	0	0	0	1

Информационная матрица процесса литья под давлением

	Е	М	Ф	Т	А
Е	0	1	1	1	0
М	0	0	1	0	1
Ф	0	0	0	1	0
Т	0	0	1	0	1
А	0	0	0	0	1

где A — вход в систему; E — выход из системы; в рамках — субматрицы процессов литья и информации.

Схема 2. Материальный и энергетический обмен в литьевой системе

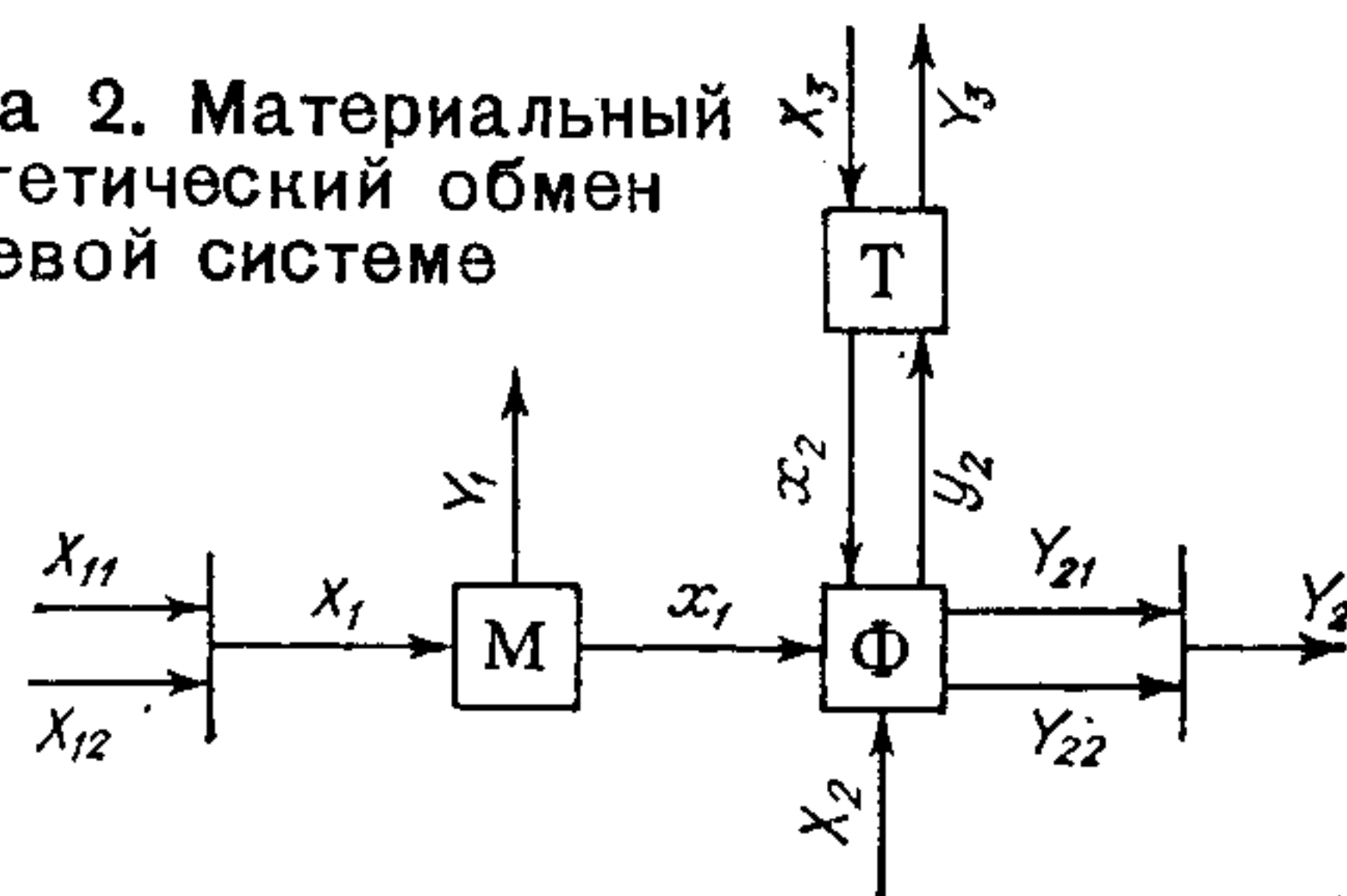
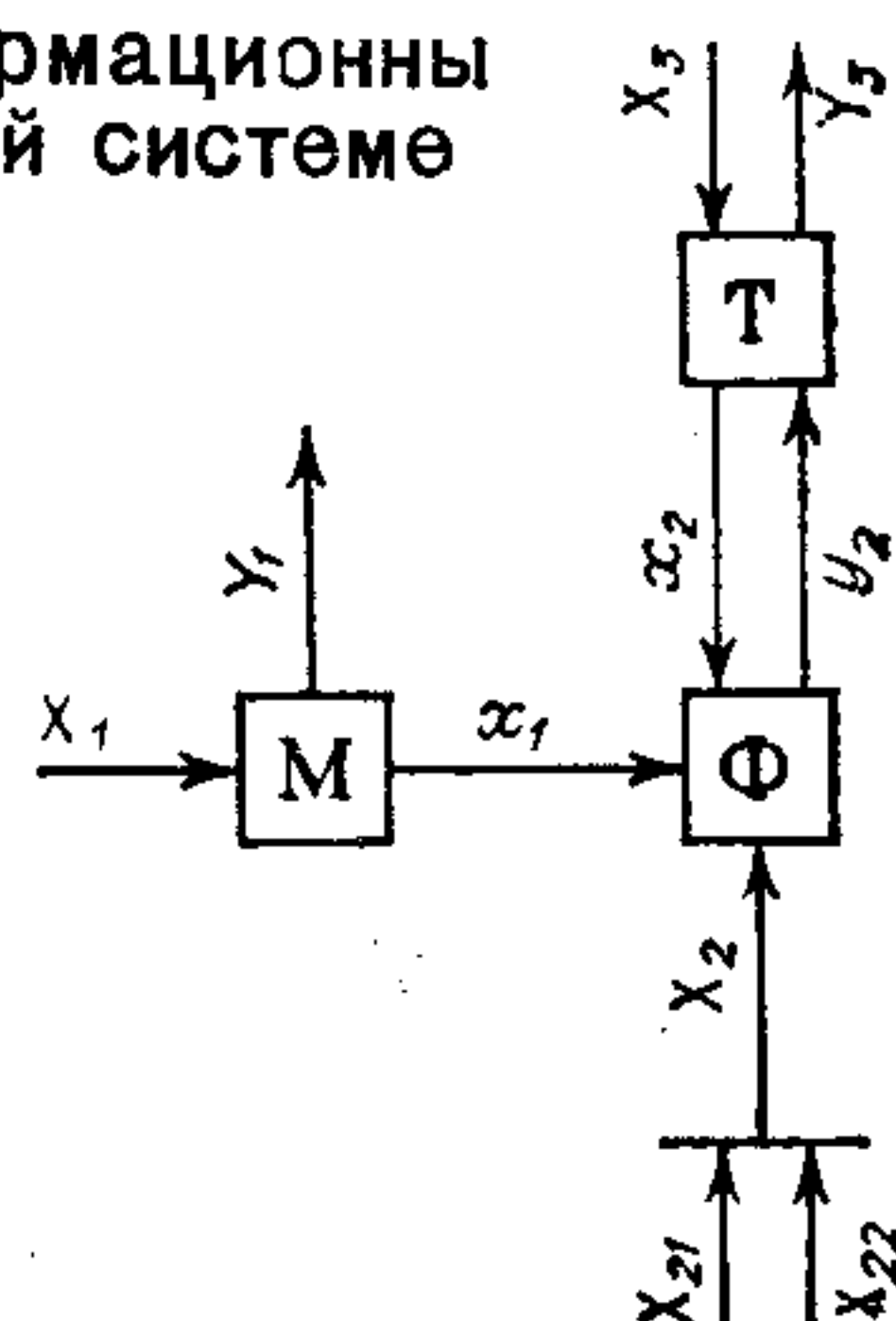


Схема 3. Информационный обмен в литьевой системе



Из схемы 2 видно, что все элементы системы являются одновременно входными и выходными. Термопласт X_{11} и энергию переработки X_{12} можно объединить в общий для машины вход X_1 ; воздействие окружающей среды X_2 является входом для формы, а входом для термостата — подводимая к нему энергия X_3 . Потери при переработке, особенно от цилиндра машины, обозначены выходом Y_1 , а важнейшим выходом системы служит изделие Y_2 (этот выход объединяет: Y_{21} — конструкцию изделия и Y_{22} — отношение площади поверхности изделия к его объему, косвенно характеризующее условия теплообмена с окружающей средой). Внутренние связи системы характеризуются впрыском термопласта в форму x_1 , подачей теплоносителя x_2 и его отводом y_2 . Симметричные относительно главной диагонали матрицы 1 означают непосредственную обратную связь, а 1 в строке и столбце A — окончание процесса. Вход информации X_1 (см. схему 3) включает заданные параметры процесса (температура, давление, скорость, время, путь и др.), вход X_2 для формы объединяет конструкцию изделия X_{21} и отношение площади поверхности изделия к его объему X_{22} (целесообразность учета этого параметра рассматривалась в [2]). Температура и скорость теплоносителя являются входом X_3 для термостата, а внутренними входами системы служат давление и температура расплава x_1 и теплоноситель x_2 . Выход Y_1 — это независимое влияние системы регулирования на заданные параметры, например, температуру зон цилиндра, выход Y_3 — то же, но на термостат; внутренний выход из формы y_2 — температура теплоносителя, воздействующая на реле термостата.

Литьевой процесс подвержен, как отмечалось, нарушениям, действующим на давление и особенно термическое равновесие расплава в гнезде формы. Кратковременные перерывы в работе вызывают длительные нарушения равновесия. Поэтому одинаковые условия литья под давлением — впрыск и термическое равновесие — могут продолжаться лишь с определенной вероятностью. Это стохастический процесс, и он описывается вероятностной матрицей. Проанализируем отдельно процессы впрыска и термического равновесия с точек зрения материального, энергетического и информационного обмена.

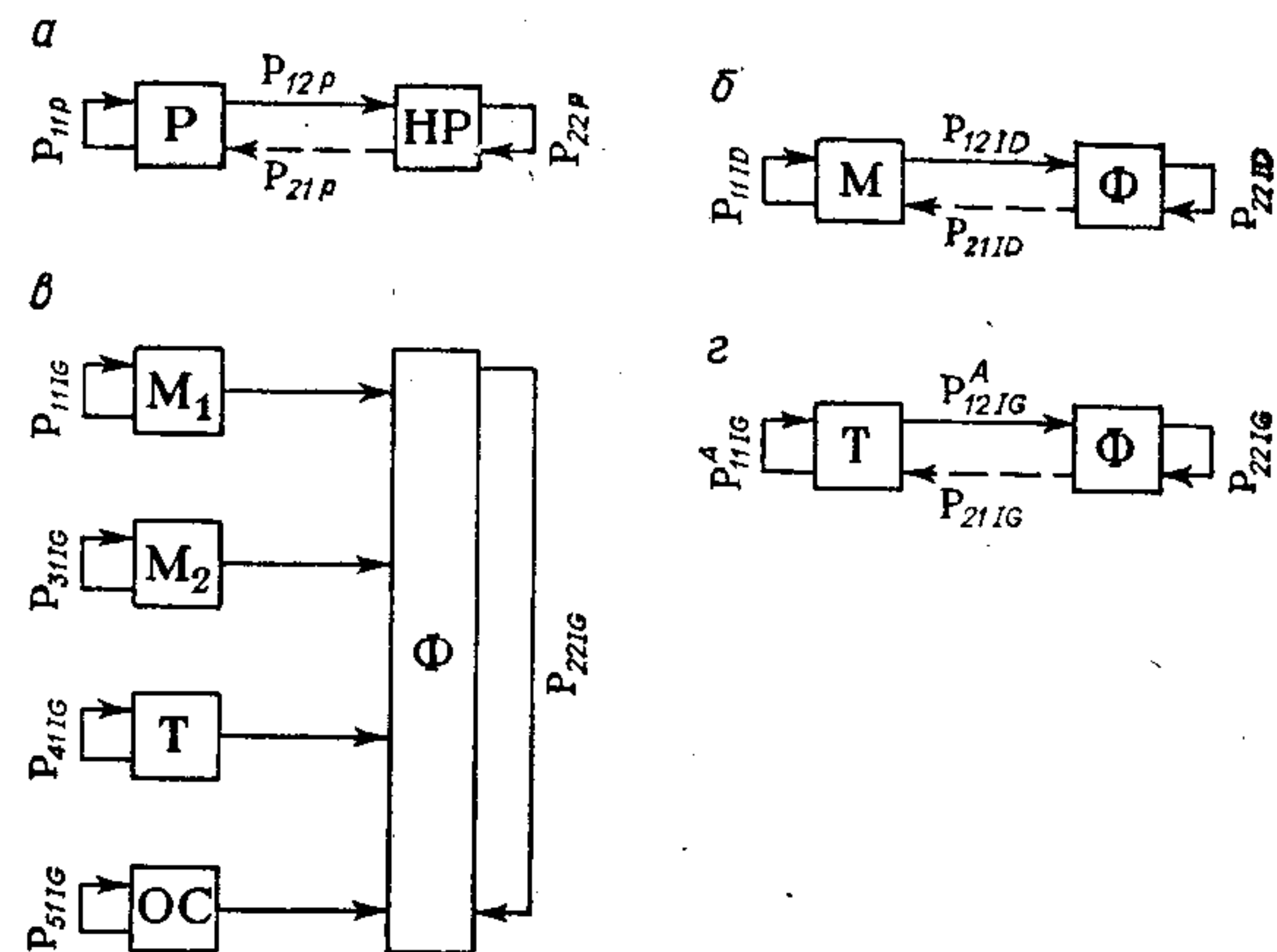
Процесс, реализуемый в литьевой системе, характеризуется схемой 4, а, где P_{11P} и P_{22P} — вероятности соответственно продолжения работы и нарушения, а P_{12P} и P_{21P} — вероятности перехода от работы к нарушению и обратно. Такая система, в которой происходят нарушения, называется «ремонтируемой». Матрица состояния для данного случая

$$P_{1/P} = \begin{pmatrix} P_{11P} = 0,99; & P_{12P} = 0,01 \\ P_{21P} = 0,46; & P_{22P} = 0,54 \end{pmatrix}$$

где цифровые значения получены экспериментально [47].

Схема 4. Диаграммы состояния литейных систем: ремонтируемой (а); с нерегулируемым давлением в гнезде формы (б); при использовании термостата, регулирующего температуру теплоносителя (в); с регулируемой температурой (г).

Условные обозначения. Р—работа; НР—нарушение работы; М—машина; Ф—форма; М₁ и М₂—температура и время работы машины, соответственно; Т—термостат; ОС—окружающая среда.



Из матрицы следует, что необходимый режим впрыска будет осуществляться с вероятностью 99%, а нарушится с вероятностью 1%; в то же время нарушение будет устранено к следующему циклу в 46% и не будет устранено в 54% случаев. Диаграмма состояния для информации в системе с нерегулируемым давлением в гнезде формы представлена на схеме 4, б, а соответствующая матрица:

$$P_{IID} = \begin{pmatrix} P_{11ID} = 0,99; & P_{12ID} = 0,01 \\ P_{21ID} = 0; & P_{22ID} = 1 \end{pmatrix}$$

Передача обратной информации от формы к машине отсутствует ($P_{21ID} = 0$); эффективный процесс информации требует обратной ее передачи и установки в гнезде минимум одного датчика давления. В этом случае диаграмма состояния будет аналогичной приведенной на схеме 4, б с той разницей, что вместо индексов ID будут индексы IR, а $P_{21IR} = 0$. Значение P_{22IR} относят к отклонению давления от заданного, а P_{21IR} — переход к нему. Поскольку экспериментальных данных для этих двух вероятностей нет, последнюю можно принять большей, например, 0,60, так как давление стабилизируется довольно быстро. Матрица записывается так:

$$P_{IIR} = \begin{pmatrix} P_{11IR} = 0,99; & P_{12IR} = 0,01 \\ P_{21IR} = 0,40; & P_{22IR} = 0,60 \end{pmatrix}$$

Разница между P_{11IR} и P_{21IR} есть мера стабильности процесса, и чем она меньше, тем процесс информации стабильнее,

т. е. требуется меньше циклов для восстановления стационарного давления.

Матрица термического равновесия в гнезде формы имеет вид:

$$P_{IG} = \begin{pmatrix} P_{11G} = 0,99; & P_{12G} = 0,01 \\ P_{21G} = 0,09; & P_{22G} = 0,91 \end{pmatrix}$$

Вероятность перехода от остановки или от нарушенного равновесия $P_{21G} = 0,09$ значительно ниже вероятности сохранения равновесия $P_{11G} = 0,99$. Следовательно, необходимо много циклов для восстановления термического равновесия. При анализе состояния термического равновесия в гнезде формы подсчитано, что процесс продолжался в 97%, а термическое равновесие сохранялось лишь в 87% случаев.

Исследование теплового баланса формы, обусловленного ее теплообменом с термопластом, окружающей средой и термостатом, показало, что средняя температура стенки гнезда формы $T_{ср}$ является функцией шести параметров: температуры и скорости теплоносителя, температуры массы и окружающей среды и времени охлаждения и цикла. При использовании термостата, регулирующего температуру теплоносителя на входе, диаграмма состояния выражается схемой 4, в. Здесь представлены вероятности того, что в следующем цикле: P_{11IG} — будет подведена теплота расплава, P_{22IG} — информация останется в гнезде, P_{31IG} — не изменится время охлаждения и цикла, P_{41IG} — теплообмен будет поддержан теплоносителем и P_{51IG} — не изменится теплообмен с окружающей средой. С учетом всех условий матрица температуры формы, действительная для всех сочетаний состояния, будет такой:

$$P_{IIG} = \begin{pmatrix} P_{11IG}^+; & P_{12IG} = 1 \\ P_{21IG} = 0; & P_{22IG} = 1 \end{pmatrix}$$

Температура в форме — нестационарна, изменение входного параметра вызывает новое состояние; при повторном запуске после длительного перерыва литейная система ведет себя как при нерегулируемой температуре формы. Группируя все шесть источников информации для $T_{ср}$, получают:

$$P_{11IG}^A = 1 - P_{12IG}^A$$

где $P_{11IG}^A = P_{11IG} P_{31IG} P_{41IG} P_{51IG}$.

Термоэлемент в гнезде обеспечивает высокую вероятность сигнализации и стационарной температуры; термоэлемент должен лежать на поверхности гнезда или возможно ближе к ней. Пока нет единого мнения, какую из трех температур принять за параметр регулирования: минимальную температуру стенки гнезда, температуру съема изделия или начала смыкания формы. Состояние системы при наличии термостата показано на схеме 4, г, причем $T_{ср}$ регулируется в зависимости от нескольких источников информации.

В настоящее время встречаются следующие литьевые системы: нерегулируемая (наиболее распространена); с регулированием давления в гнезде; с регулированием температуры в гнезде; регулируемая система (регулирование давления и температуры в гнезде). Для последнего варианта особенно необходима ЭВМ (см. стр. 66).

Между давлением и температурой в гнезде существует взаимодействие и нарушение не компенсируется сразу и полностью прямым изменением одного из параметров. Поэтому для многогнездных форм требуется некоторое уточнение определения литьевой системы: регулируемая литьевая система обеспечивает впрыск расплавленной массы в термостатированное гнездо формы и выталкивание охлажденного изделия. Автоматическое ведение процесса литья повышает надежность термического равновесия и исключает необходимость контроля температуры и давления в гнезде в каждом цикле.

СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ, РЕГУЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ

Повышенный уровень точности и качества литых изделий из пластмасс невозможно достичь только за счет оптимизации технологических режимов или использования более совершенного стабильного сырья. При прочих равных условиях это требует существенного же усовершенствования оборудования и, в первую очередь, средств контроля параметров процесса (по отдельности и в комплексе). Некоторые современные средства регулирования и управления отдельными параметрами процесса литья под давлением, описанные более подробно в [48], рассматриваются ниже.

Температура расплава. Как видно из уравнений, приведенных на стр. 46, температура и вязкость в зоне сопла определяются крутящим моментом шнека при пластикации (противодавлением и частотой вращения шнека), пластицируемой дозой расплава (объемом впрыска), температурами зон обогрева.

Поскольку приборов для регулирования вязкости расплава в настоящее время нет, то в качестве характеристики расплава рассматривается его температура, при этом предполагают, что при стабилизации сырья вязкость расплава не будет значительно изменяться.

Температура расплава является важнейшим переменным фактором процесса литья под давлением. На рис. 11 представлены зависимости некоторых показателей качества отливок из полистирола от температуры расплава. Изменение температуры расплава ведет к значительному изменению других переменных факторов литья [49].

В обычных литьевых машинах температура расплава задается произвольно в нескольких зонах отдельно, исходя из температуры стенки материального цилиндра. Такой метод можно назвать независимым. Несостоятельность такого метода регу-

лирования температуры заключается в том, что измерение температуры стенки цилиндра, а не температуры самого материала, ведет к большим погрешностям из-за плохой теплопроводности полимерного материала и невозможности учета воздействия «фона», например, температуры окружающей среды, и потерь теплоты.

В некоторых современных литьевых машинах для контроля температуры расплава применяют термопару, расположенную либо в сопле машины, либо в той части материального цилиндра, которая примыкает к соплу. Монтаж термопары осуществляется так, чтобы горячий спай выходил за пределы поверхности внутренней полости цилиндра не более чем на 1 мм. Необходимо специальное приспособление, с помощью которого

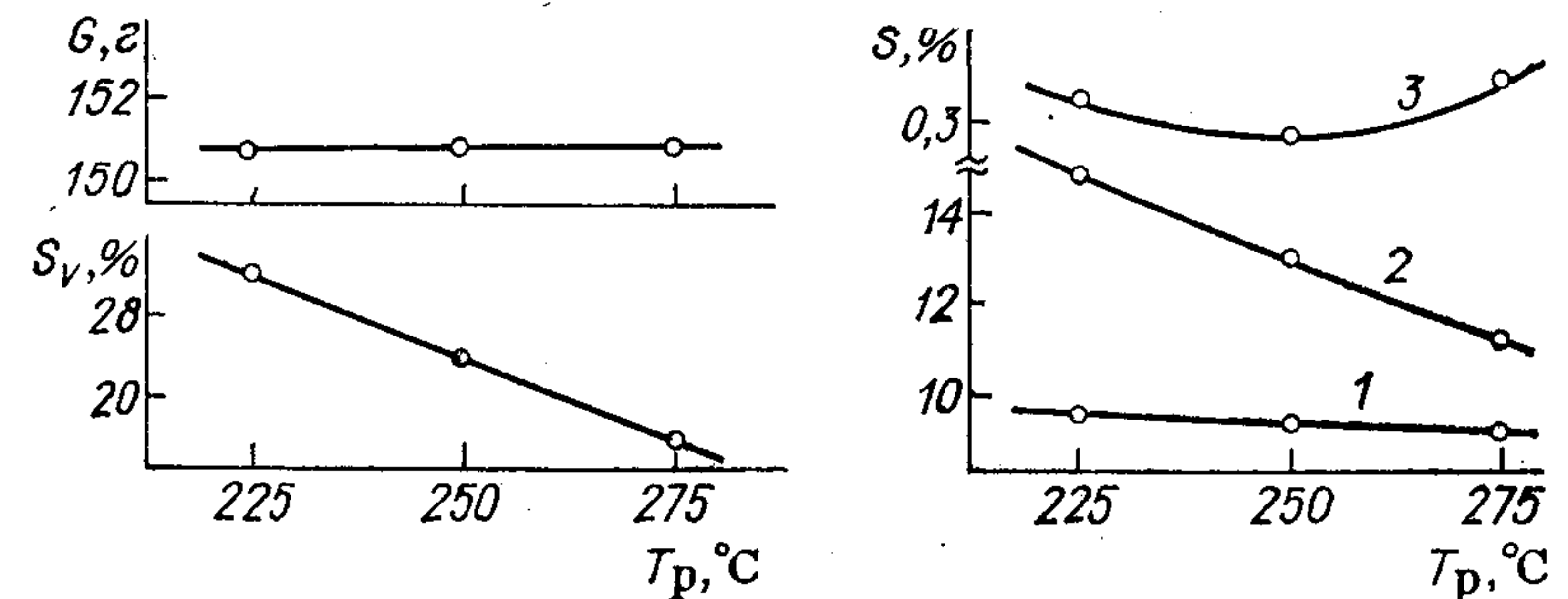


Рис. 11. Зависимость массы G , объемной S_v и линейной усадки S отливок из полистирола от температуры расплава [49]:
1 — по длине; 2 — по толщине вдали от литника; 3 — по толщине у литника.

крепится термопара [50]. Термопара может быть смонтирована в наконечнике шнека.

Наряду с независимым способом регулирования температуры в настоящее время стал применяться каскадный метод [50]. Он повышает качество регулирования температуры и экономичен в потреблении электрической мощности нагревателей зон обогрева. При каскадном регулировании температура расплава является регулируемой величиной более высокого порядка, чем температуры стенки цилиндра в различных зонах. На рис. 12 представлена принципиальная схема каскадного регулирования температуры расплава [51]. На задающем регуляторе $ЗР$ устанавливают требуемое значение температуры расплава $T_{p.з}$. На выходе $ЗР$ преобразует заданный сигнал $T_{p.з}$ в выходную величину, переустанавливающую заданные значения T_{w1} , T_{w2} , T_{w3} . Три вспомогательных регулятора температур стенок цилиндра T_{z1} , T_{z2} и T_{z3} находятся в трех зонах обогрева H_{R1} , H_{R2} , H_{R3} . Тем самым в результате изменения температур цилиндра температура расплава T_p сближается с заданным значением $T_{p.з}$. При нарушениях в подаче материала и при остановке машины цепь регулирования отключается.

Настройка системы регулирования связана с предварительным анализом кривых изменения температур зон обогрева (при нагреве пластмассы) при одинаковой переустановке заданного значения температуры расплава $T_{p.з}$. При этом получают переходную функцию W_H , с которой согласовывается задающий регулятор $ЗР$ (применяются приближенные аналитические и графические методы, известные в теории регулирования).

Более точный метод расчета на основе создания системы уравнений статистических моделей, описывающих изменение температуры расплава по толщине массы материала, находящегося перед шнеком, приведен в [50]. Эта толщина разбивается на три

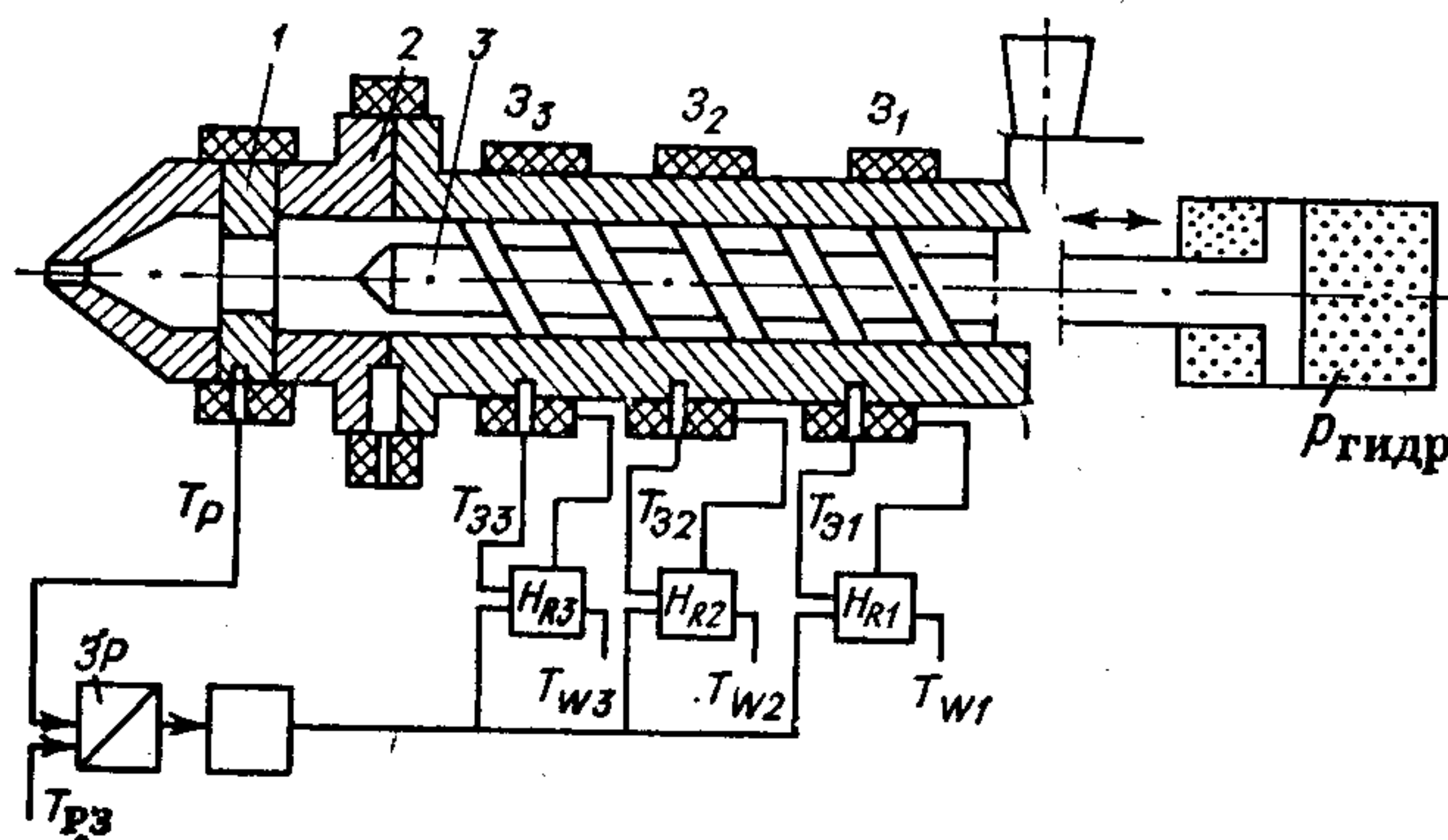


Рис. 12. Принципиальная схема каскадного регулирования температуры расплава:

1 — переходное приспособление от цилиндра к соплу, в котором монтируют датчик температуры расплава; 2 — цилиндр; 3 — шнек.

условных энергетических участка, и для каждой зоны пишется уравнение вида:

$$T_{mi} = V_{i1}P_1 + V_{i2}P_2 + V_{i3}P_3 + T_{pi}$$

где V_{ij} ($j = 1, 2, 3 \dots$) — переходные функции; P_i — мощность обогрева; T_{pi} — составляющая температуры расплава, характеризующая увеличение температуры в результате пластикации.

В данном уравнении показан «вклад» каждой зоны обогрева в увеличение температуры расплава. Для определения переходных функций V_{ij} необходимо проводить соответствующие экспериментальные работы.

Преимущества каскадного метода регулирования T_p заключаются в следующем: 1) вывод температуры на заданное значение осуществляется быстрее на 5—20 мин даже при сильных возмущениях и с меньшими колебаниями температуры; 2) температура расплава контролируется непосредственно; 3) выход из строя одного из нагревателей зон обогрева может легко компенсироваться увеличением мощности обогрева оставшихся нагревателей; 4) регулирование температуры расплава может осуществляться с большой точностью (до $\pm 0,5^\circ\text{C}$ включительно);

5) задающий регулятор $ЗР$ обеспечивает быструю компенсацию возмущений, воздействующих на температуру расплава при постоянных температурах зон цилиндра.

Температура расплава зависит и от противодействия при пластикации. При неизменных температурах цилиндра увеличение противодействия приводит к увеличению температуры расплава на $10\text{—}15^\circ\text{C}$. Зависимость T_p от противодействия является линейной и может быть описана эмпирической формулой, приведенной в [52]. Регулирование противодействия можно проводить, используя рекомендации работы [53].

В литейной форме температуры расплава и охлаждающегося изделия контролируются лишь «пассивно». Применение систем управления температурой в форме сильно усложнило бы систему управления, а из-за влияния многих переменных литья на профиль температур расплава пластмассы в форме сделало бы эту систему мало эффективной. Так как поле температур расплава как по толщине изделия, так и по его поверхности очень сложно и неоднородно, то температуру следует контролировать в той критической точке полости формы, где условия течения расплава и охлаждения самые неблагоприятные, например, в самой отдаленной точке изделия от разводящего литникового канала (см. рис. 11). На практике серьезной проблемой является монтаж термпар для измерения температуры расплава. Применение даже пассивного контроля температуры расплава в форме позволяет обеспечить высокие требования к размерной точности и рационально вести процесс литья.

В ряде современных литейных машин, снабженных системами управления, используется следующий косвенный метод регулирования и управления температурой. Реле-задатчик времени охлаждения отливки имеет устройство, которое связано с устройством контроля температуры расплава в форме. При температуре изделия, равной, например, 40°C , на термопаре возникает соответствующая электродвижущая сила, при усилении которой получают выходной сигнал определенного напряжения. При этом напряжении срабатывают контакты и форма раскрывается.

Контроль температуры полости литейной формы — необходимое условие для получения высококачественных изделий. В современных литейных машинах все чаще наряду с регулированием температуры формы методом изменения расхода жидкости применяется метод термостатирования охлаждающей жидкости с точностью до $\pm(0,5 \div 1)^\circ\text{C}$. Это требует применения термостата, устанавливаемого на литейной машине.

Давление расплава. Для получения высококачественных изделий необходимо знать давление расплава на всех стадиях процесса литья. Применяемые методы контроля гидравлического давления при впрыске с помощью манометров дают минимальную информацию о динамике процесса литья. При этом рассматривают только стадию впрыска и не учитывают

гидравлическое сопротивление при передаче давления от гидроцилиндра через шнек, сопротивление расплава; гидравлическое сопротивление полостей формы, особенности течения данного материала. На практике для точного определения $t_{впр}$, $t_{выд}$, $t_{охл}$ необходимо знать, заполнена ли полость формы или нет, каков характер изменения давления в полости формы при выдержке под давлением и при охлаждении. Следовательно, необходимо измерять давление расплава, а не давление в гидросистеме, при этом необходимо регистрировать давление непрерывно, или, по крайней мере, в нескольких точках, так как одного значения недостаточно, чтобы характеризовать процессы, происходящие в форме.

Для измерения давления в форме используют два метода: прямое измерение с помощью мембранных датчиков с пьезоэлементами, преобразующими микродеформацию в электрический сигнал, и косвенное измерение по деформации штифтов, установленных в сталкивающей плите, замеряемой тензодатчиками [54]. Мембранные датчики монтируют заподлицо с поверхностью формы. Такой способ хорошо зарекомендовал себя в практике лабораторных и опытных исследований. Однако мембранные датчики не выдерживают пока длительной эксплуатации в промышленном производстве.

Давление расплава связано с изменением других переменных факторов литья, например давления в гидросистеме, микродеформаций литейной формы при впрыске («дыхание формы»), скорости впрыска, температуры расплава.

Давление впрыска взаимосвязано со скоростью впрыска, зависит от конструктивных особенностей формы. Качественно стадия впрыска описывается уравнением Хагена — Пуазейля [54]:

$$p_{р.ф} - 1 = c \bar{\eta}_s \bar{v}_{впр} t_{впр}$$

где $p_{р.ф}$ — давление расплава в форме; $\bar{\eta}_s$ — средняя кажущаяся вязкость расплава; $\bar{v}_{впр}$ — средняя скорость впрыска; c — константа, учитывающая конструктивные особенности формы.

С уменьшением скорости впрыска возрастает время охлаждения из-за увеличения вязкости расплава при впрыске в форму, поэтому снижается максимальное давление. Чем толще становится охлаждающийся поверхностный слой, тем труднее передается давление расплава из срединного слоя на чувствительный элемент датчика давления.

При постоянном давлении впрыска изменение давления подпитки приводит к изменению характера кривой давления в литейной форме (повышение давления подпитки способствует дальнейшему уплотнению материала, компенсации усадки поверхностного слоя), к увеличению времени выдержки под давлением и значительно влияет на изменение усадки изделия.

Процесс изменения давления в литейной форме с момента впрыска до извлечения изделия из формы можно разделить на стадии впрыска $\Delta p_{р.ф} = f_1(v_{впр}, T_p)$; переходную стадию, или

стадию уплотнения, $\Delta p_{р.ф} = f_2(p_{гидр}, \Delta T_{р.ф})$ и последнюю квазистатическую стадию $\Delta p_{р.ф} = f_3(p_{гидр}, \Delta T_{р.ф})$.

Давление масла в гидроприводе изменяется в две ступени соответственно давлению впрыска $p_{впр}$ и давлению подпитки $p_{п}$ (см. схему управления давлением в полости формы на рис. 13). Продолжительность действия давления в гидроприводе регулируют изменением времени переключения $t_{пер}$, т. е. изменением времени впрыска, уплотнения и времени выдержки под давлением. Тогда имеем:

$$p_{гидр} = f(p_{впр}, p_{п}, t_{пер}, t_{впр})$$

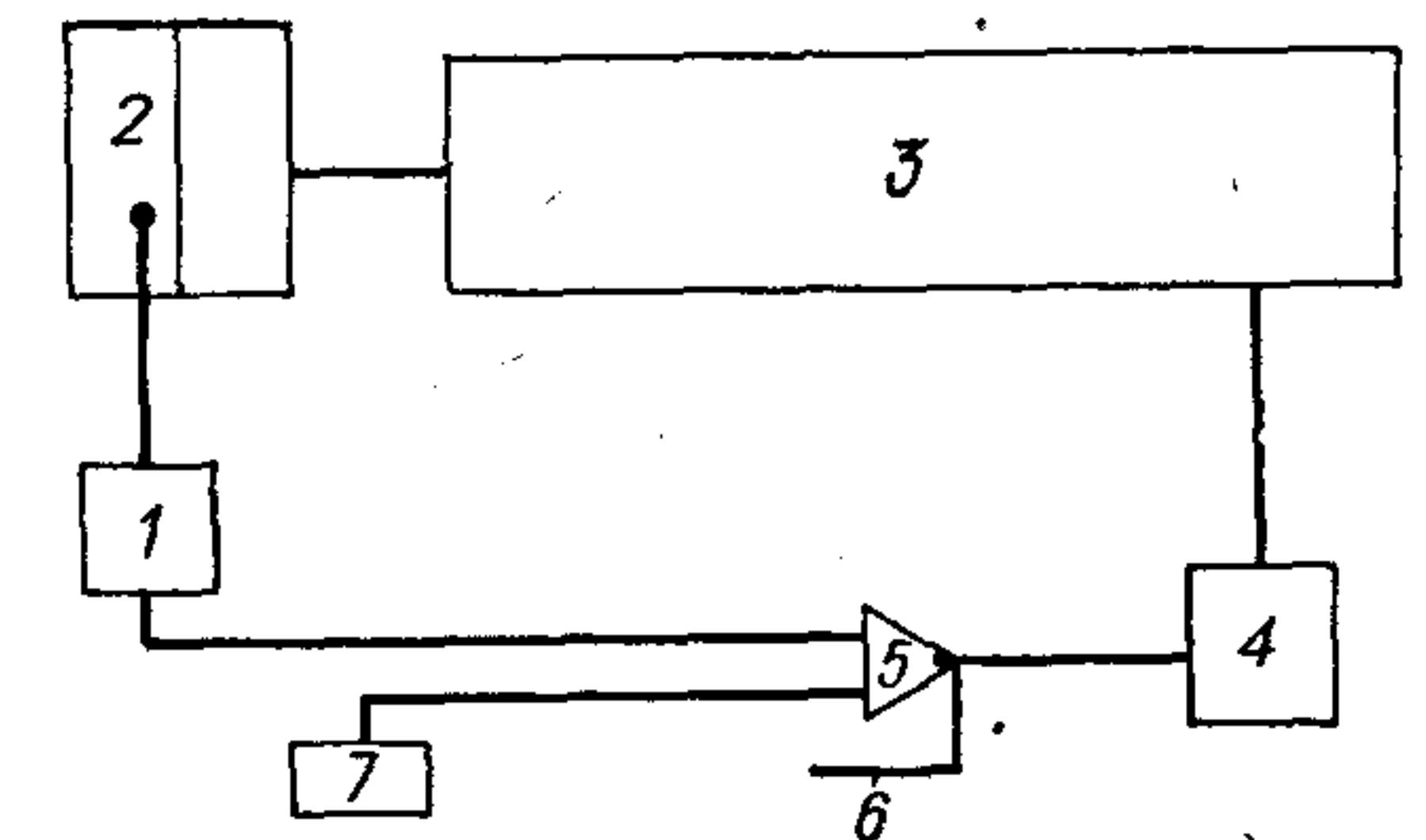
После отвода узла пластикации от формы давление в ней определяется профилем температур охлаждающегося изделия:

$$\Delta p_{р.ф} = f(\Delta T_{р.ф})$$

Давление, передаваемое на тензометрический датчик (см. рис. 13), преобразуется в электрический сигнал, который срав-

Рис. 13. Схема управления давлением в полости формы:

1 — датчик давления и предварительный усилитель; 2 — форма установки давления и контроля за ним; 3 — материальный цилиндр литейной машины; 4 — распределительный сервоклапан; 5 — программируемая сервосистема; 6 — сигнал управления; 7 — датчик установки давления и контроля за ним.



нивается в программируемой сервосистеме с заданным давлением в форме. Распределительный сервоклапан, управляющий расходом и давлением масла, в данной схеме является исполнительным механизмом. Для контроля давления в форме чаще всего выбирают максимальное давление $p_{р.ф. макс}$. Приборы, применяемые для контроля $p_{р.ф. макс}$, фиксируют изменение давления в форме при впрыске и сравнивают истинное значение с заданным [54, 55]. По разности давлений автоматически с помощью сервоклапана изменяются расход и давление масла в гидросистеме. Корректировка проводится после завершения подпитки и реализуется в следующем цикле литья при впрыске, поэтому гидросистема оборудуется двухпозиционными сервоклапанами, которые автоматически переключаются со стадии «впрыск» на стадию «подпитка». Такое переключение положено в основу регулирования давления впрыска с помощью прибора «Дупас» (фирмы «Дайниско», США). Для преодоления сопротивления литниковой системы при большой скорости впрыска часто требуется значительно большее давление, чем при подпитке, поэтому, если принято за максимальное давление $p_{р.ф. макс}$, то уже в начале стадии впрыска часть масла в гидросистеме через клапан ограничения давления начинает сбрасываться в бак, скорость осевого перемещения шнека падает. К тому же показания

приборов, осуществляющих регулирование «от цикла к циклу», дают слишком широкий диапазон разброса фактических значений $p_{р. ф. макс}$.

Недостатки регулирования способом от «цикла к циклу» устранены в другом приборе «Dynas-Controller» той же фирмы. Блок-схема прибора и принцип регулирования представлены на рис. 14. С помощью этого прибора регулируют $p_{р. ф. макс}$ и давление в гидросистеме $p_{гидр}$. Данная схема регулирования позволяет работать при любом давлении в гидросистеме, но после заполнения и уплотнения расплава в полости формы давление в гидросистеме резко падает и поддерживается на определенном

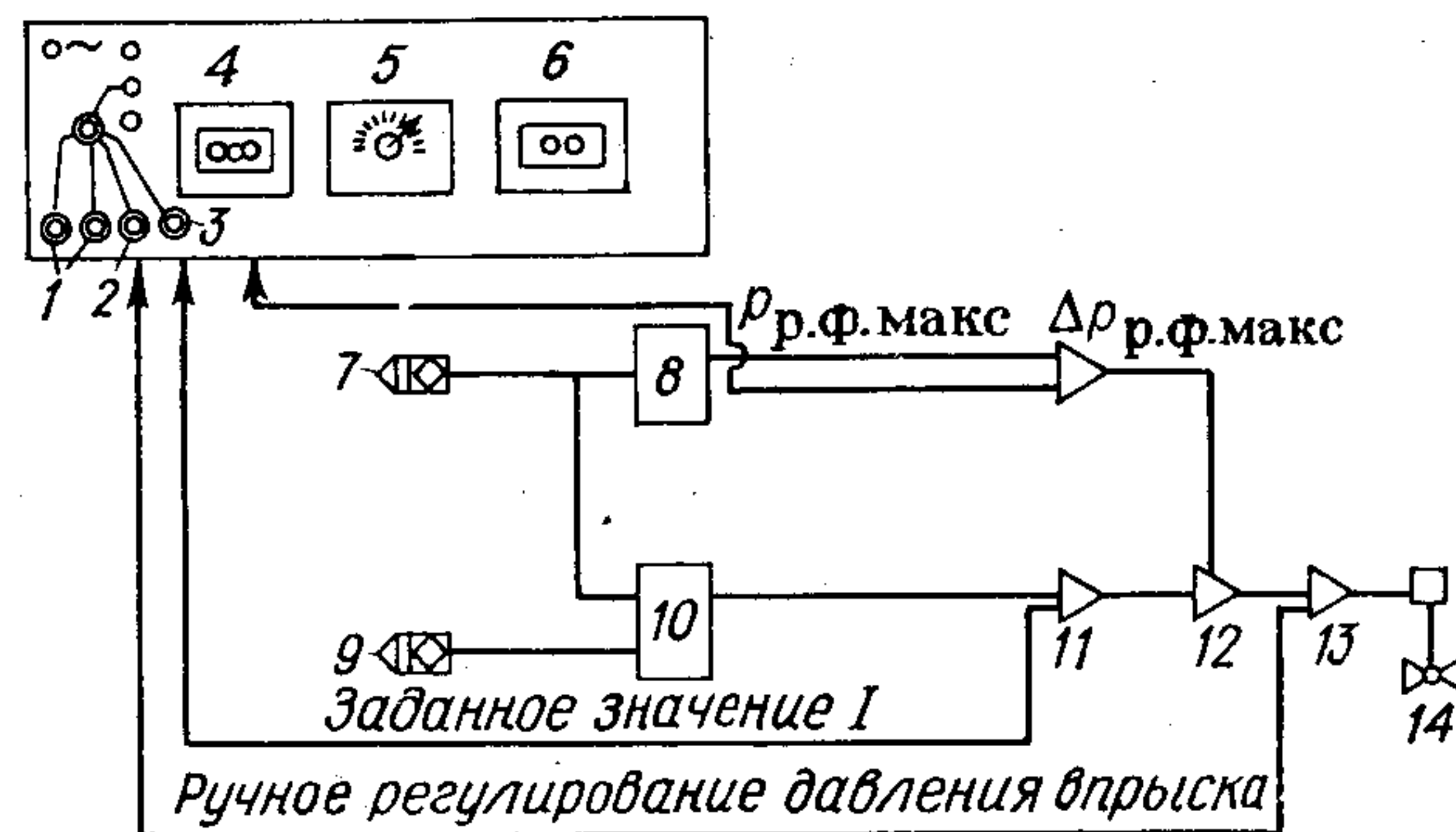


Рис. 14. Блок-схема прибора «Dynas-Controller», управляющего величиной максимального давления в форме:

1 — потенциометры «установка на нуль»; 2 — ручка регулировки давления; 3 — ручка калибровки; 4 — прибор контроля давления в форме; 5 — прибор установки давления подпитки на стадии «выдержка под давлением»; 6 — прибор контроля противодействия; 7 — датчик давления расплава в форме; 8 — блок сравнения; 9 — датчик давления в гидросистеме; 10 — логическое цифровое устройство; 11 — устройство для задания показателя I ; 12 — согласующее регулирующее логическое устройство; 13 — сервоклапан; 14 — электрогидравлический клапан.

уровне (рис. 15) до конца подпитки. Оптимальный ход кривой давления выбирают при наладке и поддерживают постоянным. В момент времени t_1 достигается давление в гидросистеме p_{t_1} , необходимое в начале стадии впрыска. Давление в литейной форме p_{t_2} при заполнении соответствует моменту времени t_2 ; для обеспечения давления в форме p_{t_2} необходимо давление гидросистемы p_{t_3} . Давление p_{t_4} максимальное в литейной форме ($p_{t_4} = p_{р. ф. макс}$). Регулирование по кривой давления осуществляют с помощью величины «показатель процесса» I . Показатель процесса рассчитывают на основе давления p_{t_1} , p_{t_2} и p_{t_3} отрезков времени $t_2 - t_1 = \Delta t = t'$. Обозначим $p_{t_3} - p_{t_2}$ через $\Delta p_{р. ф. макс}$. Величину I вычисляют по формуле:

$$I = \{K_1 (t' \pm \Delta t) + K_2 (\Delta p_{р. ф. макс} \pm \Delta [\Delta p_{р. ф. макс}])\} K_3 \lg (p_{р. ф. макс} \pm \Delta p_{р. ф. макс})$$

где K_1 , K_2 , K_3 — константы, устанавливаемые при наладке прибора и работе с каждой литейной формой на определенном полимере.

Значения Δt и $\Delta p_{р. ф. макс}$ рассчитывают при наладке машины. В зависимости от отклонения этих величин $[\Delta(\Delta t)]$ и $[\Delta(\Delta p_{р. ф. макс})]$ дается электрический сигнал для перестройки соответствующих задвижек сервоклапана. Если от заданного значения отклоняется $p_{р. ф. макс}$, то регулирование осуществляется по системе «от цикла к циклу» корректировкой последнего члена уравнения только в следующем цикле литья [49].

Переключение со стадий «впрыск» на «подпитку», применяемое в обычных машинах, необорудованных перечисленными выше приборами, осуществляется концевым выключателем при определенном осевом перемещении червяка или с помощью обычного реле времени. Эти методы неточны, так как ошибка во времени всего на 0,5 с приводит к изменению $p_{р. ф. макс}$ на 4,5 МПа, а также к изменению характера кривой дав-

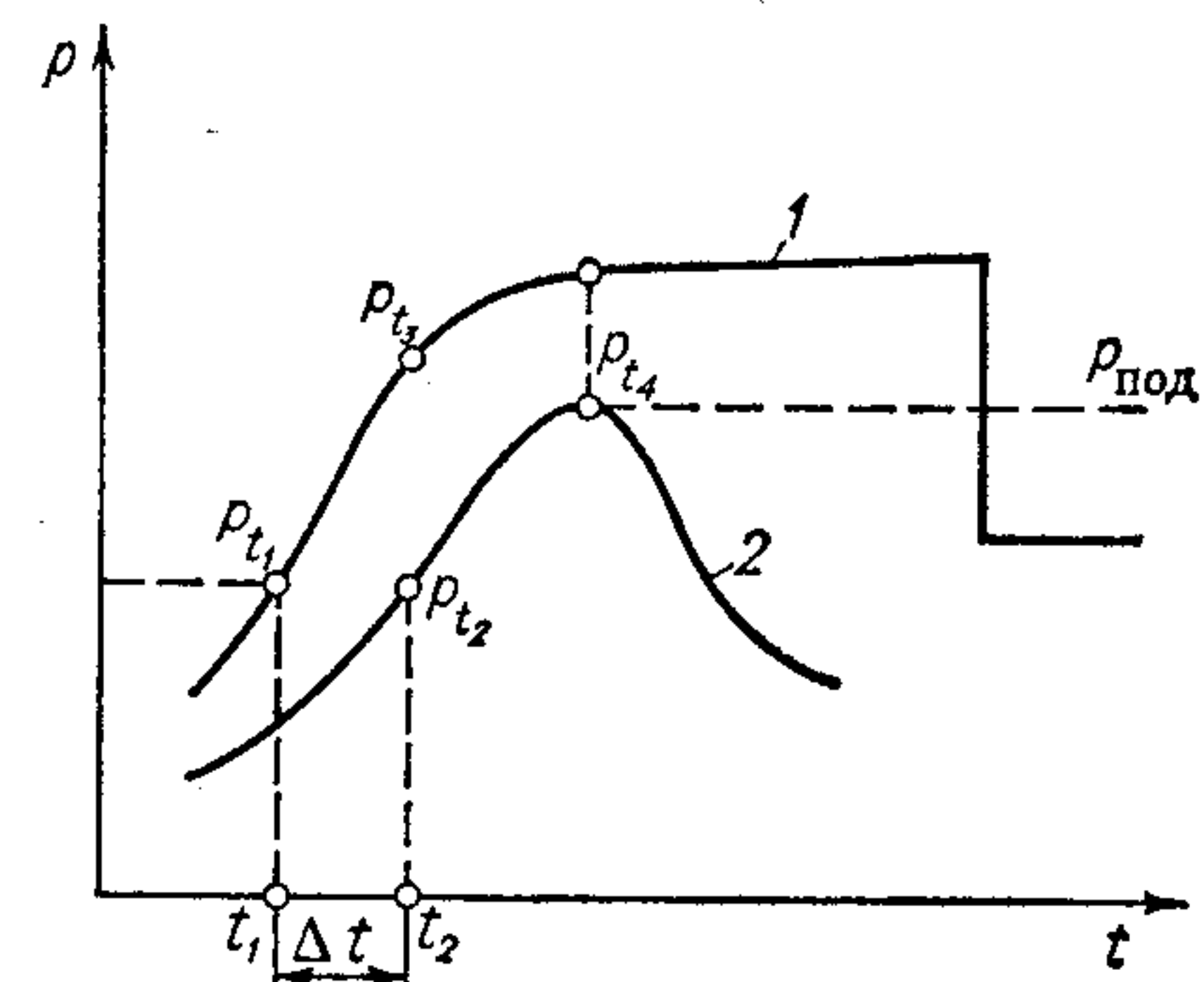


Рис. 15. Диаграмма изменения давления в гидросистеме (1) и в форме (2) при впрыске и подпитке.

ления. С использованием специальных приборов максимальное давление воспроизводится более точно.

Время переключения с «впрыска» на «подпитку» значительно влияет на характер изменения давления в литейной форме, а также и на время выдержки под давлением, время охлаждения, показатели качества изделий (массу, усадку), так как термодинамическое состояние расплава в разных частях полости формы будет различным.

Скорость впрыска. Скорость впрыска наиболее полно характеризует процесс заполнения формы. В начале заполнения формы общее сопротивление течению незначительно; скорость может быть настолько большой, что гидравлическая система литейной машины не в состоянии ее обеспечить. Когда форма заполняется при постоянной объемной скорости течения расплава, определяемой производительностью гидронасоса и возрастающим гидравлическим давлением, имеет место «течение, контролируемое машиной».

Если при заполнении формы расплавом сопротивление полости возрастает настолько, что сравняется с установленным давлением в гидроцилиндре, то течение расплава в форме, скорость которого определяется уже сопротивлением формы, называют «течением, контролируемым формой». При этом виде

течения движение шнека замедляется. До окончания хода форма заполняется при постоянном или переменном давлении впрыска и уменьшающейся объемной скорости.

Скорость впрыска при режиме *течения, контролируемого машиной* влияет на изменение давления в форме и, естественно, на изменение показателей качества изделий. Кривые давления при уменьшении скорости заполнения формы сдвигаются в сторону больших значений времени. Следует заметить, что под скоростью впрыска понимают объемную скорость (количество материала, входящего в полость формы в единицу времени) и скорость перемещения шнека при впрыске. Эту объемную скорость определять и контролировать очень сложно (из-за малого времени впрыска, изменения от цикла к циклу давления и температуры, а следовательно, и вязкости, также сложно регулировать и управлять ею в процессе литья. Под скоростью впрыска будем подразумевать скорость перемещения шнека. Скорость впрыска $v_{впр}$ характеризуется путем впрыска $S_{впр}$ (длина перемещения шнека при впрыске, зависящая от объема впрыска) и временем впрыска $t_{впр}$.

$$\begin{cases} S_{впр} = \int_0^{t_{впр}} v_{впр} dt \\ p_{впр} = f(t_{впр}) \end{cases}$$

Эта система уравнений справедлива для режима *течения, контролируемого машиной*; из нее видно, что косвенное регулирование скорости впрыска осуществляется через время впрыска $t_{впр}$, точность поддержания которого влияет на $v_{впр}$.

Величину $t_{впр}$ преобразуют в электрический сигнал. В результате получают зависимости отклонения скорости впрыска при отклонении времени впрыска от заданного. Время контролируется реле времени, которое дает сигнал на регулирующее устройство. Постоянство пути s обеспечивается концевым выключателем, который останавливает ход шнека по достижении заданного значения s . Однако такой способ управления скоростью впрыска неэффективен, так как значительное влияние на точность регулирования оказывает наличие «мертвого времени» в начальной стадии впрыска и сложный характер изменения давления в форме при подпитке.

Регулирование и управление скоростью впрыска в режиме *течения, контролируемого формой*, осуществляется делением хода шнека на несколько участков и задания на этих участках определенных значений скорости впрыска и давления впрыска. Переход скоростей впрыска и давлений впрыска с участка на участок может проводиться плавно или ступенчато. Применение этой системы управления (программирования) скоростью впрыска обусловлено стремлением повысить размерную точность изготовления изделий; предотвратить появление трещин на поверхности изделий и дефектов (заусенцев, швов, коробления); сокра-

тить цикл литья за счет повышения скорости впрыска на отдельных участках; сократить брак [56].

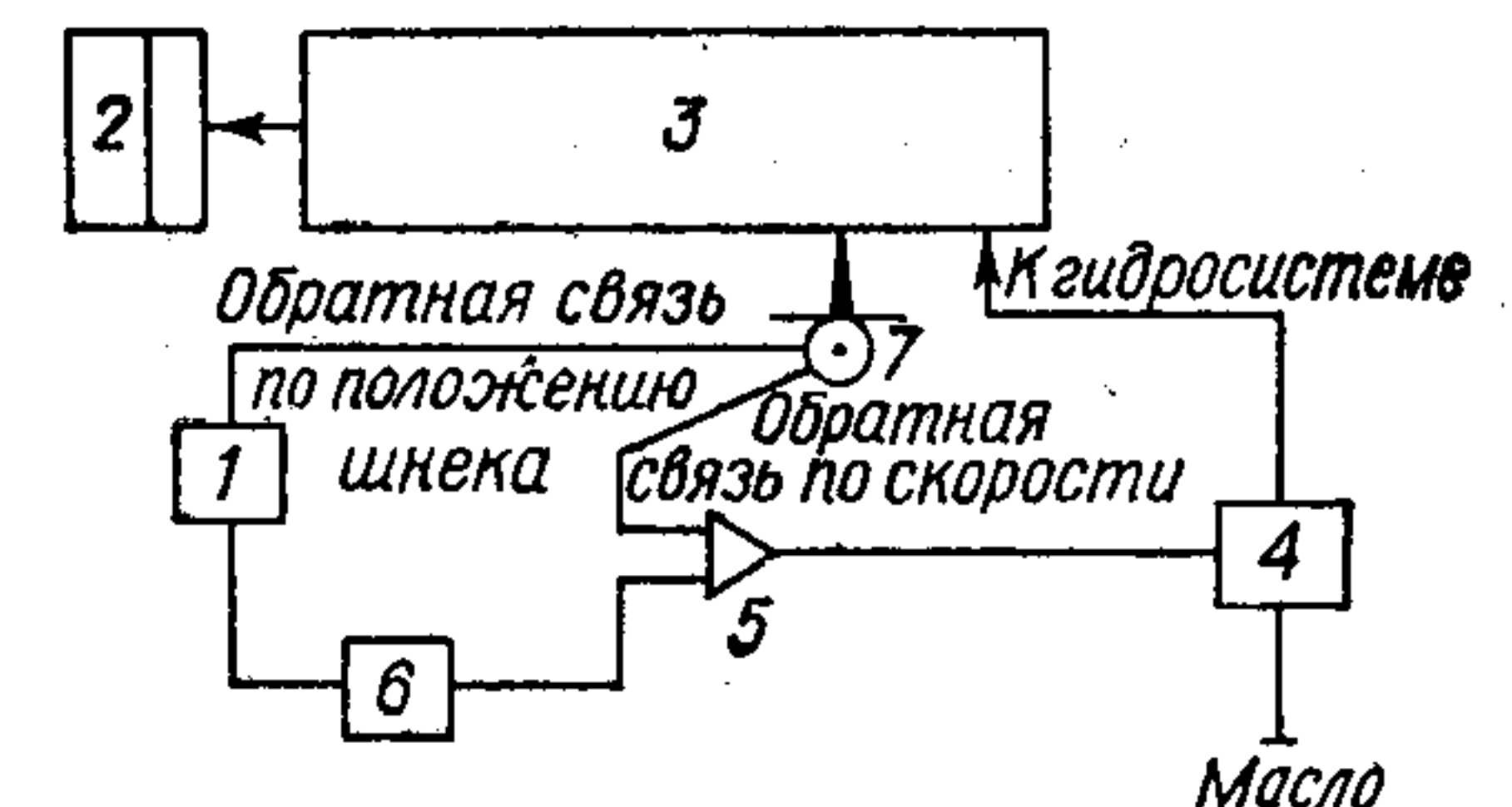
Вначале применяли для программирования впрыска рычажный механизм, соединенный со шнеком.

В устройстве «Injectrol» для программного управления скоростью впрыска, примененном на литейной машине IS80A (фирма «Тосиба», Япония), скорости впрыска на четырех участках хода перемещения шнека устанавливают уже с помощью электронных блоков, которые преобразовывают заданные на шкале панели величины в скорости впрыска и обеспечивают линейную зависимость показаний шкалы со скоростями впрыска.

Кроме того, имеются другие устройства, в которых использована та же схема программного управления скоростью впрыска. При помощи одного из них можно автономно задавать

Рис. 16. Схема управления скоростью впрыска при режиме «течения, контролируемого формой»:

1—блок установки участков хода шнека (синхронизация скорости впрыска на соответствующем участке); 2—форма; 3—материальный цилиндр литейной машины; 4—распределительный сервоклапан; 5—блок управления сервоклапаном; 6—блок установки скоростей впрыска на участках; 7—датчик скорости и положения шнека.



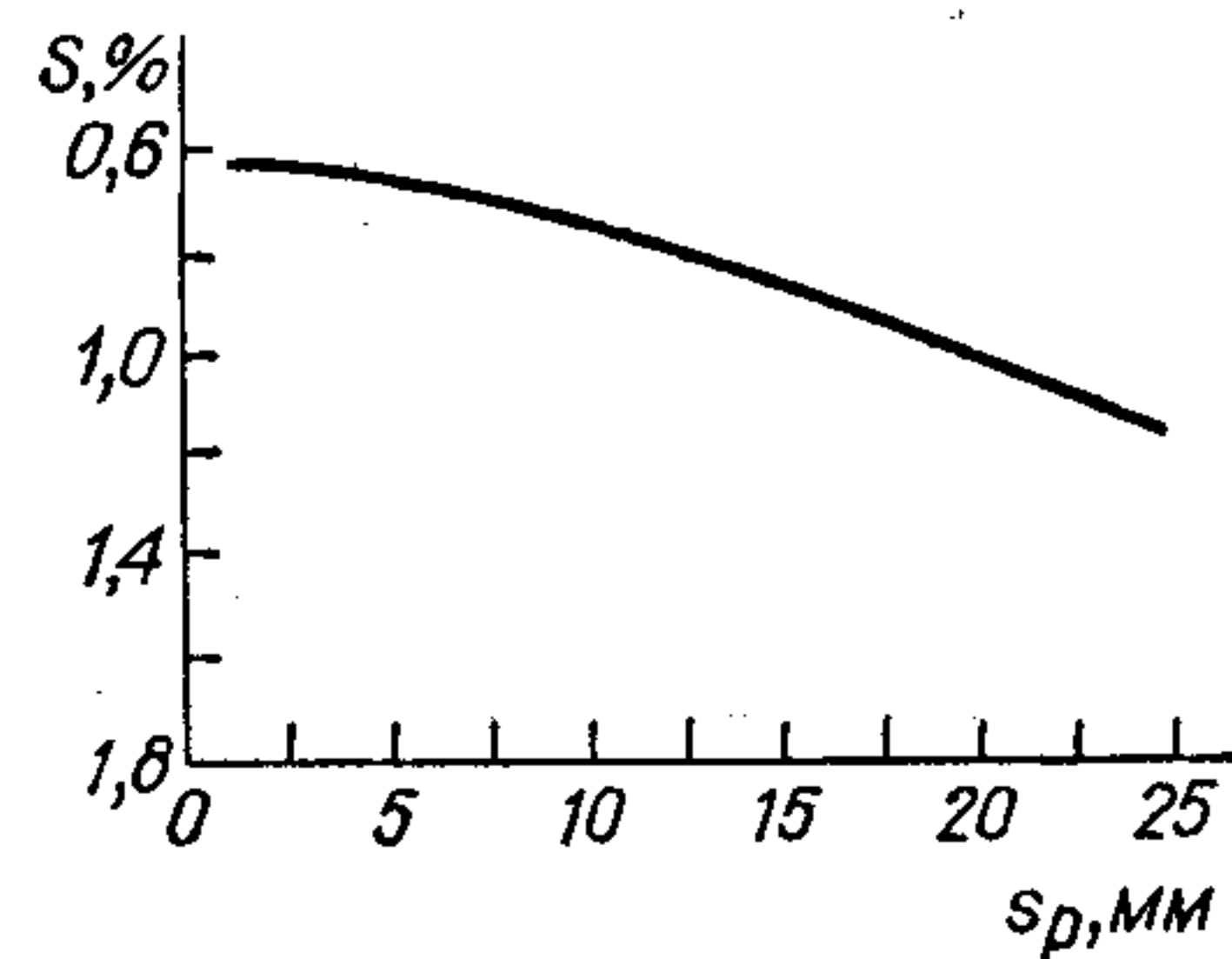
$v_{впр}$ на десяти участках [57]. В приборах в качестве объекта управления использована скорость осевого перемещения шнека. Приборы можно эксплуатировать на литейных машинах средней мощности при времени впрыска от 1 до 1,4 с, а на литейных машинах малой мощности — при времени впрыска более 0,5 с. При меньшем времени впрыска на качество изделия начинает влиять нестабильность работы регуляторов устройства [54]. На рис. 16 показана схема управления скоростью впрыска с помощью одного из таких устройств фирмы «Ханкар», США.

Объем впрыска. Для обеспечения стабильности массы и усадки изделий необходимо поддерживать плотность расплава в форме на определенном уровне. Но из-за неоднородности вязкости расплава удельный объем его изменяется. Следовательно, для компенсации изменения плотности необходимо регулировать объем впрыска. Этот же эффект достигается косвенно поддержанием постоянной толщины подпорного слоя и давления в полости формы. Зависимость усадки изделия от толщины подпорного слоя (рис. 17) свидетельствует о необходимости стабилизации этой переменной процесса литья [57].

Схема управления объемом впрыска на основе регулирования давления в форме и толщины подпорного слоя представлена на рис. 18. При изменении вязкости расплава (следовательно, и изменении объема впрыска) возможен случай, когда объем впрыска будет слишком велик. При этом максимальное давление в форме будет достигнуто до того, как шнек займет

конечное положение, соответствующее заданной толщине подпорного слоя. Блок управления вырабатывает сигнал на уменьшение объема впрыска в следующем цикле с целью сохранения заданной толщины подпорного слоя.

При снижении объема впрыска из-за возрастания вязкости расплава шнек достигнет своего конечного положения (в соответствии с заданной толщиной подпорного слоя) до достижения



в форме требуемого максимального давления. В этом случае в следующем цикле объем впрыска увеличивают до заданных значений давле-

Рис. 17. Зависимость усадки изделия из полиэтилена низкого давления от величины подпорного слоя при постоянном давлении в форме.

ния и толщины подпорного слоя. Достоинством данного устройства является возможность регулирования объема впрыска вследствие изменения температурных условий и состояния расплава.

Для качественного заполнения литевой формы необходимо поддерживать толщину подпорного слоя, равную 6—8 мм [58].

Другой способ управления объемом впрыска основан на контроле «дыхания» (микрораскрытия) формы при ее заполнении [54]. Отклонения от определенной опытным и заданной величины «дыхания» формы регулируются специальным прибором по изменению объема впрыска. Контроль «дыхания» формы дает косвенную информацию о степени ее загрязнения. «Дыхание» формы однозначно связано с давлением расплава в полости формы. Однако колебания этой величины замерить с достаточной точностью очень сложно. Для этого применяется прецизионный индуктивный датчик с точностью измерения выше 1 мкм, который соединен с электронным блоком. По такому же принципу работает прибор «Injectmaster» фирмы «Тосиба», Япония [54].

Возможности регулирования и управления процессом литья под давлением с помощью ЭВМ. Выше были рассмотрены методы и соответствующие устройства для регулирования и управления отдельными переменными факторами процесса. Гораздо более эффективны системы, предусматривающие регулирование и управление несколькими переменными факторами.

Применение ЭВМ для регулирования и управления несколькими переменными факторами обусловлено тем, что при создании автономной системы с обратной связью для точного регулирования каждого из переменных факторов, последняя была бы существенно более дорогой. Преимуществом ЭВМ является и то, что она способна учитывать взаимосвязь переменных факторов процесса литья. Например, при изменении температуры

расплава сигналы поступают на исполнительные механизмы, управляющие температурой расплава, давлением в форме, объемом и скоростью впрыска.

Первые сведения о применении ЭВМ к регулированию и управлению процессом литья, насколько известно, появились в 1968 г. [59].

Блок управления состоит из датчика контроля размеров изделий, ЭВМ с блоком сопряжения (интерфейс), телетайпа и пульта управления машиной. Готовое изделие вставляют в контрольный датчик размеров, сигналы с которого подаются на пульт

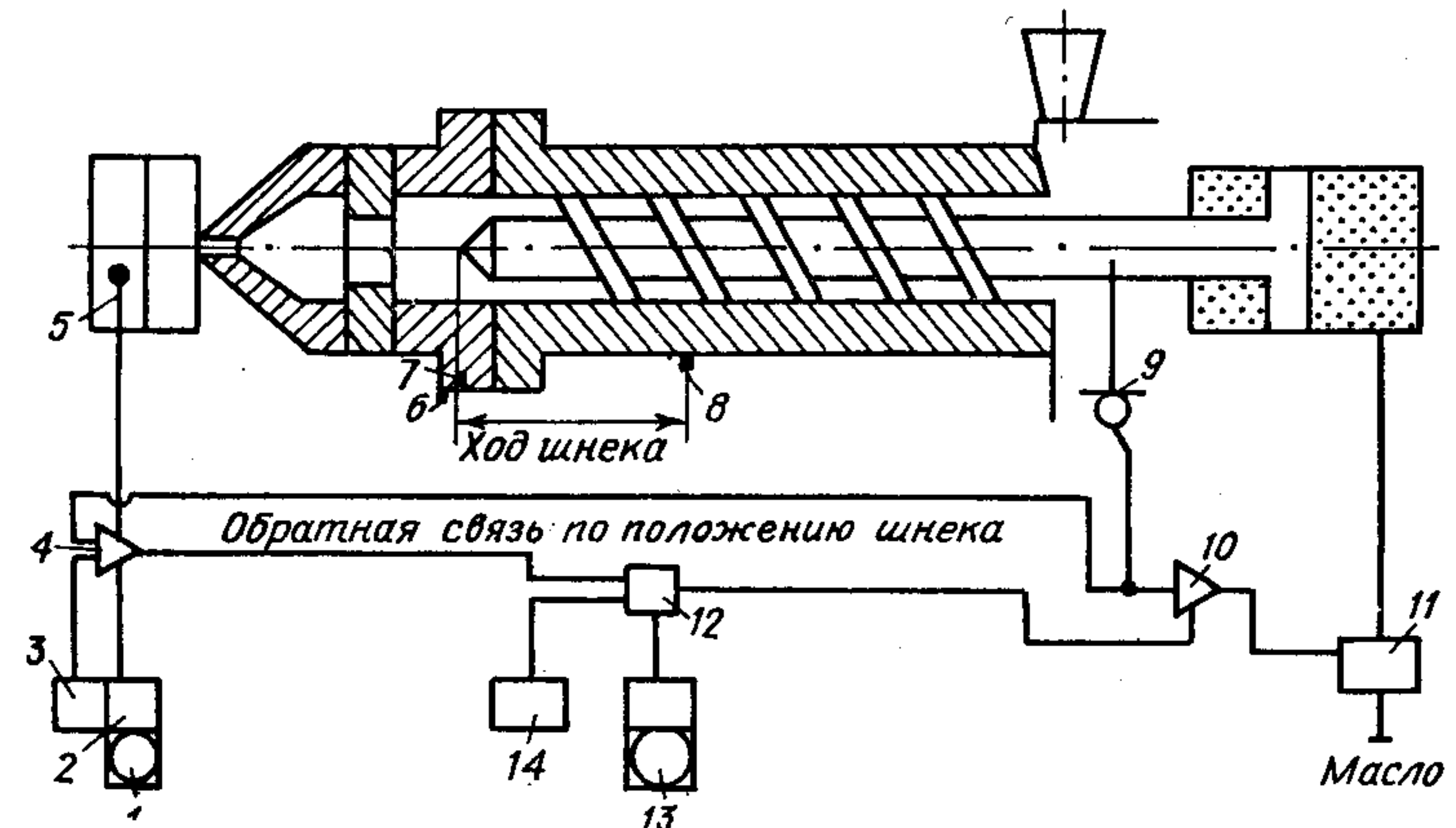


Рис. 18. Схема управления объемом впрыска, осуществляемая регулировкой подпорного слоя и давления:

1—устройство коррекции толщины подпорного слоя; 2—блок связи объема с подпорным слоем; 3—блок установки толщины подпорного слоя; 4—блок регулирования объема впрыска; 5—датчик давления в форме (соединенный с устройством обратной связи); 6—ограничитель хода шнека; 7—ограничитель толщины подпорного слоя; 8—регулятор начального положения шнека при впрыске; 9—датчик положения шнека и скорости впрыска; 10—блок управления сервоклапаном; 11—распределительный сервоклапан; 12—устройство памяти; 13—блок установки объема впрыска; 14—устройство обратной связи по объему впрыска.

управления. Если размеры изделия выходят из заданного поля допуска, то вырабатывается сигнал на пульте управления, преобразуется в интерфейсе в аналоговый сигнал, который поступает на ЭВМ, и ЭВМ устанавливает, какие переменные факторы процесса литья вышли из заданных допусков, а затем посылает сигнал, преобразуемый в интерфейсе, на пульт управления, откуда производится команда исполнительным механизмом для регулирования соответствующих переменных факторов. На телетайп постоянно выводится информация: находятся ли размеры изделия в допуске, а если нет, то какие переменные факторы изменены.

В качестве гидропривода литевой машины, управляемой от ЭВМ, была использована система с электрогидравлическим насосом, с высоким к. п. д. (около 90%), большой мощностью и производительностью (170 л/мин). В электрогидравлическом насосе направление, расход, скорость подачи массы могут

дистанционно регулироваться с помощью вспомогательного сервомотора, где положение золотника определяется положением регулирующего четырехходового клапана.

Как показано на блок-схеме гидравлической системы литьевой машины, управляемой ЭВМ (рис. 19), когда поток масла от сервонасоса направлен в сторону *А*, узел смыкания запирает литьевую форму, затем может быть выбрана с помощью переключателя соответствующая стадия — впрыск или пластикация. Поток масла от насоса в сторону *В* гидросистемы обуславливает прекращение подачи давления на стадии *А*, узел смыкания раскрывает литьевую форму. Скорость любой из стадий можно плавно изменять в пределах рабочего диапазона с помощью

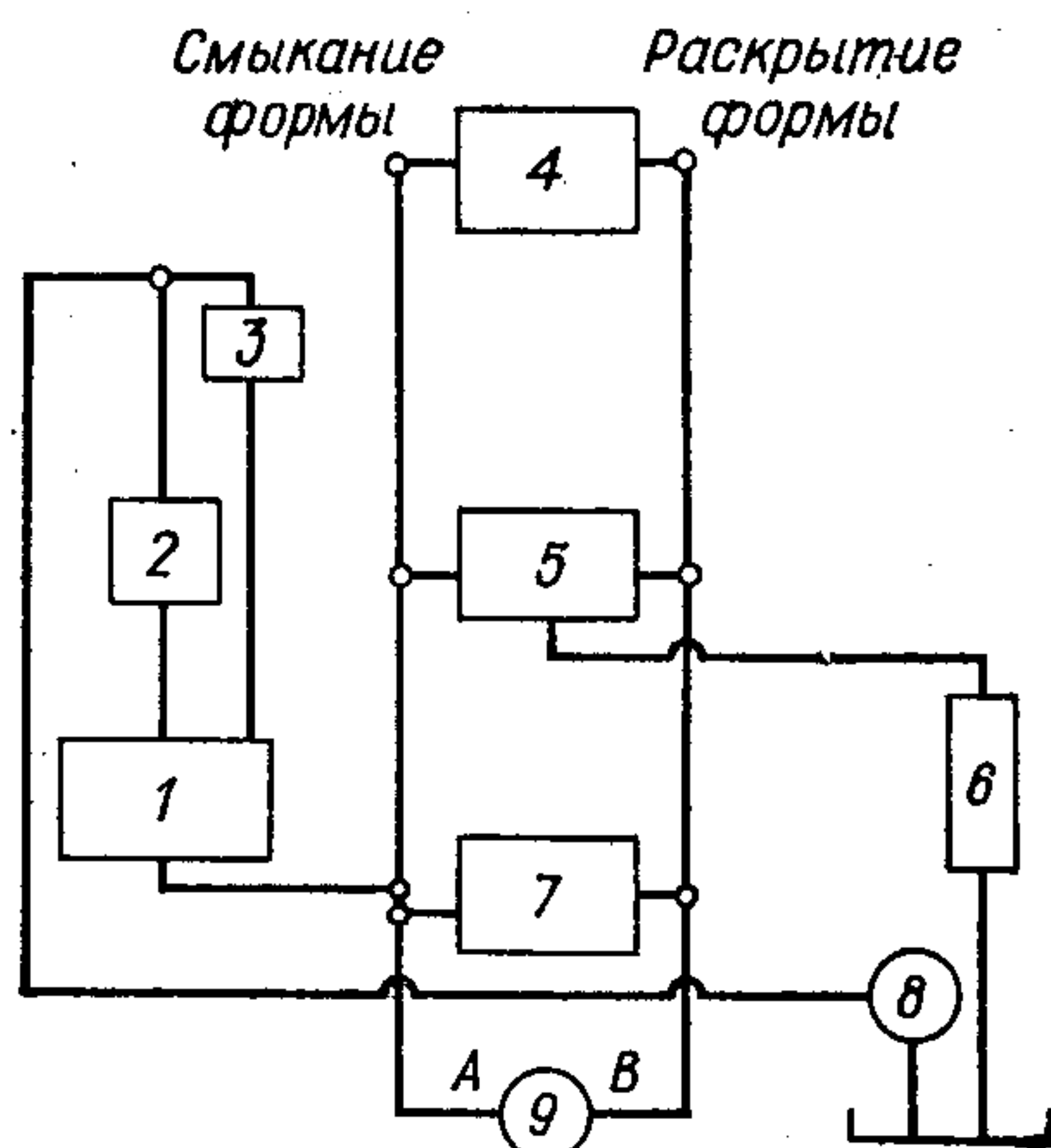


Рис. 19. Блок-схема гидравлической системы литейной машины при управлении с помощью ЭВМ:

1—переключатель на впрыск и пластикацию; 2—узел пластикации; 3—узел впрыска; 4—гидропривод механизма пластикации и впрыска; 5—распределительный клапан избытка масла; 6—узел охлаждения и очистки масла; 7—предохранительный клапан высокого давления и распределительный клапан; 8—насос подпитки; 9—серво-насос.

Насос подпитки подает масло в распределительную цепь подпитки. Эта цепь направляет масло в соответствующие узлы и обеспечивает предохранительный контроль по максимально допустимому давлению. В этой гидросистеме с замкнутым контуром избыток масла направляется через распределительный клапан для избытка масла, а далее в бак, пройдя перед этим очистку и охлаждение.

Систему управления можно представить в виде: блоков установки заданных значений переменных факторов и допустимых границ их изменения; блоков обратной связи с датчиками действительных значений переменных; блоков сравнения действительных значений переменных факторов с заданными; блоков, где вырабатывается сигнал управления, поступающий на исполнительный механизм для корректировки изменения переменного фактора. Блок сравнения действительных величин с заданными называют интегрирующим (суммирующим) блоком. Операционный усилитель увеличивает суммированный сигнал и подает ток соответствующей силы (командный сигнал), например, на сервонасос. Когда командный сигнал будет равен сигналу обратной связи (но противоположен по знаку), сервонасос остановится.

В системе управления переменными факторами (рис. 20) используются усилители двух типов — линейный и интегрирующий. Командные сигналы, вырабатываемые блоком установки положения шнека (объема и скорости впрыска), усиливаются линейным усилителем, который подает выходной сигнал на сервоклапан, регулирующий скорость смыкания формы и скорость впрыска. Командные сигналы от блока установки давления поступают на интегрирующий усилитель, который подает выходной сигнал на соответствующую систему регулирования. Интегрирующий усилитель может также соотносить входной сигнал

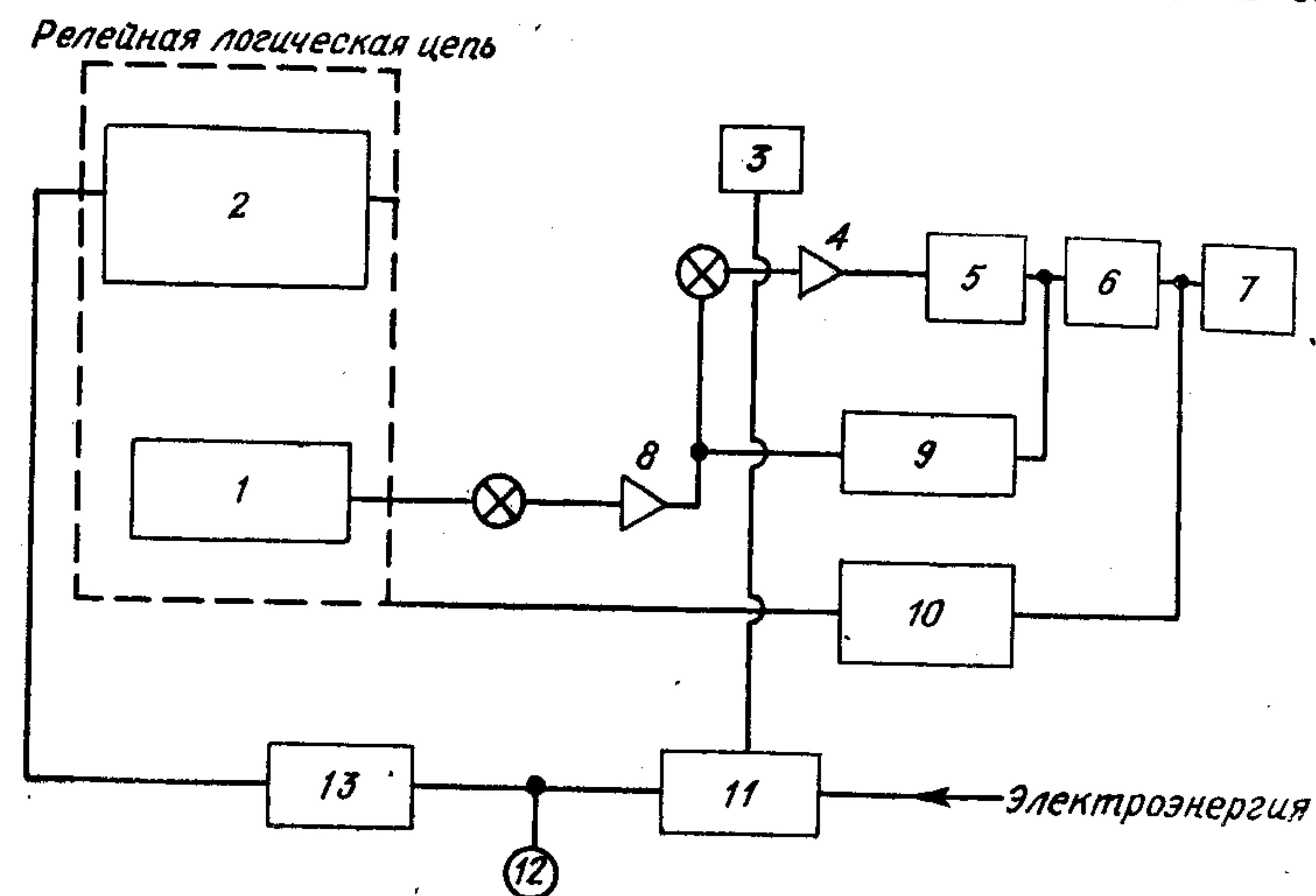


Рис. 20. Блок-схема управления переменными факторами процесса литья с помощью ЭВМ:

1—блок установки давления расплава в форме; 2—блок установки объема впрыска и скорости впрыска (положение шнека); 3—нуль-детектор; 4—линейный усилитель; 5—сервоклапан; 6—гидропривод; 7—нагрузка; 8—интегрирующий усилитель; 9—узел обратной связи по положению шнека; 10—узел обратной связи по давлению; 11—устройство для контроля исправности гидросистемы; 12—первичный двигатель; 13—блок питания.

давления со временем. Выходной сигнал интегрирующего усилителя пропорционален интегралу от времени суммированного сигнала (сумма сигналов от блока установки и блока обратной связи). Сигнал на управление давлением является более важным, чем сигнал на управление объемом и скоростью впрыска. Когда сигналы обратной связи по давлению указывают, что давление достигло заданного значения, интегрирующий усилитель вырабатывает сигнал, который почти полностью усиливает линейный усилитель. В результате золотник сервоклапана приводится в положение, при котором поддерживается установленное давление, независимо от заданных специальными блоками объема и скорости впрыска (или положения шнека). Нуль-детектор при нулевом напряжении включает или выключает сервоклапан.

В общем, применение системы управления литьевой машиной с помощью ЭВМ дает значительные технико-экономические преимущества.

МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ТОЧНОСТИ

Известно, что точность технологических процессов может быть определена двумя путями: теоретическим (расчетным) и экспериментальным (статистическим). Первый путь является проектным, проводимым заблаговременно, второй реализуется уже в производственных условиях.

Теоретический расчет точности, а он может быть осуществлен расчетно-аналитическим или вероятностным методами, предполагает полную детерминированность процесса. Уравнения, которыми можно оперировать в данном случае, как правило, технически четко определены, но имеют достаточно сложную структуру и слабо отражают фактические условия, так как основываются на многочисленных допущениях и обобщениях. Для детерминированного процесса при одном и том же комплексе исходных условий при каждом последующем расчете должно получать одинаковый результат. Однако вообще реальные процессы не могут быть правильно отображены детерминированными моделями и обоснованность их применения зависит от степени изученности исследуемого процесса.

Технология литья изделий из пластмасс пока еще не изучена в той мере подробно (и в требуемом направлении), чтобы теоретические расчеты точности деталей из пластмасс были плодотворными. Ведь для этого потребовалось бы последовательное математическое описание исходных погрешностей и их инверсий (превращений) на всех стадиях технологического процесса, а затем запись аналитических закономерностей для расчета точности изделия. Обращаясь к описанным выше особенностям усадки и превращения, происходящим с пластмассами при переработке, можно понять, что выполнение необходимых этапов исследований для расчетно-аналитического метода анализа точности технологического процесса в данном случае представляется нерациональным. К тому же, как показывает опыт машино- и приборостроения, этот метод позволяет рассчитывать погрешность единичного изделия. По ней и судят о точности всего процесса, что не всегда надежно.

Вероятностные методы теоретических расчетов позволяют охватывать все практически возможные и важные комбинации условий хода технологического процесса. Но вероятностная модель должна содержать законы распределения характеристик систематического изменения размеров и рассеяния погрешностей обработки как для выборочных партий изделий, так и для процесса в целом. Для построения такой модели применяют методы статистического моделирования (например, метод Монте-Карло).

Вероятностные методы по сравнению с расчетно-аналитическими позволяют получать более оптимальные результаты [60]. Применительно к технологии переработки пластмасс, в том числе литьем, вероятностные методы практически не используются из-за отсутствия надежной информации о законах распределения, но работы в этом направлении ведутся.

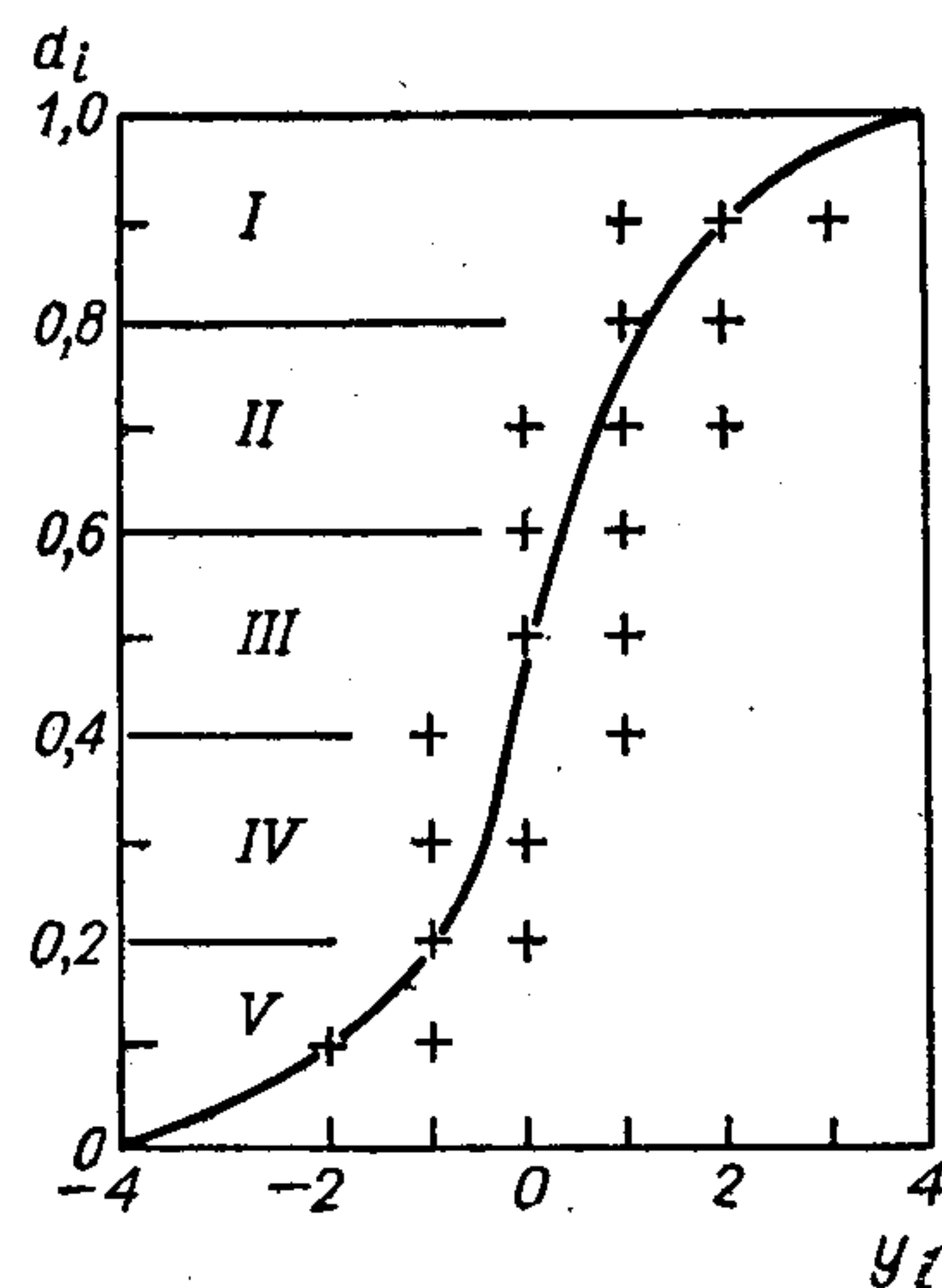
Экспериментальное исследование точности отличается простотой структуры моделей (которыми описываются либо отдельно технологические операции, либо весь процесс), полностью согласующихся с фактическими данными (чего лишены, как отмечалось, теоретические модели). Однако следует помнить и об ограничениях, присущих экспериментальному пути. Дело в том, что техническое обоснование его не всегда достоверно, так как диапазон изменений экспериментальных данных, используемых для статистического анализа, ограничен реальным ходом процесса. При сборе данных часто трудно исключить их перемешивание, так что они могут принадлежать разным массивам (операциям, процессам, партиям изделий), трудно также разделять такие смешанные данные, а из-за этого можно прийти к ошибочным выводам. Сбор технологической информации при экспериментальном исследовании точности в производственных (да и лабораторных) условиях затруднителен, а понятное стремление к уменьшению объема информации связано с получением менее надежных результатов. Однако это затруднение благодаря применению специальных устройств, регистрирующих, накапливающих результаты измерений и передающих их на обработку постепенно отпадает.

Экспериментальное исследование точности имеет целью, как правило, создание статистической модели. И лабораторное, и производственное исследования обычно базируются на трех основных факторах: физических особенностях процесса, элементах статистической теории, позволяющей разработать модель, соответствующую реальному ходу процесса; возможностях регулирования и управления данным процессом. Статистические методы широко известны и применимы для анализа и моделирования технологических процессов [61]. К этим методам относят*: 1) анализ кривых распределения (гистограмм) и точностных диаграмм; 2) одномерный корреляционный анализ; 3) множественный регрессионный анализ; 4) метод экспоненциального сглаживания; 5) дисперсионный анализ; 6) метод математического планирования эксперимента; 7) основной факторный анализ; 8) методы теории массового обслуживания (в том числе методы распознавания); 9) метод дискриминантных функций (многомерный дискриминантный анализ).

* Порядок перечисления соответствует частоте употребления методов для анализа технологических процессов; моделирование процесса управления наиболее часто проводят с помощью экспоненциального сглаживания и множественного регрессионного анализа.

Наиболее широко для оценки, расчета и экспериментального исследования точности изготовления изделий из пластмасс использованы кривые распределения и точностные диаграммы [4], множественный регрессионный анализ и планирование эксперимента. Опыт моделирования процесса управления изготовлением изделий из пластмасс в отечественной промышленности еще приобретает, отдельные примеры относятся только к непрерывным процессам [62].

На производстве, особенно если исследование точности изготовления изделий предпринято с целью ликвидации брака, перед выбором того или иного метода статистического анализа необходимо провести причинно-следственный анализ ситуации. Естественно, для этого должны использоваться информацию о переменных факторах процесса (см. стр. 45), а также исходить из



других возможно существующих связей. Форма проведения анализа может быть различна, она помогает установить факторы, подлежащие первоочередному исследованию. Выбрать фактор — значит одновременно и выбрать способ воздействия на технологический процесс, так как этот фактор необходимо контролировать, и он должен допускать воз-

Рис. 21. Функция и шкала желательности:

I — допустимо и превосходно; II — допустимо и хорошо; III — допустимо и достаточно; IV — плохо, V — очень плохо.

можность изменять его значения (уровни). Но факторы могут быть не только количественными, но и качественными (например, цвет изделия, наличие или отсутствие охлаждения литьевой формы, тип хладагента и т. д.). В последних случаях (да и вообще для изучения априорной информации о технологическом процессе) можно использовать функцию и шкалу желательности. Каждый измеренный (или оцененный иначе) фактор y_i (или показатель свойств) преобразовывается по пятибалльной системе (от «допустимо и превосходно» до «очень плохо»), а затем строится частная функция желательности (рис. 21). Для этого интервал возможного изменения y_i устанавливают в пределах $y_{i \max}$ и $y_{i \min}$; вводят безразмерные параметры

$$Y_i = \frac{-y_i - y_{i0}}{\Delta y_i}$$

где $y_{i0} = (y_{i \max} + y_{i \min})/2$; $\Delta y_i = (y_{i \max} - y_{i \min})/8$. Тогда $d_i = \exp(-e^{-Y_i})$.

Иногда удается объединить несколько показателей в одном комплексном параметре — обобщенной функции желательности $D = \sqrt[n]{d_1 d_2 \dots d_n}$, где n — число параметров y_i . Для этого с помощью графика на рис. 21 каждому значению y_i ставится в соответствие значение d_i . Следует отметить, что функция D — это своего рода модель, и она может быть оптимизирована с помощью известных методов оптимизации статистических моделей, (например, движением по градиенту — крутым восхождением), однако получаемые при этом результаты чрезвычайно ограничены.

В порядке подготовки к дальнейшему подробному исследованию (и на основании использования функции желательности) может быть применено априорное ранжирование факторов, т. е. упорядочение списка факторов по ожидаемой степени их влияния [63]. Хотя этот прием применяют обычно в связи с планированием эксперимента, его целесообразно проводить и в сочетании с корреляционным и регрессионным анализами [64].

Прежде чем перейти к анализу отдельных примеров экспериментального исследования точности литых изделий из пластмасс, необходимо еще раз подчеркнуть разницу между лабораторным и промышленным экспериментами. Как правило, в лаборатории получают информацию, используемую в дальнейшем при проектировании заводского технологического процесса. Поэтому в лабораторной практике шире, чем на производстве, нашли применение методы математического планирования, предполагающие, что возможно создать определенные искусственные варианты процесса. Промышленный эксперимент должен отражать специфику технологического процесса. Условия его проведения должны давать возможность: производства информации вместе с товарной продукцией; выделения полезного сигнала по исследуемому параметру; осуществления обратной связи, а также адаптации к постоянно изменяющимся условиям ведения технологического процесса и другим изменениям (сырье, износ оборудования, смена времен года и др.). Подробно эти вопросы изложены в [64].

Пример исследования точности отливок в лабораторных условиях [65]. Исследовали отливки из кристаллизующихся термопластов (полиэтилена высокой и низкой плотности, полипропилена).

Предварительно устанавливают вид функций, описывающих усадку S и колебание усадки ΔS . Они отражают, как правило, влияние только тех переменных, которые можно контролировать и регулировать в данных реальных условиях:

$$S = f(p, t_{\text{выд}}, T_{\text{ф}}, T_{\text{р}}, \text{ПТР}, \text{П}, K, h)$$

$$\Delta S = \sqrt{\Delta p^2 + \Delta t_{\text{выд}}^2 + \Delta T_{\text{ф}}^2 + \Delta T_{\text{р}}^2 + \Delta E_{\text{П}}^2 + [f(p, t_{\text{выд}}, T_{\text{ф}}, T_{\text{р}}, E_{\text{П}})]^2}$$

где p — давление, МПа; $t_{\text{выд}}$ — время выдержки под давлением, с; $T_{\text{ф}}$ — температура формы, °С; $T_{\text{р}}$ — температура расплава, °С; ПТР — показатель текучести расплава, г/10 мин; П — тип полимера; K — конфигурация изделия; h — толщина изделия, мм; $E_{\text{П}}$ — условный комплексный параметр, отражающий влияние реологических и теплофизических свойств полимера.

Как видно из уравнения для ΔS , природа его возникновения зависит от колебания факторов p , $t_{\text{выд}}$, $T_{\text{ф}}$, $T_{\text{р}}$, $E_{\text{П}}$ на разных стадиях переработки из-за непостоянства свойств полимера, а именно $f(p, t_{\text{выд}}, T_{\text{ф}}, T_{\text{р}}, E_{\text{П}})$, а также от колебания этих же факторов за счет неprecизионной работы регулирующих приборов и узлов машины. Это одновременно показывает, что уменьшения ΔS можно достичь совершенствованием приборов и оптимальным выбором режима и сырья.

Выбор математической модели, как отмечалось, зависит от сложности функции объекта исследования и априорной информации о нем. В данном случае при фиксированном (определенном) материале и образце (конфигурация и толщина) информация, например, об усадке была достаточной для выбора линейной модели с членами парных взаимодействий (ниже в скобках указаны соответствующие X_i -тым именованные переменные):

$$S = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i < j}^k b_{ij} X_{ij} =$$

$$= b_0 + b_1 X_1 (t_{\text{выд}}) + b_2 X_2 (p) + b_3 X_3 (T_{\text{ф}}) + b_4 X_4 (T_{\text{р}}) +$$

$$+ b_{12} X_1 X_2 (t_{\text{выд}}, p) + b_{13} X_1 X_3 (t_{\text{выд}}, T_{\text{ф}}) + b_{14} X_1 X_4 (t_{\text{выд}}, T_{\text{р}}) +$$

$$+ b_{23} X_2 X_3 (p, T_{\text{ф}}) + b_{24} X_2 X_4 (p, T_{\text{р}}) + b_{34} X_3 X_4 (T_{\text{ф}}, T_{\text{р}})$$

Число опытов определяли по формуле [66]: $N = 2^i$, где i — число факторов, включенных в модель.

Тогда при $i = 4$, $N = 2^4 = 16$. В табл. 2 представлена расчетная матрица для полного факторного эксперимента, включающего все возможные

Таблица 2
Экспериментальная расчетная матрица для четырех факторов $N = 2^4$

Номер опыта	X_0	X_1	X_2	X_3	X_4	$X_1 X_2$	$X_1 X_3$	$X_1 X_4$	$X_2 X_3$	$X_2 X_4$	$X_3 X_4$	Среднее значение усадки, %
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	$\bar{y}_1$
2	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	$\bar{y}_2$
3	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	$\bar{y}_3$
4	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	$\bar{y}_4$
5	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	$\bar{y}_5$
6	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	$\bar{y}_6$
7	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	$\bar{y}_7$
8	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	$\bar{y}_8$
9	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	$\bar{y}_9$
10	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	$\bar{y}_{10}$
11	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	$\bar{y}_{11}$
12	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	$\bar{y}_{12}$
13	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	$\bar{y}_{13}$
14	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	$\bar{y}_{14}$
15	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	$\bar{y}_{15}$
16	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	$\bar{y}_{16}$

комбинации изучаемых факторов $i = 4$, варьируемых на двух уровнях. Для построения матрицы планирования пользовались кодированием уровня факторов:

$$X_i = \frac{\tilde{X}_i - \tilde{X}_{i0}}{I_i}$$

где X_i — кодированное текущее значение фактора; $\tilde{X}_{i0}$ — натуральное значение нулевого уровня; $\tilde{X}_i$ — натуральное текущее значение фактора; I_i — натуральное значение интервала варьирования.

Верхнему уровню фактора присваивают знак плюс, нижнему — минус. В стандартной форме матрицы планирования используют только знаки.

Матрицы полных факторных экспериментов должны отвечать требованиям ортогональности и ротатабельности. Ортогональность плана позволяет получать оценки для коэффициентов регрессии независимо друг от друга. По свойству ротатабельности предсказанные значения параметра из уравнения регрессии имеют минимальные дисперсии (рассеяния), которые, кроме того, равны на равном расстоянии в любом направлении от центра эксперимента в различных точках факторного пространства. Одновременно ортогональным и ротатабельным планирование может быть только тогда, когда поверхность функции параметра для данного факторного пространства действительно линейна (при данной ошибке эксперимента), т. е. если все члены уравнения, отражающие кривизну, имеют незначительные коэффициенты (это коэффициенты взаимодействия и коэффициенты квадратического и высшего порядков). В случае неортогональности матрицы некоторые коэффициенты могут коррелировать друг с другом.

В соответствии с выбранным планом эксперимента была исследована усадка отливок на образцах — брусках (толщиной $h = 3$ мм и 5 мм). Усадку устанавливали по трем элементам: расположенным перпендикулярно течению расплава вблизи литника ($a_1 = 30$ мм) и отстоящему на 35 мм от литника ($a_2 = 30$ мм); расположенному по направлению течения расплава ($b = 50$ мм). Образцы изготавливали при следующих режимах (переменные факторы): $T_{\text{р}} = 170-270^\circ\text{C}$, $T_{\text{ф}} = 20-70^\circ\text{C}$; $p = 30-80$ МПа; $t_{\text{выд}} = (0,3 \div 1)t_{\text{выд. макс}}$ (поскольку $t_{\text{выд. макс}}$ зависит, в свою очередь, от $T_{\text{р}}$ и $T_{\text{ф}}$). Образцы отливали на литейной машине с объемом впрыска 16 см³ и шнековым предпластикатором.

За нулевую точку (центр эксперимента) при реализации матрицы (см. табл. 2) был выбран центр области изменения значений исследуемых факторов. Интервал варьирования (разница между значениями центра и уровня фактора в эксперименте) намного больше колебания факторов, что увеличивает точность эксперимента. Экспериментальные данные обрабатывали по расчетным формулам, приведенным ниже.

1. Коэффициенты уравнения эмпирической линейной модели усадки S :

$$b_0 = \frac{\sum_{q=1}^N \bar{y}_q X_{0q}}{N}; \quad b_i = \frac{\sum_{q=1}^N \bar{y}_q X_{iq}}{N}$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{q=1}^N \bar{y}_q X_{iq} X_{jq}}{N}$$

где q — номер опыта; N — число всех опытов матрицы; $\bar{y}_q$ — среднее значение параметра при опыте; i, j — номер фактора ($i, j = 1, 2, 3, 4$).

2. Дисперсия каждого опыта $s_{\text{оп. } q}^2$ и действительная дисперсия каждого опыта s_q^2 :

$$s_{\text{оп. } q}^2 = \frac{\sum_{r=1}^m (y_{rq} - \bar{y}_q)^2}{m-1}; \quad s_q^2 = s_{\text{осн}}^2 + \frac{1}{2} s_{\text{оп. } q}^2$$

где m — число параллельных опытов; y_{rq} — значение r -го параллельного опыта; $\bar{y}_q$ — среднее значение в r -м опыте; $s_{\text{осн}}^2$ — основная действительная дисперсия.

3. Критерий Кохрена:

$$G = s_{\text{оп. } q \text{ макс}}^2 / \sum_{q=1}^N s_{\text{оп. } q}^2$$

где $s_{\text{оп. } q \text{ макс}}^2$ — максимальная дисперсия эксперимента из N опытов.

4. Дисперсия s_{bi}^2 и ошибка s_{bi} коэффициентов регрессии:

$$s_{bi}^2 = \frac{\sum_{q=1}^N s_q^2}{Nm}; \quad s_{bi} = \sqrt{s_{bi}^2}$$

Условия оценки значимости коэффициентов регрессии выбираются по неравенству $b_i, b_{ij} > s_{bi} t_p = \Delta b_i$, где t_p — коэффициент Стьюдента (при $p = 95\%$ и степени свободы $f = N + m_0 - 2$; m_0 — число параллельных опытов в центре эксперимента).

5. Условие принятия гипотезы о линейности модели:

$$|\bar{y}_0 - b_0| > \sqrt{s^2} \sqrt{\frac{N + m_0}{Nm_0}} t_p = \Delta b_0$$

где s^2 — среднее взвешенное из двух дисперсий; $\bar{y}_0$ — среднее значение из m_0 числа параллельных опытов в центре эксперимента.

6. Среднее взвешенное значение из двух дисперсий s^2 и дисперсия среднего значения нулевой точки опыта $s_{\bar{y}_0}^2$:

$$s^2 = \frac{(N-1)s_{bi}^2 + (m_0-1)s_{\bar{y}_0}^2}{N + m_0 - 2}; \quad s_{\bar{y}_0}^2 = s_0^2/m_0$$

где s_0^2 — действительная дисперсия s_q^2 в нулевой точке.

7. Дисперсия адекватности линейной модели $s_{ад}^2$ и воспроизводимости s_y^2 :

$$s_{ад}^2 = \frac{\sum_{q=1}^N (\bar{y}_q - \hat{y}_q)^2}{N - i_m - a_m - 1}; \quad s_y^2 = \frac{\sum_{q=1}^N s_b^2}{N}$$

где $\bar{y}_q$ — среднее значение параметра при опыте q ; $\hat{y}_q$ — значение параметра из расчета модели при факториальных значениях опыта q ; i_m — число линейных членов, учитываемых в модели; a_m — число членов взаимодействия, учитываемых в модели.

8. Условие адекватности модели (по критерию Фишера F):

$$F_{расч} = \frac{s_{ад}^2}{s_y^2} < F_{табл}(f_1; f_2)$$

Для расчета применяют метод наименьших квадратов и связанный с ним регрессионный анализ, если существуют некоторые важные условия [67]:

- 1) параметр объекта исследования является нормально распределенной случайной величиной;
- 2) параметр объекта исследования должен иметь однородную дисперсию на разных точках экспериментального пространства;
- 3) факторы должны быть не коррелированы.

Выполнение третьего требования для данного эксперимента было предварительно доказано. Закон распределения исследуемого параметра (усадки) на основании эксперимента ряда авторов (например, [68]) был принят нормальным. Доказательство выполнимости второго условия было проведено при статистической оценке модели.

По методу наименьших квадратов требуется, чтобы была минимальной сумма:

$$\sum_{q=1}^N [\bar{y}_q - \hat{y}_q(X_1, X_2, X_3, X_4)]^2$$

т. е. сумма квадратов отклонений средних значений $\bar{y}_q$ (где q — номер соответствующих комбинаций, значений факторов в эксперименте и при расчете математической модели) от полученной математической модели объекта исследования $\hat{y}_q(X_1, X_2, X_3, X_4)$.

Важным моментом при расчетах является проверка однородности дисперсий. Это делают с помощью критерия Кохрена G. Если значение G не превышает табличного, то можно признать гипотезу об однородности дисперсии. Значения G являются функцией от числа опытов N матрицы планирования, числа параллельных опытов $m-1$ и уровня достоверности p [69].

Экспериментами было установлено, что при $p = 95\%$ исследуемый параметр (усадка) всегда имеет однородную дисперсию (хотя учитывали дисперсию, полученную только при кратковременных опытах; при большой действительной дисперсии s_q^2 значение G будет еще меньше).

Для оценки значимости коэффициентов регрессии определяют коэффициент Стьюдента t_p из таблиц (например, в работе [66]) по выбранному уровню вероятности (в данном случае $p = 95\%$) и степени свободы $f = N(m-1)$. Если неравенство $b_i b_{ij} > s_{bi} t_p$ выполняется, то соответствующий коэффициент регрессии значимый.

Затем необходимо проверить принятую гипотезу о линейности модели, иначе — можно ли усадку отливок из кристаллизующихся полимеров описывать уравнением без квадратичных членов и, возможно, без членов, учитывающих парные взаимодействия. Для этого проводят дополнительный опыт с несколькими повторениями ($m_0 = 10$) в центре эксперимента, т. е. при условии, что все факторы находятся на нулевом уровне, и рассчитывают значение $|\bar{y}_0 - b_0|$.

Если неравенство для $|\bar{y}_0 - b_0|$ не выполняется, это означает, что сама разность незначима, а объект исследования не подчиняется зависимости второго или более высокого порядков. (Расчеты подтвердили справедливость для описываемых данных гипотезы о линейности модели, хотя имелись варианты, когда это нельзя было принять строго, что связано с погрешностью эксперимента.) Практически полезно с целью максимального упрощения модели проверить, можно ли отказаться от парных членов взаимодействия или обойтись хотя бы без некоторых из них, пока модель еще адекватна (даже если эти члены значимы).

Для этого оцениваются дисперсия адекватности линейной модели $s_{ад}^2$ и воспроизводимости s_y^2 . Наконец, адекватность модели проверяют по критерию Фишера F. Сравнивают расчетное (см. стр. 76) и табличное [66] значения критерия и определяют в зависимости от уровня достоверности ($p = 95\%$), степени свободы $f_1 = N - i_m - a_m - 1$ и степени свободы $f_2 = N(m-1)$ дисперсии воспроизводимости.

В табл. 3 приведены в качестве примера коэффициенты статистических регрессионных моделей для расчета усадки брусков. Абсолютное значение коэффициентов регрессии сразу дает представление о максимально возможном диапазоне варьирования параметра усадки, если область изменения переменных, включенных в модель, соответствует всему диапазону реальных возможностей оборудования.

Значения свободного члена b_0 — это усадка в центре эксперимента, где X_i и X_{ij} равны нулю. Значения линейных регрессионных коэффициентов показывают изменение значения параметра — усадки при изменении соответствующего фактора в интервале $(\pm)$ варьирования.

Значимые коэффициенты b_{ij} показывают, что влияние одного фактора неодинаково для различных уровней второго фактора, и наоборот. Если эффект имеет знак +, то увеличению параметра — усадки будут благоприятствовать значения обоих факторов одновременно на нижних или одновременно на верхних уровнях. Если знак —, то благоприятными являются комбинации факторов на разных уровнях. Зная коэффициенты b_{ij} , легко составить уравнения для каждого варианта S (см. стр. 74).

Полученные уравнения адекватны при вероятности $p = 95\%$. В них не учтены эффекты взаимодействия факторов (а в табл. 3 не приведены соответствующие коэффициенты), так как была установлена расчетами относительно малая степень значимости этих эффектов (это свидетельствует о том, что отклонение полученных и анализируемых моделей от линейности невелико).

Адекватность линейных моделей, в свою очередь, позволяет предпола-

Коэффициенты статистических регрессионных моделей для расчета усадки образцов — брусков из кристаллизующихся термопластов

Номер образца	Коэффициенты, %				Номер образца	Коэффициенты, %					
	b_0	$b_1 (X_1)$	$b_2 (X_2)$	$b_3 (X_3)$		$b_4 (X_4)$	b_0	$b_1 (X_1)$	$b_2 (X_2)$	$b_3 (X_3)$	$b_4 (X_4)$
Элемент $a_1, h = 3$ мм											
1	2,29	-0,47	-0,27	+0,22	-0,06	16	2,98	-0,11	-0,25	+0,10	+0,09
2	2,23	-0,35	-0,38	+0,30	-0,03	17	3,10	-0,15	-0,28	+0,16	+0,04
3	2,23	-0,41	-0,37	+0,26	0,0	18	3,01	-0,14	-0,26	+0,13	+0,06
4	2,25	-0,45	-0,29	+0,27	-0,06	19	2,76	-0,26	-0,30	+0,18	-
5	1,76	-0,22	-0,25	+0,07	-0,11	20	2,42	-0,20	-0,22	+0,05	0,0
Элемент $a_1, h = 5$ мм											
6	2,92	-0,11	-0,29	+0,13	-0,04	21	2,66	-0,06	-0,28	+0,31	-0,07
7	3,06	-0,14	-0,35	+0,16	+0,03	22	2,85	-0,05	-0,29	+0,42	-0,12
8	3,04	-0,14	-0,32	+0,15	+0,02	23	2,86	-0,02	-0,31	+0,40	-0,03
9	2,55	-0,25	-0,27	+0,18	-	24	3,58	-0,19	-0,54	+0,31	-0,03
10	2,26	-0,17	-0,21	0,0	-0,02	25	1,64	-0,14	-0,11	+0,06	-0,06
Элемент $a_2, h = 3$ мм											
11	2,83	-0,36	-0,28	+0,27	+0,04	26	2,88	-0,21	-0,27	+0,32	0,0
12	2,67	-0,31	-0,33	+0,34	+0,04	27	3,10	-0,20	-0,25	+0,27	-0,03
13	2,67	-0,32	-0,31	+0,32	+0,06	28	3,11	-0,21	-0,26	+0,26	+0,03
14	2,61	-0,44	-0,26	+0,29	+0,02	29	3,45	-0,30	-0,43	+0,22	-
15	2,15	-0,24	-0,19	+0,10	-0,11	30	1,97	-0,20	-0,14	+0,05	-0,02

Примечание. Образцы № 1, 6, 11, 16, 21 и 26 изготовлены из ПЭНП с ПТР=1,8 г/10 мин; образцы № 2, 7, 12, 17, 22, 27 — из ПЭНП с ПТР=1,5 г/10 мин; образцы № 3, 8, 13, 18, 23, 28 — из ПЭНП с ПТР=1,1 г/10 мин; образцы № 4, 9, 14, 19, 24, 29 — из ПЭВП с ПТР=2,3 г/10 мин; образцы № 5, 10, 15, 20, 25, 30 — из ПП с ПТР=3,7 г/10 мин.

гать, что план полного факторного эксперимента $N = 2^4$ практически одновременно и ортогонален и рототабелен, и определение коэффициентов регрессии в большей степени независимо друг от друга. Это не исключает того, что могут существовать эффекты взаимодействия, но они незначительны относительно погрешности всего эксперимента и условий применения модели в производстве.

Полученные путем регрессионного анализа эмпирические уравнения «строго существуют» только для диапазона значений факторов, исследованных в эксперименте. Однако это не влияет на вид общей модели усадки. Адекватность модели в случае построения интерполяционной формулы означает окончание решения задачи. В описываемом лабораторном эксперименте задача оптимизации S (и тем более ΔS) не ставилась, так как минимальное значение усадки находится при технически предельных значениях технологических факторов.

Основными источниками погрешностей изготовления отливок в эксперименте были: 1) колебание $\Delta t_{\text{выд}} = \pm 0,2$ с, причем это колебание нерегулярно как по значению $t_{\text{выд}}$, так и от цикла к циклу; 2) колебание $\Delta p = \pm (2 \div 3)$ МПа при поджатии, увеличивающееся с возрастанием среднего значения давления, но тоже нерегулярно от цикла к циклу; 3) колебание $\Delta p_{\text{впр}}$ при впрыске из-за колебания дозирования, погрешности измерения давления в форме и размыкания литьевой формы при высоких давлениях (значение колебания $\Delta p_{\text{впр}}$ трудно установить экспериментально); 4) колебание $\Delta T_p = \pm 5^\circ \text{C}$ в цилиндре литьевой машины (примерно постоянно, хотя при заполнении формы оно может быть и большим); 5) колебание $\Delta T_\phi = \pm 2^\circ \text{C}$, т. е. колебание температуры охлаждающей воды (эта величина сохраняется примерно постоянной, так как система охлаждения относительно инерционна); 6) погрешность измерения размеров образцов $\Delta_{\text{метр}} = \pm 0,005$ мм.

Колебания $\Delta t_{\text{выд}}$ значительно влияет на колебание усадки прежде всего при минимальных значениях $t_{\text{выд}}$ (особенно для ПЭВП).

Из уравнений для величины S видно, что общая усадка получается по принципу суперпозиции — суммированием частных долей усадок, возникающих при изменении соответствующего фактора. Определение этих частных долей, т. е. пяти регрессионных коэффициентов, для других образцов из полиолефинов, отличающихся от исследованных, требуется проводить специально, как показано в [65]]. Уравнение $t_{\text{выд. макс}} = f(T_p, T_\phi)$ также необходимо установить дополнительно; оно будет не нужно, если применять такое сырье, свойства которого позволяют выбирать достаточно широкий диапазон для варьирования фактора времени выдержки под давлением при любых предельных значениях T_p и T_ϕ .

В результате было установлено, что точность отливок-образцов из ПЭНП, ПЭВП и ПП соответствует точности 11—13 квалитетам ИСО (см. стр. 83) [65].

Пример исследования точности отливок в промышленных условиях [70]. Отливали головки (канюли) для инъекционных игл ($\varnothing 1,3 \div 2,0$ мм) из ПЭВП. Иглы соединяются с головками методом холодной запрессовки, а к полученному соединению с натягом предъявляется основное требование — длительная прочность соединения. Это требование обуславливает необходимость обеспечения надежности соединения, которая существенно зависит от размерной точности изготовления головок.

Отливали головки в шестигнездной термостатируемой форме, установленной на литьевой машине РЕР-37, в полуавтоматическом режиме работы. Исследовали точность получения внутреннего диаметра головок. Внутренний диаметр измеряли через 24 ч после получения отливки с точностью до 1 мкм на универсальном измерительном микроскопе УИМ-21. Перед измерением с торцевой поверхности головки срезали лезвием тонкий слой толщиной 0,5—0,6 мм.

На первой стадии оптимизации точности проводили полный факторный эксперимент 2^5 . Параметром оптимизации являлся внутренний диаметр головки с номинальным диаметром d 1,8 мм. Цель оптимизации — достижение линейного размера изделия, предусмотренного в чертежах, т. е. задача экстре-

мального планирования. Переменными параметрами являлись: время охлаждения X_1 (в с), давление впрыска X_2 (в МПа), время выдержки под давлением X_3 (в с), температура (в °С) расплава X_4 и формы X_5 . Остальные параметры оставались постоянными и контролировались (температура в первой зоне цилиндра 200 °С, скорость впрыска 7—8 см³/с, объем впрыска 2,5 см³, давление в гидросистеме 135 МПа). Принятый уровень значимости 0,5%, допустимое отклонение измеряемой величины от средней в опыте было равно 4,5 мкм. Наилучший результат эксперимента 2^5 1,785 мкм.

Ниже приведен план полного факторного эксперимента 2^5 :

Переменные факторы	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
Значение факторов в центре плана	8	110	8	240	40
Уровни	10	120	10	230	50
	6	100	6	250	30
Интервал варьирования в	2	10	2	10	10

Всего было проведено 96 опытов, т. е. в каждой точке по три опыта. Опыты были рандомизированы. В полученном уравнении регрессии

$$\bar{d} = 1,7754 + 0,0345X_1 + 0,0365X_1X_2X_4 + 0,0325X_2X_3X_4 + 0,0855X_1X_2$$

сильно выражено влияние на параметр оптимизации смешанных эффектов. Данное уравнение получилось неадекватным линейной модели, вследствие чего было принято решение в наилучшей точке эксперимента 2^5 спланировать дробный факторный эксперимент 2^{4-1} .

В этом эксперименте пришлось отказаться от внутреннего диаметра головки как от параметра оптимизации по следующим причинам.

Во-первых, внутренний диаметр головки — случайная величина, подчиняющаяся определенному закону распределения. Выдвинутое достаточно жесткое требование (т. е. допустимое отклонение от среднего размера в 4,5 мкм) на практике трудно удовлетворить, так как у ПЭВП, например, колебание технологической усадки составляет свыше 1%.

Во-вторых, для оптимизации, помимо других требований, должно выполняться следующее: интервал изменения параметра оптимизации при всех рассматриваемых режимах должен на порядок превышать интервал измене-

Таблица 4

План дробного факторного эксперимента 2^{4-1}

Номер опыта	Давление впрыска X_1 , МПа	Время выдержки под давлением X_2 , с	Температура, °С		Параметр оптимизации, мкм
			расплава X_3	формы X_4	
1	1050	9	245	45	5,21
2	1150	9	245	55	4,86
3	1050	11	245	55	5,88
4	1150	11	245	45	6,31
5	1050	9	255	55	6,18
6	1150	9	255	45	4,08
7	1050	11	255	45	5,9
8	1150	11	255	55	6,28

Примечание. 1. Постоянные факторы: $t_{\text{охл}}=10$ с; остальные факторы см. на этой странице выше.
2. Переменные факторы: $X_2=X_1X_3X_4$

ния параметра при одном режиме. Проведенные измерения партии из 100 головок, отлитых при одном режиме, показали, что разброс размеров составляет 25 мкм, тогда как разброс размеров 96 головок при всех режимах составляет 30 мкм. Поэтому в реальных условиях литья под давлением оптимизация по малому размеру пока безосновательна.

В дробном факторном эксперименте 2^{4-1} в качестве параметра оптимизации было принято среднееквадратическое отклонение размера. Наиболее существенно влияющий фактор эксперимента 2^5 стабилизировали на постоянном уровне ($t_{\text{охл}}=10$ с). Фактор $t_{\text{выд}}$ приравнивали к тройному взаимодействию: произведению давления впрыска на температуру расплава и температуру формы. Как видно из данных табл. 4, интервалы варьирования были уменьшены и устанавливались на границе чувствительности регулирующих приборов. В эксперименте 2^{4-1} сначала было проведено по 10 измерений в каждой точке с учетом рандомизации. Полученные результаты оказались недостаточными для определения величины σ . Впоследствии было проведено по 50 измерений в каждой точке без рандомизации, что значительно упростило экспериментальные работы. Полученный разброс размеров в несколько раз превышал разброс при 10 опытах с учетом рандомизации. Следовательно, для упрощения при проведении 50 измерений в каждой точке эксперимента, эксперимент можно вести без рандомизации.

В результате было получено регрессионное уравнение

$$\bar{y} = 5,59 - 0,205X_1 + 0,505X_2 + 0,0225X_3 + 0,212X_4$$

которое оказалось адекватным линейной модели. Интересно отметить, что при эксперименте 2^{4-1} разброс средних размеров составил лишь 8 мкм, тогда как разброс размеров при одном режиме составил 16—25 мкм. С целью оптимизации из лучшей точки плана 2^{4-1} было предпринято движение по градиенту:

Номер опыта	1	2	3
Переменные факторы			
давление впрыска X_1 , МПа	113	116	119
время выдержки под давлением X_2 , °С	8,5	6,0	4,5
температура формы X_4 , °С	47	44	41
Среднеквадратическое отклонение размера σ , мкм	4,01	3,78	4,11

В опытах 1 и 2 наблюдалось уменьшение параметра оптимизации. В опыте 3 наблюдалось увеличение σ . Следовательно, вторая точка является

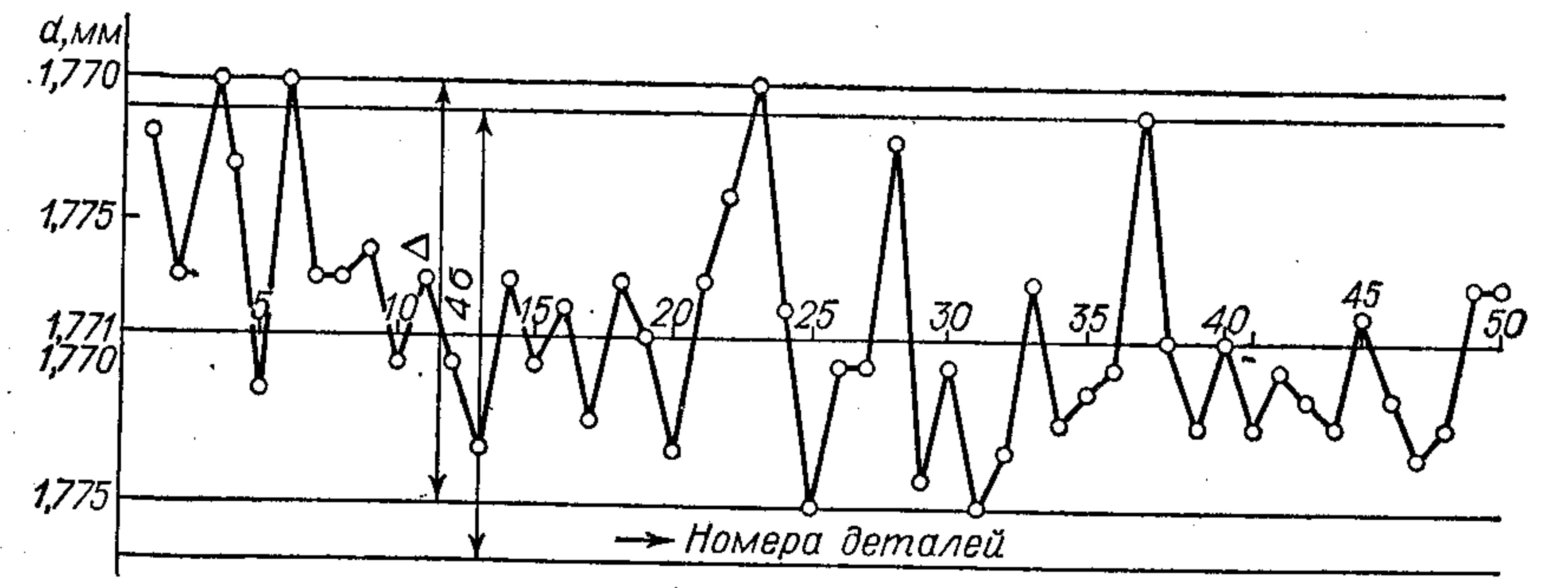


Рис. 22. Точностная диаграмма процесса литья под давлением головки инъекционной иглы из ПЭВП для лучшего шестого режима плана 2^{4-1} ($\sigma = 4,08$ мкм; $\Delta = 15$ мкм; $4\sigma = 16,3$ мкм).

экстремальной. Можно считать проведенный эксперимент эффективным, поскольку удалось снизить σ с 6,31 до 3,78 мкм, т. е. уменьшить допуск при изготовлении головок с 25 до 14 мкм. Важно отметить, что при подобных

экспериментах необходимо проводить в каждой точке, т. е. в каждой серии опытов, как минимум три опыта по 50 измерений в каждом, поскольку внутри 50 измерений колебания σ иногда превышают 10%. Доверительный интервал при соблюдении приведенных выше требований составляет 95%. На рис. 22 даны результаты исследования колебаний внутренних диаметров головок, полученных в лучшей (шестой) точке плана 2^{4-1} .

Рис. 23 и 24 показывают экспериментальные и сглаженные кривые рассеяния размеров головок, полученных при шестом и восьмом режимах плана 2^{4-1} (в восьмом режиме было измерено 100 изделий, приведенные кривые рассеяния свидетельствуют о том, что допуск, устанавливаемый по разбросу

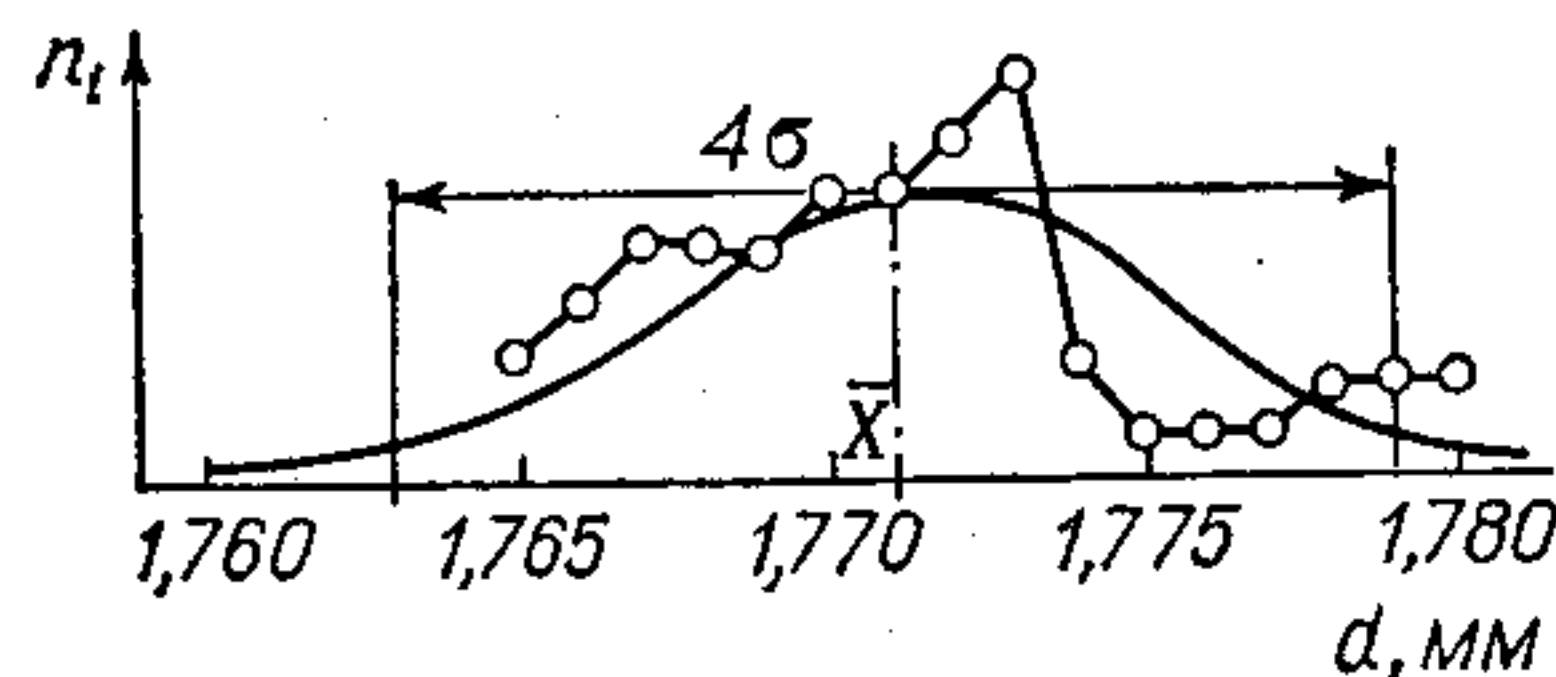


Рис. 23. Экспериментальная и сглаженная кривые распределения внутреннего диаметра головки для шестого режима плана 2^{4-1} ($\sigma = 4,08$ мкм; $\Delta = 15$ мкм; $4\sigma = 16,3$ мкм; $N = 100$).

размеров, составляет 4σ [70]. В итоге достигнута точность, соответствующая IT 9.

Таким образом, следует отметить, что если имеется ряд уравнений регрессии первого порядка, каждое из которых характеризует какое-либо единичное качество отливки (размер, погрешность размера, усадку, колебание усадки, твердость, и т. д.), то их можно свести в систему уравнений, для решения которой используют теорию линейного программирования. Оптимальное решение такой системы предполагает среди всех возможных найти

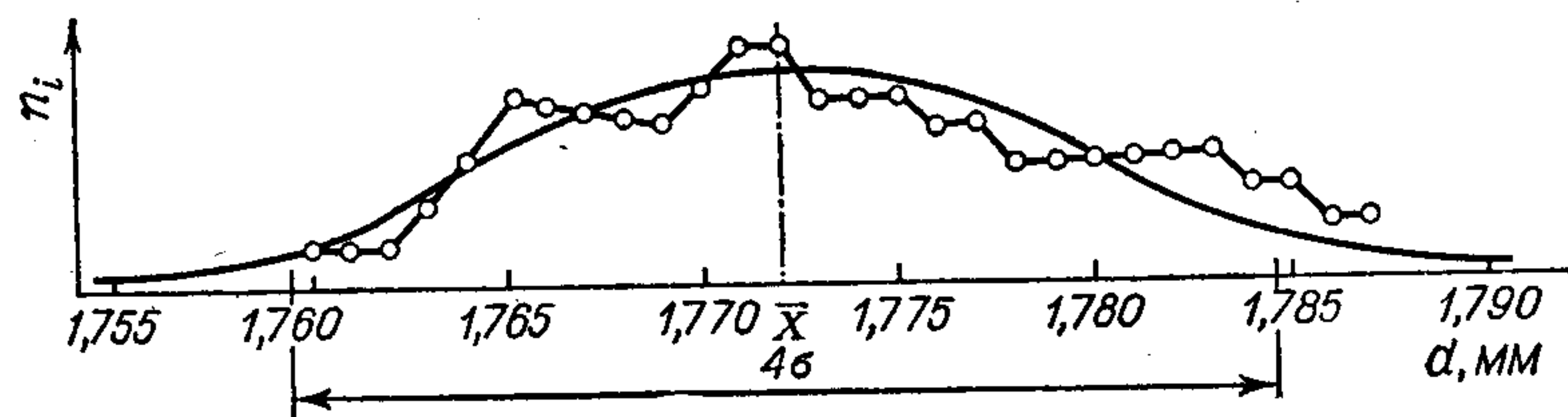


Рис. 24. Экспериментальная и сглаженная кривые распределения внутреннего диаметра головки для восьмого режима плана 2^{4-1} ($\sigma = 6,28$ мкм; $\Delta = 27$ мкм; $4\sigma = 25,12$ мкм; $N = 100$).

такое, при котором минимизируется некоторая функция, выражающая, например, условие минимума усадки и ее колебания; в каждом конкретном случае эта функция выражает некоторое компромиссное решение для исследуемых показателей качества отливки.

В данном разделе не ставилась задача подробного описания результатов исследования точности отливок из пластмасс, проведенных многими авторами и охватывающих большую номенклатуру материалов, типоразмеров изделий, технологических условий изготовления. Результаты этих исследований точности определенным образом обобщены и использованы при разработке норм точности, приведенных в следующем разделе.

НОРМЫ ТОЧНОСТИ

Оптимизация условий обеспечения заданной точности размерных параметров деталей из пластмасс имеет два аспекта. Один связан с предельным повышением точности при сохранении заданных технико-экономических ограничений, другой —

с предельным снижением затрат при выполнении заданной точности сборки. В обоих случаях надо проводить технико-экономическое обоснование допусков (методика и примеры пользования ею для деталей из пластмасс разработаны в [41] А. М. Ростовцевым), для которого общим является уже известное условие $\delta \geq \delta_t$, где $\delta_t \geq \Delta_{\Sigma}$. Суммарная погрешность изготовления Δ_{Σ} складывается из погрешностей за счет колебания усадки, влияния технологического уклона, изменений при кратковременном хранении, погрешностей контроля, т. е. это результат суммарного влияния систематических и случайных переменных (см. стр. 9).

Нормы, разработанные в СССР, построены на основе использования объективного параметра — колебания усадки ΔS^* .

В табл. 5 приведены качества точности, достижимые (главным образом в зависимости от ΔS , значения которого сгруппи-

Таблица 5

Квалитеты точности для размеров деталей из пластмасс

Интервалы размеров, мм	Квалитет точности IT при значениях колебания усадочного коэффициента ΔS (в %)							
	до 0,06	свыше 0,06 до 0,10	свыше 0,10 до 0,16	свыше 0,16 до 0,25	свыше 0,25 до 0,40	свыше 0,40 до 0,60	свыше 0,60 до 1,00	свыше 1,00
Размеры типа A_1								
До 3	8	9	10	11	12	13	14	15
Свыше 3 до 30	8	9	10	11	12	13	14	15
» 30 » 120	9	10	11	12	13	14	15	16
» 120 » 250	10	11	12	13	14	15	16	17
» 250 » 500	11	12	13	14	15	16	17	18
Размеры типа A_2 и A_3								
До 3	10	11	12	13	14	15	16	17
Свыше 3 до 30	9	10	11	12	13	14	15	16
» 30 » 120	10	11	12	13	14	15	16	17
» 120 » 250	11	12	13	14	15	16	17	18
» 250 » 500	12	13	14	15	16	17	18	—

рованы по предпочтительному ряду чисел R10) при формовании пластмассовых изделий (рис. 25) простой геометрической формы (и в условиях массового производства). Качества точности при изготовлении литых изделий из пластмасс приведены для двух категорий размеров, определяемых размерами формирующих элементов (тип A_1) и взаимным расположением последних (тип A_2

* См. РТМ МЛ1—62 «Допуски и посадки деталей из пластмасс. Часть первая. Точность изготовления деталей из пластмасс литьем под давлением и прессованием (технологические допуски)» Л., ЦБТИ, 1962, 90 с, а также ГОСТ 11710—66 «Допуски и посадки деталей из пластмасс» (табл. 3 приложений). Аналогичный подход в новом стандарте ФРГ DIN 16901, 1975 г.

и A_3). Такое разделение объясняется известным различием в точности формования соответствующих элементов изделия. Размеры типа A_2 и A_3 по сравнению с A_1 более грубые (за исключением интервала размеров до 3 мм) из-за влияния дополнительных — кроме колебания усадки — источников погрешностей, например, зазоров между перемещающимися частями формы. Более подробная классификация размеров с точки зрения точностных возможностей изготовления изделий хотя и технологически обоснована, но неудобна для стандартизации.

Для оценки точности изготовления изделий из пластмасс литьем под давлением используют качества точности с 8 по 18.

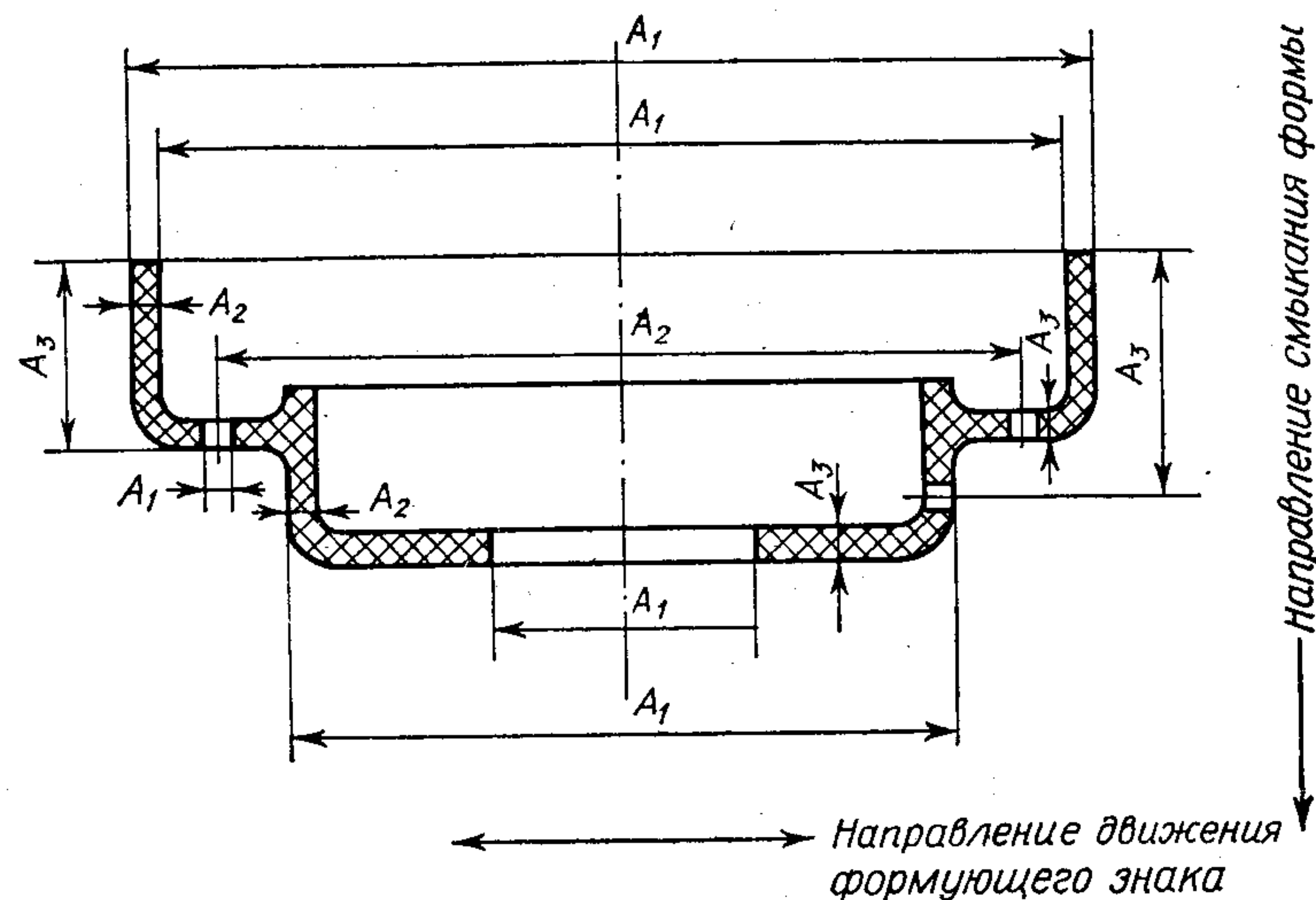


Рис. 25. Типы размеров литых деталей из пластмасс.

Усложнение конфигурации изделия (при прочих равных условиях) приводит к понижению точности (условно — на один качество по сравнению с простым изделием).

Приведенные в табл. 5 качества точности отражают некоторые усредненные производственные (технологические и аппаратные) возможности современного серийного и массового производства изделий из пластмасс и служат ориентиром для принятия необходимого (часто окончательного) решения.

Принцип выбора качеств точности в зависимости от ΔS делает возможным использование приводимых рекомендаций и при совершенствовании оборудования, интенсификации технологии или улучшения качества полимерных материалов, так как все эти прогрессивные мероприятия отражаются на таком изменении индекса ΔS , что делается возможным выбирать более точные качества, в том числе и для ΔS до 0,06% (сейчас этот вариант является перспективным).

Колебание расчетной усадки ΔS зависит также от анизотропии усадки и, в общем, от конструктивных особенностей формируемого изделия. Действительно, данные о расчетной усадке, полученные на стандартных образцах, несут в себе информацию именно об этих образцах, и корреляция между ними и конкретными изделиями во многих случаях затруднительна*.

Для предварительного выбора качества точности можно использовать данные о колебании расчетной усадки при формовании; с целью уточнения выбранного качества — данные об усадочной деформации конкретного изделия, определяемой экспериментально (если имеется возможность) или на основании других сведений (поэтому-то фактическая точность изделий оказывается, как правило, выше, чем по предварительным оценкам, использующим данные о колебании усадки).

Весьма важным для оценки суммарной погрешности изготовления изделий из пластмасс является вопрос о технологических уклонах, которые назначаются в необходимых случаях на наружные и внутренние поверхности, и вызывают дополнительную значительную погрешность размеров $\Delta_{ук}$.

Опыт производства позволяет рекомендовать следующие значения углов технологических уклонов α : наружные поверхности — 30', 45', 1°, 1,5°; внутренние поверхности, в том числе отверстия глубиной $l > 1,5d$ — 45', 1°, 2°; отверстия глубиной $l \leq 1,5d$ — 30', 45'; поверхности выступов, ребер жесткости и подобных конструктивных элементов — 1°, 2°, 5°.

Угол технологического уклона 15', хотя и рекомендуется, но его не следует назначать, так как метрологическая погрешность, возникающая при контроле такого небольшого угла на поверхностях пластмассовых изделий универсальными измерительными средствами, соизмерима с абсолютными значениями изменяемого параметра.

Меньшие из перечисленных значений углов технологического уклона предлагаются для материалов с более низкими колебаниями усадки (условно до 0,4%); более высокие значения — для больших колебаний усадки (условно свыше 0,4%).

Для сопрягаемых ответственных размеров изделий из пластмасс, точность которых оценивают качествами точности 8—13 (включительно), в зависимости от угла технологического уклона предусматривается два варианта:

1) при $\alpha \leq 1^\circ$ погрешность от уклона должна располагаться в заданном поле допуска размера (как и другие погрешности формы, если они не оговариваются в чертеже особо);

* Значения S и ΔS определяются на образцах в соответствии с указаниями национальных стандартов, например, ГОСТ 18616—73 (СССР); MSZ 7253—59 (Венгрия); TGL 14073—63 (ГДР); PN 61/C-89002 (Польша); STAS 5795—58 (Румыния); ČSN 640261—54 (Чехословакия). Имеется также рекомендация СЭВ: РС 399—65 (только для реактопластов). Указанные документы, как видно из их сравнения, не совсем идентичны при толковании терминов и в некоторых методических вопросах.

Таблица 6

Достижимые качества точности при обработке резанием деталей из пластмасс в интервале размеров 1—500 мм

Технологический процесс	Обрабатываемые поверхности	Квалитеты точности IT		
		реакто-пласты	аморфные термопласты	кристаллизующиеся термопласты
Шлифование чистовое	Наружные цилиндрические поверхности	6—7	7—8	8—9
	Плоские поверхности; отверстия	7—8	8—9	9—10
Развертывание точное (двухкратное)	Отверстия	7—8	8—9	9—10
Обтачивание чистовое	Наружные цилиндрические поверхности	7—8	8—9	9—10
Растачивание чистовое	Отверстия	8—9	9—10	10—11
	Наружные цилиндрические и плоские поверхности	8—9	9—10	10—11
Зенкерование	Отверстия	8—9	9—10	10—11
Фрезерование чистовое	Плоские поверхности	9—10	10—11	11—12
Сверление	Отверстия	10—11	11—12	12—13
Обтачивание черновое	Наружные цилиндрические поверхности	11—12	12—13	13—14
Фрезерование черновое	Плоские поверхности	11—12	12—13	13—14

Примечание. При обработке термопластов образуется стружка типа сливной или скалывания (в последнем случае получается менее точное изделие и ухудшается качество поверхности).

2) при $\alpha > 1^\circ$ погрешность от уклона не располагается в поле допуска размера, а сопряжение рассматривается как коническое (для расчета посадок такого сопряжения применяются специальные методы расчета).

Точность несопрягаемых размеров изделий из пластмасс оценивают квалитетами точности 14—18; для этих размеров, погрешность $\Delta_{ук}$ определяют отдельно: $\Delta_{ук} = 2H \operatorname{tg} \alpha$, где H — высота того элемента изделия, на который назначают уклон.

Общую погрешность несопрягаемых размеров должны оценивать суммированием данных, полученных из табл. 5 и расчетных значений $\Delta_{ук}$.

Точность размеров литых изделий из пластмасс, достигаемая при последующей обработке резанием, приведена в табл. 6. Для оценки точности изготовления деталей из пластмасс резанием используются квалитеты точности: 6—12 (включительно) — для реактопластов; 7—14 (включительно) — для термопластов. Рекомендации по достижимым квалитетам точности, как видно из табл. 6, охватывают широкий круг технологических операций механической обработки и различные типы обрабатываемых поверхностей (наружные плоские, наружные и внутренние цилиндрические).

Несмотря на возможность повышения точности размеров изделий из пластмасс при обработке резанием по сравнению с литьем под давлением следует ограничивать использование методов механической обработки (так как повышается себестоимость изготовления изделия, не обеспечивается длительное сохранение точности размеров).

Нормы точности* предполагают соблюдение определенной метрологической процедуры, в общем, аналогичной рекомендуемой при оценке усадки (см. стр. 40).

ТОЧНОСТЬ МИКРОПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

В последние несколько лет в связи с развитием микроминиатюризации в радиотехнике, электронике, приборостроении и часовой промышленности появилась потребность в изготовлении малогабаритных и даже микроизделий из пластмасс. Такие изделия получают, как правило, литьем под давлением из термопластов. Их называют микропрецизионными [71—72]. В СССР имеется система допусков и посадок размеров менее 1 мм (ГОСТ 3047—66). Однако она не пригодна для изделий из пластмасс в связи со спецификой последних.

Ю. А. Воробьев [73], используя заводской опыт, предложил вариант норм на допуски размеров изделий из пластмасс менее 1 мм, которые построены с учетом определенной преимущества с нормами точности размеров в диапазоне 1—500 мм. В основу предлагаемой системы положена единица допуска i (в мкм): $i = 0,33D + 0,16$, где D — номинальный размер, мм.

Значения допусков для рядов точности РП-4 ÷ РП-8 приведены в табл. 7. Допуски подсчитывают по формуле $\delta = ai$, где a — число единиц допуска равное 100, 160, 250, 400, 630 соответственно для рядов точности РП-4, РП-5 и т. д. Номера рядов точности соответствуют группам точности размеров в диапазоне 1—500 мм. Приведенные в табл. 7 допуски характеризуют точность наиболее стабильных размеров элементов формы (см. рис. 25).

Назначение групп точности для микропрецизионных изделий также определяется колебанием усадки пластмассы. Например, нормальная точность изготовления деталей из полиамида марки П-68 согласно опытным данным определяется по ряду РП-6.

* В ряде стран имеются национальные стандарты на нормы точности. В СССР рекомендации по точности пока были включены в стандарты на допуски и посадки деталей из пластмасс. В настоящее время разработан стандарт СЭВ СТ 179—75 (см. стр. 97), а в сентябре 1976 г. приняты методические материалы СЭВ «Технологические рекомендации по применению СТ 179—75», куда включены данные, приведенные на стр. 83—87. Помимо них даны сведения по достижимым квалитетам точности для конкретного типа пластмасс (на основании опыта ГДР — по TGL 22-240; см. Приложение). В разработке материалов, кроме автора, приняли непосредственное участие В. Шаф и Д. Кизлинг (ГДР), М. Брумел (ЧССР), К. Звезиховский (ПНР), М. Палей (СССР).

Таблица 7

Допуски размеров микропрецизионных изделий из пластмасс

Номинальные размеры, мм	Допуски для рядов точности, мкм				
	РП-4	РП-5	РП-6	РП-7	РП-8
Свыше 0,10 до 0,25	20	30	50	80	130
» 0,25 » 0,40	26	40	60	100	160
» 0,40 » 0,60	32	50	70	130	200
» 0,60 » 0,80	40	60	100	160	250
» 0,80 » 1,00 (за исключением)	46	70	110	180	280

Предлагаемая система допусков может служить основой дальнейшего нормирования технологических допусков на размеры изделий из пластмасс менее 1 мм.

Достижение высокой точности малогабаритных и микроизделий (четкой границы между ними нет) — задача особенная. Некоторые пути ее решения рассмотрим подробнее.

Возможности микропрецизионного литья в значительной степени определяются литьевыми свойствами перерабатываемой композиции и допустимым давлением впрыска. Минимальная толщина стенок микропрецизионных изделий может достигать 0,07 мм. При столь малых толщинах стенок безупречная однородность материала в изделии требует очень высоких давлений впрыска, а это, в свою очередь, приводит к возникновению внутренних напряжений, что отрицательно сказывается на достижении гарантированного допуска. Заданное поле допуска и сложность изделия в значительной степени зависят и от количества гнезд в форме.

Наиболее широко для получения микропрецизионных изделий используют полиамиды и полиацетали. Но они характеризуются сравнительно высокой усадкой. Поэтому при микропрецизионном литье под давлением особенно важно проводить корректировку давления таким образом, чтобы возможно больше изделий попало в заданное поле допуска (при этом нецелесообразно значительно отклоняться от оптимального значения давления, так как можно прийти к противоположному эффекту — увеличению разброса размеров).

Давление впрыска изменяется в пределах 100—450 МПа. Из-за использования микроточечного литника давление впрыска при прецизионном литье всегда выше, чем при обычном. Оно не должно превышать критического давления, которое, например, при переработке полиацеталей равно 400 МПа. Превышение критического давления даже при коротком времени пребывания расплава в машине приводит к значительной деструкции термопластов. Если и после корректировки давления размеры

микроизделия не укладываются в поле допуска, то следует корректировать размеры самой формирующей полости. Оптимизация режимов литья под давлением в определенных пределах эффективна. Таким путем возможно получить до 44% деталей размерами 1—3 мм с допусками по IT7 и около 56% — по IT8 [71]. По опыту [72] изготавливают, например, мелкие подшипники для карманных часов из полиацетала: 100 тысяч таких подшипников весят всего 6,4 г; их наружный диаметр равен 0,4 мм, диаметр отверстия 0,22 мм, высота — 0,35 мм; допуск размеров лежит в пределах 1—2 мкм.

Развитие микропрецизионного литья привело к созданию новых литьевых машин необычной конструкции, точность которых близка к приборам точной механики.

Вертикальные литьевые машины с прямым гидравлическим приводом узла смыкания и центральным впрыском явились наиболее подходящими для микропрецизионного литья. На таких машинах гарантируется надежная защита дорогой формы от повреждений (увеличивается срок ее службы), а также безупречная плоскопараллельность отдельных элементов механизма смыкания.

Микропрецизионные изделия дальнейшей механической обработке не подвергаются, поэтому при их изготовлении должна быть полностью исключена возможность образования грата. Из-за небольшой толщины опасность повреждения таких изделий при извлечении из формы очень высока. Проще всего выталкивать изделия при вертикальном исполнении литьевой машины. Каждое гнездо должно иметь свое выталкивающее устройство. Автоматическое извлечение микропрецизионных изделий может быть обеспечено с помощью стандартного выталкивающего устройства, специально разработанного для этого вида литья и работающего с использованием вакуума.

При микропрецизионном литье особое влияние на качество полученных изделий, как отмечалось, оказывает стадия впрыска, так как скорость расплава в микроточечном литнике очень высока. Основными влияющими факторами являются постоянные скорость и давление впрыска, однородность пластикации, надежность дозирования и термическая однородность расплава. Время цикла литья составляет всего 2 с, за это время литник застывает, и дальнейшее изменение качества изделия становится невозможным.

Современный уровень измерительной техники позволяет с необходимой точностью измерять практически все размеры микропрецизионных изделий. При достаточно жесткой конструкции изделия возможно применение рычажного микрометра МР для контроля наружных размеров (с точностью до 2 мкм). Лучше использовать бесконтактные методы измерения, приборы, имеющие устройство для увеличения проекции детали на экране (проекторы). Для определения внутренних размеров наибольшее применение находят универсальные измерительные микроскопы

типа УИМ-21 и УИМ-23, точность измерения которых составляет 1 мкм. Испытанию подвергают не саму деталь, а срезы с нее толщиной 1—2 мм. Способ срезов довольно трудоемок (3—5 мин на одно измерение) и он не пригоден в массовом производстве изделий из пластмасс [74].

Пневматический способ контроля размеров малогабаритных изделий из пластмасс является бесконтактным, отличается сравнительно высокой производительностью и точностью. С помощью этого способа можно проводить дистанционные измерения и измерения в труднодоступных местах (например, в глухих и глубоких отверстиях). Недостатки пневматического способа контроля: сравнительно небольшой диапазон измерения отклонений размеров с высокой точностью (30—40 мкм с точностью до 1 мкм), необходимость применения для питания пневматических измерительных устройств сжатого воздуха определенного давления. Кроме того, воздух должен тщательно фильтроваться и стабилизироваться по давлению. Пневматические устройства более инерционны, чем механические, электрические и др. Время срабатывания пневматических измерительных устройств составляет от 0,3 до 2,0 с. Во многих случаях при контроле микропрецизионных изделий из пластмасс это является удовлетворительным.

Пневматический способ контроля размеров деталей перспективен при управлении процессом переработки с помощью ЭВМ. Для контроля размеров малогабаритных и микропрецизионных изделий из термопластов перспективен также фотоэлектрический способ контроля, основанный на изменении сопротивления фотоэлементов при различной интенсивности светового потока.

Световой поток из источника света проходит через отверстие с переменным сечением (площадь сечения пропорциональна измеряемому размеру, например толщине) и падает на фотоэлемент. Если контролируемый размер отклонится от заданного значения, сила тока, протекающего по фотоэлементу, также отклонится от заданного значения. При контроле размеров изделий из пластмасс используют три вида фотоэлектрических явлений: внешний фотоэффект (фотоэлементы вакуумные или газонаполненные, фотоумножители), внутренний фотоэффект (фотосопротивления), запорный фотоэффект (фотоэлементы с запорным слоем, германиевые фотодиоды, фототриоды). Фотоэлектрические способы контроля микропрецизионных изделий пока используется лишь в лабораторных условиях.

ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПО КОНТРОЛЮ И РЕГУЛИРОВАНИЮ ТОЧНОСТИ

В настоящее время все отрасли промышленности, в том числе и по переработке пластмасс, начинают создавать и реализовывать комплексную систему управления качеством (и, следо-

вательно, точностью) продукции на базе стандартизации. Это — основное мероприятие и для обеспечения точности литых изделий из пластмасс.

Обязательной составной частью любой системы управления качеством является контроль, в процессе которого осуществляется сопоставление результатов функционирования системы с запланированными результатами. В системах управления качеством продукции контроль играет первостепенную роль, и от его совершенства, технического оснащения и использования зависит эффективность всей системы.

Следует отметить большую роль статистических методов анализа, контроля и регулирования качества и точности. Эти методы начали применяться в промышленности переработки пластмасс лишь в последние годы, хотя принципиальные возможности были известны давно [4]. Например, используют метод медиан и индивидуальных значений ($\bar{x} - \bar{x}_i$). Однако представляется, что другой статистический метод анализа и контроля, так называемый метод группировки, может оказаться более удобным, простым и производительным. Суть метода заключается в следующем. Контролируемые по любому параметру качества изделия сортируют на три группы с помощью соответствующих средств контроля. Границы сортировки x^- и x^+ или T_n и T_v (см. рис. 1) рассчитывают из условия $\delta' = 0,5\delta$, где δ' — интервал между границами сортировки x^- и x^+ , а δ — допуск контролируемого параметра (при условии симметричного расположения границ относительно середины поля допуска). Особенно хорошо этот метод зарекомендовал себя при контроле размеров пластмассовых изделий. Сортировка изделий может осуществляться универсальными инструментами или специально изготовленными жесткими калибрами с номинальными размерами x^- и x^+ .

Изделия с размерами больше x^+ образуют первую группу (число их n^+), с размерами x^+ и x^- — вторую группу (n^0), с размерами меньше x^- — третью группу (n^-). Контролируемая выборочная партия деталей отбирается при устойчивом налаженном технологическом процессе, когда есть уверенность, что постоянны во времени характеристики $m = \sigma/\delta$ и $l = \varepsilon/\delta$ (σ — среднее квадратическое отклонение контролируемого параметра — размера; ε — смещение среднего арифметического значения параметра от середины поля допуска δ). Величина m характеризует точность процесса ($m \leq 0,17^{+0,03}$), а l — его настроенность ($|l| \leq 0,05$). Фактические значения l и m определяются в зависимости от соотношения n^- , n^+ , n^0 (для нормального закона распределений эти значения табулированы). Преимущества метода группировки заключаются в том, что в одноразовой выборочной партии может быть не более 10 деталей (промежуток между двумя последовательными отборами выборочной партии зависит от производительности машины, технологического процесса). Для этого метода разработаны необходимые процедуры (конт-

рольные таблицы, диаграммы, инструкции), которые в условиях конкретного производства должны быть только дополнительно проверены.

Внедрение статистических методов анализа и контроля зависит во многом от состояния соответствующей измерительной базы и устройств накопления и переработки информации.

Надлежащая организация метрологических работ — одна из существенных сторон дела в обеспечении точности изготовления литых изделий из пластмасс.

Объектами контроля изделий являются: линейные и угловые размеры; погрешности формы и взаимного положения поверхностей; чистота поверхности.

В общем метрологическое обеспечение методов и средств размерного контроля предполагает наличие широкой номенклатуры универсальных и специализированных измерительных средств, а также методик, технологических инструкций и технологических рекомендаций по выбору и применению средств контроля размеров, их рациональной эксплуатации, поверке (сличению с эталонами), ремонту и юстировке. При этом следует учитывать специфику контроля пластмассовых изделий, особенности использования измерительных средств на различных этапах технологического процесса изготовления изделия; воздействие повышенной температуры, динамические воздействия, наличие начальной и последующей усадки изделия, а также изменение его размеров при хранении (например, из-за поглощения влаги материалом); степень автоматизации контроля (ручной, механизированный, автоматизированный); связь результатов контроля с настройкой технологического процесса (пассивный контроль, контроль с периодическим подрегулированием оборудования, активный контроль, связь с АСУ ТП и пр.); уровень квалификации лиц, использующих и обслуживающих контрольные средства на данном предприятии; специфические погрешности измерения, зависящие от метода измерения, от температурных деформаций, базирования изделия, измерительных усилий, оператора.

Следует иметь в виду, что, как правило, для измерения первых отливок применяют высокоточные бесконтактные измерительные средства (например, универсальный микроскоп УИМ-9), а затем в цехе используют контактные измерительные средства, что в ряде случаев приводит к повышению числа бракованных изделий за счет годных. Напротив, если размеры изделий имеют допуск, соизмеримый с точностью измерительного инструмента (например, контроль штангенциркулем размеров с допуском 0,1 мм), то бракованные изделия будут пропускаться, так проявляются погрешности метода измерения (см. стр. 8).

В последние годы разработаны и используются на практике ряд инструментов и приборов, предназначенных специально для контроля размеров пластмассовых изделий. К ним относятся:

универсальная установка для измерения усадки (и других размерных параметров) изделий из пластмасс и одновременно температуры их поверхности; агрегатированные световые приборы для контроля размеров и погрешностей формы, имеющие пониженное измерительное усилие и сменные измерительные наконечники [75]; типовая конструкция пневматической измерительной системы, состоящая из нормализованных узлов с пределами измерений до 0,17 мм (при работе с соплом) и до 0,5 мм (при работе с пневматическими контактными головками модели 302) [76]. Кроме того, разработаны приспособления для быстрого определения размеров и усадки стандартных образцов из пластмасс, а также форм для их изготовления [77].

Увеличенная погрешность от температурных деформаций при измерении деталей из пластмасс обусловлена тем, что коэффициент термического расширения пластмасс в несколько раз больше, чем у металла. Увеличенная погрешность от базирования детали обусловлена часто значительной погрешностью формы поверхности, по которым происходит базирование. Эти погрешности формы вызваны: короблением детали, местными усадочными утяжинами, неснятым облоем в местах разъема формы или, наоборот, сколами или следами его механической обработки. Дополнительные погрешности вызваны неправильным базированием детали при измерениях (например, при измерениях диаметра цилиндрической детали, имеющей технологическую конусность, измерительными средствами с плоскими измерительными наконечниками).

Кроме того, погрешности измерения связаны с большей, чем у металлов (в 10—20 раз) деформацией пластмассовых деталей под действием измерительного усилия.

Для контроля шероховатости и волнистости поверхности пластмассовых деталей используют методы: щуповой, оптический, пневматический, а также метод слепков.

Комплексная система управления качеством, о которой упоминалось выше, позволяет перейти от отдельных разрозненных мероприятий к четкой научной обоснованной системе. Обеспечение качества рассматривается не как контроль готовой продукции, а как проведение комплекса мероприятий, направленных на то, чтобы продукция соответствовала необходимым требованиям на всех стадиях — от разработки до производства.

Общие принципы построения управления качеством продукции на базе стандартизации исходят из следующего:

оно является элементом единого процесса управления народным хозяйством, имеет комплексный характер благодаря своим важнейшим аспектам: социальному, экономическому, научно-техническому, организационно-техническому, представляет собой непрерывный процесс управления общественным производством;

управление формированием, созданием, сохранением, восстановлением качества — единый процесс за период от проектирования до использования продукции по целевому назначению; стандартизация является организационно-техническим средством управления качеством продукции, а неотъемлемый элемент системы управления качеством — комплекс нормативно-технической документации; управление качеством включает оценку и нормирование свойств продукции, организацию трудовых процессов; оптимальность — основной принцип научного управления качеством.

ВОПРОСЫ ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТИ И КОНСТРУКТИВНОЙ ОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗДЕЛИЙ

Известно, что взаимозаменяемость — это свойство независимо изготовленных с заданной точностью изделий (деталей, узлов) обеспечивать беспригоночную сборку (или замену при ремонте) сопрягаемых деталей в узел, а узлов — в сборочные единицы (машины, приборы и т. д.) при соблюдении предъявляемых к ним технических требований. Детали будут взаимозаменяемы только тогда, когда их размеры, форма, физические свойства материала и другие количественные и качественные характеристики находятся в заданных пределах [5].

Для осуществления взаимозаменяемости деталей из пластмасс необходимо: рационально конструировать детали; правильно оформлять чертежи и другую нормативно-техническую документацию; разрабатывать рациональную, экономически обоснованную технологию; соблюдать технологический процесс изготовления и сборки деталей, а также необходимую точность измерений; применять и строго соблюдать требования соответствующих стандартов; обеспечивать единство мер, что достигается системой последовательной поверки измерительных средств.

Уровень взаимозаменяемости характеризуют коэффициентом взаимозаменяемости $K_v = c_v/c_\Sigma$ (или N_v/N_Σ), где c_v , N_v — соответственно трудоемкость изготовления или число собранных без пригонки взаимозаменяемых деталей; c_Σ , N_Σ — общая трудоемкость изготовления или число всех представленных на сборку деталей. В пределе $K_v = 1$.

Коэффициент взаимозаменяемости показывает, что нет прямой связи между уровнями взаимозаменяемости и точности (детали могут выполняться, например, с низкой точностью, но при этом взаимозаменяемость будет полной). Однако более высокая точность изделий позволяет, как правило, снизить стоимость последующей сборки; повысить межремонтный цикл работы машины (прибора, агрегата); удлинить срок работы изделия в целом; сделать более рентабельным процесс эксплуатации изделия (повышается к. п. д., уменьшается расход энергии и т. д.). Следовательно, в результате получают существенную экономическую эффективность от производства точных изделий.

В проблеме взаимозаменяемости деталей из пластмасс первоочередными являются следующие вопросы: 1) установление

функциональных параметров X_n детали; 2) предварительная оценка возможных связей между функциональными параметрами X_n детали и эксплуатационными показателями Q_i изделия (машины, прибора); 3) расчет формы и степени указанных связей (теоретически или на основании экспериментального определения полей рассеяния значений Q_i); 4) разработка и реализация методов расчета допусков функциональных параметров X_n детали.

Идея расчета таких допусков заключается в том, что если известна связь

$$Q_i = f(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n)$$

то поле рассеяния эксплуатационного показателя может быть представлено в виде:

$$\Delta_{Q_i} = \psi(\Delta_{X_1}, \Delta_{X_2}, \dots, \Delta_{X_i}, \dots, \Delta_{X_n})$$

Величина Δ_{Q_i} определяет значение функционального допуска δ_Φ , состоящего из конструктивного δ_i и эксплуатационного δ_Δ допусков. Последний и должен обеспечивать «сохранность» требуемой точности размера в течение всего заданного срока службы изделия. Влияние этого допуска на надежность и долговечность изделия предложено оценивать коэффициентом запаса точности [5]: $K_T = \delta_\Phi/\delta$. Определение допуска δ_Δ , как и коэффициента K_T , для деталей из пластмасс представляет весьма сложную многофакторную задачу. При ее решении необходимо учесть влияние физико-механических характеристик материала (влагопоглощение, тепловое расширение, модуль упругости и т. д.), конструктивных особенностей деталей (наличие элементов, способствующих короблению, усадке и другим изменениям), условий эксплуатации (температура, влажность и давление окружающей среды, воздействие агрессивных сред, солнечной радиации или радиоактивных излучений, нагрузки и т. д.), сроков и условий хранения деталей до сборки и собранного изделия до начала эксплуатации, режима эксплуатации изделия. Очевидно, значение δ_Δ должно быть тем больше, чем неблагоприятнее сочетание отмеченных факторов.

Используемые эмпирические зависимости позволяют приближенно оценивать δ_Δ , а при известных его значениях для каждого параметра X_n можно определить общий эксплуатационный допуск данного показателя Q_i :

$$\delta_{\Delta Q_i} = \sum_{i=1}^n A_i \delta_{\Delta x_i}$$

где A_i — коэффициент влияния i -го функционального параметра на данный эксплуатационный показатель.

Расчетное значение допуска для Q_i определяют по формуле:

$$\delta_{PQ_i} = \delta_{Q_i} - \delta_{\Delta Q_i}$$

где $\delta_{Q_i} = \pm 3\sigma_{Q_i}$.

Часто допуск эксплуатационного показателя Q_i представляют с помощью величины Q_d на основании установленных практикой соотношений предельно допустимых изменений соответствующего параметра.

Если известны значения $\delta_{P_{Q_i}}$, то конструктивные допуски δ определяют либо на основании метода равных допусков одного класса точности, либо по методу равного влияния. Последний метод целесообразен тогда, когда среди функциональных параметров, помимо размерных, имеются негеометрические величины. Тогда можно пользоваться формулой $\delta_i = \delta_{P_{Q_i}} / A_i n$, показывающей, что поле допуска δ_{Q_i} поровну распределяется между n функциональными параметрами с учетом влияния каждого. При этом чем больше коэффициент влияния A_i , тем жестче принимается допуск δ_i .

Для изготовителей и потребителей деталей из пластмасс важно, чтобы средние, «идеальные» значения эксплуатационных показателей $\bar{Q}_i$ были возможно выше, а рассеяние их было как можно меньше, т. е. чтобы значение $\pm 3\sigma_{Q_i}$ было минимальным, что особенно важно для обеспечения взаимозаменяемости.

Применительно к массовому автоматизированному производству, а именно таким является, в основном, литье изделий из пластмасс, эта проблема получает интересное направление. Как показали многочисленные исследования, распределение размеров в таких случаях весьма близко следует нормальному закону (или закону Гаусса). Используя это обстоятельство и вероятностный метод расчета допусков сопрягаемых размеров, допуски отверстий и валов могут быть расширены в среднем для случая соединений типа пластмасса — пластмасса в 1,4 раза, а типа пластмасса — металл в 1,7 раза (расширяются допуски только пластмассовой детали). Теоретически это показано В. Н. Гостевым [78]. В работе [79] подобная идея изложена гораздо позднее (1974 г.), но в ней сочетаются возможности расширения допусков размеров деталей из пластмасс как за счет вероятностных оценок, так и благодаря специальной сортировке партии деталей на группы (метод так называемой селективной сборки). Автор работы отмечает, что в связи с предстоящим в ближайшем будущем широким использованием ЭВМ для управления литьем под давлением изделий из пластмасс, создаются условия: существенного уменьшения рассеяния размеров, обусловленных случайными факторами; настройки процесса на «средний размер» (о необходимости этого см. [2]); достижения определенной и точной посадки на сборке при применении обратной связи по результатам измерений размеров деталей. В [79] утверждается также необходимость решать вопросы точности изготовления под углом зрения проблемы допусков и посадок и что пока никто не проявил инициативы для урегулиро-

вания вопроса стандартизации допусков и посадок деталей из пластмасс в международном масштабе. Однако опыт СССР опровергает это утверждение.

ГЛАДКИЕ СОЕДИНЕНИЯ

Обеспечение определенного уровня взаимозаменяемости деталей из пластмасс зависит от степени использования соответствующих стандартов. Для гладких соединений деталей из пластмасс сейчас разработан стандарт СЭВ СТ 179—75*. Он, в соответствии с действующим положением о стандартах СЭВ, одновременно будет и государственным стандартом СССР. Далее рассматриваются основные положения СТ 179—75.

Поля допусков, установленные по этому стандарту, относятся к температуре 20 °С и относительной влажности воздуха 65%. Ряды полей допусков, приведенные в табл. 8**, являются ограничением рядов полей допусков по СТ 144—75 и, кроме того, включают поля допусков, не вошедшие в СТ 144—75, но полученные на основе рекомендаций СТ 145—75. В отдельных технически обоснованных случаях допускается применение и других полей допусков, целесообразность введения которых будет подтверждена опытом промышленности.

Для образования таких дополнительных полей допусков устанавливаются следующие основные отклонения, не предусмотренные в СТ 145—75: для валов — au , az , ze ; для отверстий AU , AZ , ZE .

Таким образом, конструкторам предлагается достаточная номенклатура полей допусков для образования посадок деталей из пластмасс, и сложность состоит в выборе необходимого сочетания полей допусков отверстия и вала. Для соединений пластмассовых деталей с пластмассовыми или с металлическими по СТ 179—75 рекомендуют посадки, указанные в табл. 9. В случае металлических деталей в соединениях с пластмассовыми рекомендуются поля допусков (по СТ 144—75) для валов — $h7$, $h8$, $h9$, $h10$, $h11$, $h12$; для отверстий — $H7$, $H8$, $H9$, $H10$, $H11$, $H12$.

* Отечественная промышленность в настоящее время переходит на новую систему допусков и посадок, которая разрабатывается как единая система допусков и посадок для стран-членов СЭВ (ЕСДП СЭВ); основу ее составляет международная система допусков и посадок ИСО (см. Приложения).

В рамках ЕСДП СЭВ делегацией СССР в постоянной комиссии по стандартизации разработан, а в декабре 1975 г. утвержден стандарт СТ 179—75 «Поля допусков деталей из пластмасс», который распространяется на гладкие сопрягаемые и несопрягаемые элементы деталей из пластмасс с номинальными размерами от 1 до 500 мм. Срок начала применения стандарта в договорно-правовых отношениях по экономическому и научно-техническому сотрудничеству между странами-членами СЭВ и в народном хозяйстве СССР установлен с января 1978 г. СТ 179—75 разработан с учетом утвержденных и с января 1977 г. вступающих в действие двух основополагающих стандартов: СТ 144—75 «ЕСДП. Поля допусков» и СТ 145—75 «ЕСДП. Общие положения, ряды допусков и основные отклонения».

** Возможности обработки резанием (квалитеты точности 6 и 7, указанные в табл. 7) не учтены.

Поля допусков для деталей из пластмасс по СТ 179—75

Знаком + обозначены рекомендуемые поля допусков отверстий и валов.
Поля допуска отверстия получают сочетанием одного из основных отклонений: А, ..., ZC с показателем одного из квалификационных показателей: 8, ..., 17 (например, А11; D8; X10 и т. д.). Поле допуска вала получают сочетанием одного из основных отклонений: а, ..., zc с показателем одного из квалификационных показателей: 8, ..., 17 (например, а11; d8; x10 и т. д.).

Поля допусков отверстий

Квалитет точности	Основные отклонения															Квалитет точности
	A	B	C	D	E	F	H	J _s	N	U	X	Z	ZA	ZB	ZC	
8	+	++	+	++++	++	++	++++	++++	++++	+	+	+	+	+	+	
9																
10																
11																
12																
13																
14																
15																
16																
17																
Квалитет точности	a	b	c	d	e	f	h	j _s	n	u	x	z	za	zb	zc	

Поля допусков валов

* Поля допусков, как правило, не предназначенные для посадок;
** Поля допусков, не содержащиеся в СТ 144—75.

Кроме посадок, указанных в табл. 9, возможно образование других посадок из полей допусков валов и отверстий. Например, в соединениях пластмассовых деталей друг с другом (требующих, как правило, больших зазоров или натягов, чем соединения пластмассовых деталей с металлическими) могут быть целесообразны посадки, образованные полями допусков отверстий из системы вала с полями допусков валов из системы отверстия.

В табл. 9 рекомендации не дифференцированы в зависимости от номинального размера соединения, особенностей физических свойств пластмасс и других факторов, имеющих существенное значение, а это необходимо для обеспечения широкого и обоснованного применения стандарта. Подобный путь выбора посадок возможен лишь на основе соответствующих расчетов.

В Приложении I сопоставлены допуски по ЕСПД СЭВ (на базе системы ИСО) и системе ОСТ, а также приведены значения допусков в квалитетах точности, используемых для деталей из пластмасс.

РЕЗЬБОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Условия обеспечения взаимозаменяемости резьбовых изделий из пластмасс предусмотрены ГОСТ 11709—71 «Резьба метрическая для диаметров от 1 до 180 мм на деталях из пластмасс. Профиль, основные размеры и допуски».

Допуски резьб нормированы степенями точности 6, 7, 8, 9 и 10. Предусмотрено два типа посадок резьб: скользящие и с гарантированным зазором (рис. 26). Зазор может быть получен путем смещения номинального профиля у гайки в сторону увеличения, у болта — в сторону уменьшения. Посадка создается либо в системе отверстия полем допуска g болта, либо в системе вала полем допуска G. Ширину поля устанавливают в зависимости от выбранной степени точности. Гарантированный зазор по диаметрам, наружному, среднему и внутреннему, в результате такого смещения будет одинаков. Смещение принято по системе ИСО. Нижнее отклонение диаметров резьбы гайки равно нулю для поля допуска H ($E_{IH} = 0$). Верхнее отклонение диаметров резьбы болта поля допуска h равно нулю ($e_{sh} = 0$). Соответственно для полей допусков G и g установлены (в мкм): нижнее

* Первая редакция этого стандарта (1966 г.) послужила основой для разработки в СССР рекомендаций СЭВ по стандартизации: РС 582—66 (профиль и основные размеры резьбы) и РС 2271—66 (допуски).

В системе ЕСПД СЭВ предусмотрена разработка СТ СЭВ взамен РС 2271—66 в 1977—1979 гг. РС 582—66 заменяться стандартом СЭВ не будет, так как профиль, диаметры и шаги и основные размеры метрических резьб для изделий из пластмасс нашли свое отражение в общих стандартах СЭВ, посвященных метрической резьбе. ГОСТ 11709—71 (и еще ранее РС 582—66 и РС 2271—66) разработан на основе рекомендаций ИСО, и в этом плане можно считать, что содержание стандарта будет стабильно на достаточно длительный период [80].

Рекомендуемые посадки деталей из пластмасс

Знаком + обозначены рекомендуемые посадки в системе отверстия и в системе вала (за исключением посадок с *).
 Для посадки в системе отверстия используют одно из основных отклонений отверстий (от H8 до H13) и валов (от au до ze). Квалитет точности основного отклонения вала устанавливают по квалитету точности основного отверстия (за исключением вариантов с **); например $\frac{H11}{h12}$; $\frac{H12}{h13}$ и т. д.

Для посадки в системе вала используют одно из основных отклонений отверстий (от AY до ZE) и валов (от h8 до h13). Квалитет точности основного отклонения вала устанавливают по квалитету точности основного вала (за исключением вариантов **); например, $\frac{h11}{H11}$; $\frac{h12}{H12}$ и т. д.

Система отверстия →

Основ- ное от- верстие	Основные отклонения валов																		Основ- ной вал
	ay	az	a	b	c	d	e	f	h	—	k	u	x	y	z	za	zb	zc	
h8					+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
h9					+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
h10					+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
h11			+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
h12		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
h13	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	AY	AZ	A	B	C	D	E	F	H	N	—	U	X	Y	Z	ZA	ZB	ZC	ZE
	Основные отклонения отверстий																		

← Система вала

* Посадки только в системе отверстия: $\frac{H8}{c8}$; $\frac{H8}{x8}$; $\frac{H8}{z8}$.

** Основное отверстие (или основной вал) на один квалитет точнее основного отклонения вала (или основного отклонения отверстия): $\frac{H9}{x10}$; $\frac{H9}{y10}$; $\frac{H9}{z10}$; $\frac{H9}{za10}$; $\frac{H9}{zb10}$; $\frac{H9}{zc11}$; $\frac{H9}{h9}$; $\frac{H9}{h10}$.

отклонение диаметров резьбы гайки $EI_g = +(15 + 11s)$; верхнее отклонение диаметров резьбы болта $es_g = -(15 + 11s)$.

Основным рядом допусков является 6-я степень точности, допуск которой — резьбовая единица допуска. Допуск любой степени получается умножением этой единицы на коэффициент точности, который установлен по ряду предпочтительных чисел R10 (от 1,25 для 7-й до 2,5 для 10-й степени точности).

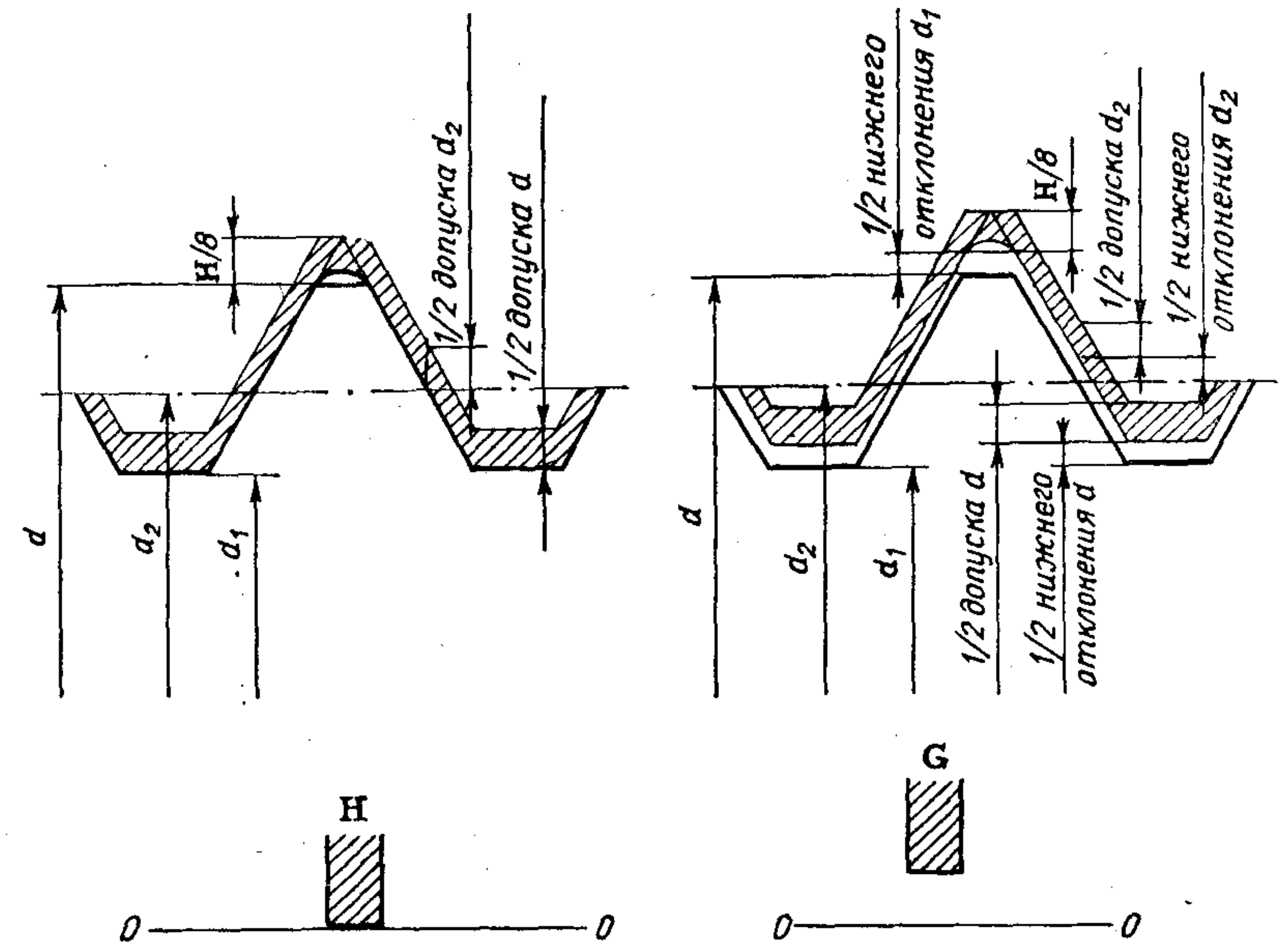


Рис. 26. Схема расположения полей допусков (на примере гайки).

Значение допусков T (в мкм) среднего диаметра d_2 (в мм) болта для 6-й степени точности рассчитано по следующей формуле:

$$Td_{2(6)} = 90s^{0.4}d^{0.1}$$

Допуск гайки $TD_{2(6)}$ больше допуска болта $Td_{2(6)}$ в 1,32 раза.

Поля допусков рекомендуется выбирать с учетом длин свинчивания, которые разделены на 3 группы: короткие S , нормальные N и длинные L .

К группе S относятся резьбы с длиной свинчивания $l \leq 2,24sd^{0.2}$. К группе N — резьбы с длиной свинчивания $2,24sd^{0.2} < l \leq 6,7sd^{0.2}$. К группе L — резьбы с длиной свинчивания $l > 6,7sd^{0.2}$.

Степени точности в зависимости от длины свинчивания классифицируют по трем классам точности:

Класс точности	Средний	Грубый	Очень грубый
Поля допусков * для длин свин- чивания			
N	$\frac{6h; 6g}{6H; 6G}$	$\frac{8h; 8g}{7H; 7G}$	$\frac{10h; 8h}{9H; 8H}$
S	—	$\frac{7h; 6h; 7g; 6g}{6H; 6G}$	$\frac{9h; 8h; 9g; 8g}{8H; 8G}$
L	$\frac{7h; 6h; 7g; 6g}{7H; 7G}$	$\frac{9h; 8h; 9g; 8g}{8H; 8G}$	

* Числитель — поля допусков для болтов, знаменатель — для гаек.

Практически выбор степени точности зависит от достижимой точности резьбы, полученной литьем под давлением. В ГОСТ 11709—71 приведены номограммы для определения достижимой степени точности резьбы болтов и гаек в зависимости от числа витков на длине свинчивания, колебания усадки пластмассы, шага и диаметра резьбы. Для некорректируемых по шагу резьбообразующих элементов точность будет зависеть еще от максимальной усадки пластмассы.

Степень точности следует устанавливать с учетом эксплуатационных требований, предъявляемых к резьбовому соединению.

КОНСТРУКТИВНАЯ ОПРЕДЕЛЕННОСТЬ КАК ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ СВОЙСТВО ИЗДЕЛИЙ

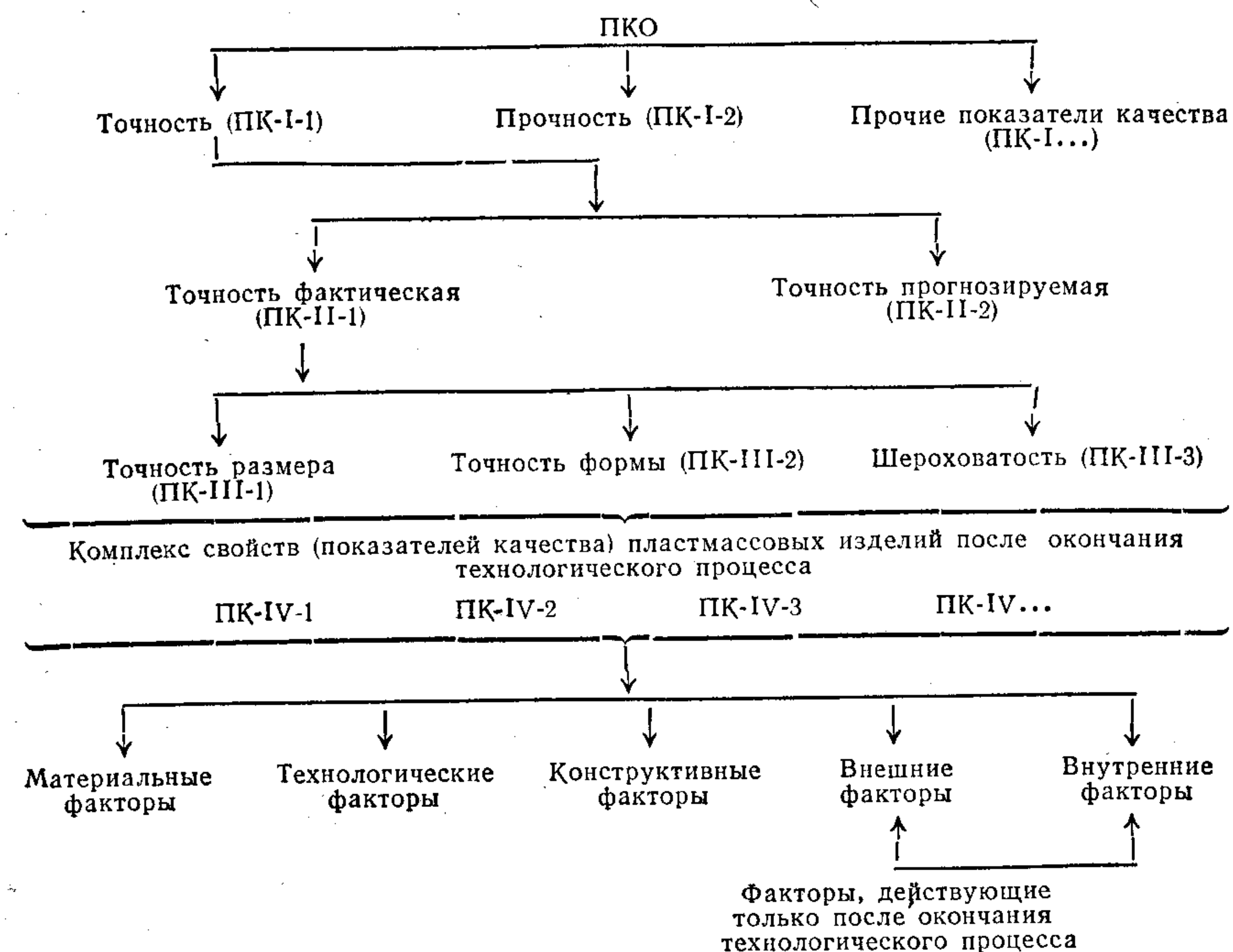
Точность изделий из пластмасс характеризует только одну из сторон их качества. Под качеством понимают совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением. ГОСТ 15467—70 «Качество продукции. Термины» вводит понятие «единичный показатель качества», относящийся только к одному из свойств продукции. Но показатель «точность» имеет сложную структуру, так как он может реализоваться как точность размеров, формы, массы и в сочетании этих показателей, а также в их изменении во времени. Поэтому точность изделий из пластмасс следует рассматривать в более общем плане их конструктивной определенности.

Конструктивная определенность деталей из пластмасс — функциональное свойство, благодаря которому сохраняются необходимые эксплуатационные показатели в допустимых пределах при действии в течение заданного периода времени комплекса внешних и внутренних факторов (нагрузки, температуры, структурных изменений и т. д.).

Принцип конструктивной определенности ранее использовался при конструировании деталей из металлов и сплавов. Однако для пластмасс он приобретает отличительную особенность, заключающуюся в необходимости учета временных условий влияния внешних и внутренних возмущающих факторов.

Принцип конструктивной определенности позволяет установить связь между прочностью и точностью. Действительно, деформации, вызываемые действием допускаемых для данного материала нагрузок, могут оказаться значительными, приводящими к заметному изменению объемных и линейных параметров пластмассовых изделий. Прочностные характеристики непосредственно влияют на точность; зачастую наблюдается и обратная связь. Таким образом, показатель конструктивной определенности (ПКО) является комплексным показателем качества (схема 5) [81, 82].

Схема 5. Конструктивная определенность пластмассового изделия (ПКО)



Согласно определению, деталь обладает конструктивной определенностью, если единичные показатели качества I порядка (ПК-I-1, ПК-I-2 и т. д.) не выходят за пределы, заданные допусками. Показателями качества первого порядка являются такие составляющие конструктивной определенности, отклонение которых за допустимые пределы сразу же устраняет конструктивную определенность данного изделия. Точность и прочность классифицируют как показатели первого порядка, т. е. они в принципе обязательные показатели качества любого пластмассового изделия.

Среди показателей качества I порядка могут быть показатели регламентированные и нерегламентированные. Желательно, чтобы все показатели качества I порядка имели

регламентированные пределы. Чаще всего так и происходит, но нередко показатели качества I порядка не регламентируются, а лишь подразумеваются.

Рассмотрим следующий пример: изготавливают изделие, у которого регламентированы следующие качественные показатели I порядка: точность, чистота поверхности, внешний вид. В этом случае прочность в явном виде нигде не фигурирует, т. е. являясь необходимым показателем качества, прочность лишь подразумевается, но не регламентируется.

Регламентация пределов показателей качества должна предусматривать возможность их контроля. Примером неконтролируемого показателя качества могут служить остаточные напряжения в изделии. К сожалению, сейчас еще нет необходимых надежных методов, чтобы осуществлять такой контроль. Можно использовать два пути для решения задачи. Во-первых, регламентировать какой-то другой показатель качества, который представляется связанным с первым показателем. Например, для ограничения остаточных напряжений устанавливают требования к показателям ударной вязкости или разрушающему напряжению при растяжении, к стойкости в определенном растворителе и т. д. (Причем предусматривают контроль не самого изделия, а какой-либо модели — бруска, диска и т. д.) Во-вторых, отнести показатель качества (остаточные напряжения) в пределах того же уровня в разряд нерегламентированных, назначая повышенный коэффициент прочности или выбирая более высококачественный материал и т. д.

Второй путь на практике приводит, как правило, к значительным дополнительным расходам. Но и подобные мероприятия не могут в полной мере обеспечить конструктивную определенность детали. Если какой-либо показатель качества назначен как показатель I порядка, то с целью безусловного выполнения конструктивной определенности изделия его необходимо регламентировать. Если какой-либо показатель качества не относится к I порядку, то регламентация его приводит лишь к издержкам производства, никак не влияя на конструктивную определенность. Поэтому не следует всякий показатель качества поднимать на I порядок и регламентировать, иначе можно затратить неоправданно большое количество средств на достижение заданного уровня и контроль соответствующего параметра. В то же время перевод ряда показателей качества I порядка в разряд нерегламентированных зачастую приводит к браку: к невозможности вообще использовать изделие или к необходимости вносить в него исправления. Формами регламентации показателей качества являются стандарты.

После того как определено место, занимаемое точностью среди других показателей качества, можно подробнее остановиться на факторах, влияющих на точность (прочность и другие показатели качества I порядка в дальнейшем не затрагиваются).

Точность пластмассового изделия (ПК-I-1) означает, как известно, степень соответствия размеров реальной детали параметрам, указанным на чертеже, в любой момент заданного периода «существования» готовой детали. Подобное определение точности, по нашему мнению, позволяет не только фиксировать фактическую исходную точность (ПК-II-1), определяемую прямым измерением детали (с возможной последующей оценкой по квалитетам точности), но и предполагает возможность прогнозирования будущей фактической точности через любой реальный задаваемый промежуток времени. На схеме 5 это отражено введенным термином «прогнозируемая точность» (ПК-II-2) — степенью соответствия размеров изделия параметрам, заданным на чертеже (с учетом периода хранения и эксплуатации); ПК-II-2 вычисляют по изменению первоначальных размеров под влиянием внешних и внутренних факторов (эксплуатационная нагрузка, влагонасыщение, релаксация остаточных напряжений, износ и др.). Прогнозируемая точность может описываться во времени аналитически, графически, с помощью таблиц или другими способами.

Фактическая точность пластмассовой детали по мере 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.

Из схемы 5 видно, что фактическая исходная точность (ПК-II-1) определяется точностью размера (ПК-III-1), точностью формы (ПК-III-2) и шероховатостью поверхности (ПК-III-3). В свою очередь, рассмотренные показатели качества III порядка полностью определяются комплексом свойств, описывающих достигнутое (или будущее) состояние изделия, зависящее от химических, физических, механических, структурных, геометрических и прочих i -х параметров ($\sum \text{ПК-IV}_i$).

Каждое изделие требует конкретного подхода к оценке функциональных свойств. Действительно, ответственные сопрягаемые детали (например, пластмассовые подшипниковые втулки) должны прежде всего сохранять в течение заданного времени заданную точность посадки, и для них превалирующим ПКО является точность. Для ответственных несопрягаемых деталей (например, лопаток турбин) главным является не точность, а прочность; детали вспомогательного назначения, наряду с требуемой минимальной прочностью, должны отличаться определенными эстетическими показателями; эти последние являются показателями качества I порядка для деталей — игрушек и других предметов домашнего обихода. Таким образом, используя на практике рассматриваемый принцип, можно не только классифицировать изделия по признаку их ПКО, но и более обоснованно решать вопросы точности деталей из пластмасс.

Основные положения ЕСДП СЭВ

Чтобы изделие отвечало своему целевому назначению, его размеры должны выдерживаться между двумя допустимыми предельными размерами, разность которых образует допуск. Для удобства указывают номинальный размер изделия, а каждый из двух предельных размеров определяют по его отклонению от этого номинального размера. Допуски и допускаемые отклонения, устанавливаемые СТ 145—75 (см. стр. 97), относятся к изделиям, размеры которых определены при 20 °С. Применяемые термины «вал» и «отверстие» относятся не только к цилиндрическим изделиям, но и к элементам другой формы (например, ограниченными двумя параллельными плоскостями). По СТ 145—75 приняты следующие условные обозначения отклонений: верхнее отклонение отверстия ES; верхнее отклонение вала es; нижнее отклонение отверстия EI; нижнее отклонение вала ei.

При соединении двух изделий образуется посадка, которая характеризует свободу относительного перемещения соединяемых изделий или степень сопротивления их взаимному смещению. Посадки с зазором, натягом и переходные применяются, как правило, в системе отверстия и в системе вала.

Допуск, значение которого зависит от номинального размера, обозначается цифрами (они указывают качество, например, IT5, IT10 и т. д.). Положение поля допуска относительно нулевой линии, зависящее от номинального размера, обозначается буквой латинского алфавита (или в некоторых случаях двумя буквами) — прописной для отверстий, строчной для валов.

Размер, для которого указывают поле допуска, обозначается, например, так: 40 g6; 40 H7, где 40 — номинальный размер, мм; g, H — положение полей допусков вала или отверстия соответственно; 6, 7 — качества вала (отверстия). Посадка обозначается с указанием полей допусков для каждого элемента, начиная с отверстия, например 40 H7/g6.

СТ 145—75 устанавливает основные термины и определения.

Чтобы гарантировать выполнение функциональных требований системы допусков и посадок, предельные размеры на предписанной длине истолковывают следующим образом. Для отверстия диаметр наибольшего идеального воображаемого цилиндра (он может быть вписан в отверстие так, чтобы плотно контактировать с наиболее выступающими точками поверхности) не должен быть меньше, чем проходной предел размера (термин, применяемый к тому из двух предельных размеров, который соответствует максимальному количеству материала, а именно, верхнему пределу для вала, нижнему пределу для отверстия). Кроме того, наибольший диаметр в любом месте отверстия не должен превышать непроходного предела размера (термин, применяемый к тому из двух предельных размеров, который соответствует минимальному количеству материала, а именно, нижнему пределу для вала, верхнему пределу для отверстия). Аналогично для валов необходимо учитывать диаметр наименьшего идеального воображаемого цилиндра, который не должен быть больше, чем проходной предел размера; минимальный диаметр в любом месте вала не должен быть меньше, чем непроходной предел размера.

Номинальный размер — размер, относительно которого определяют предельные размеры; он служит началом отсчета отклонений. Нулевая линия — линия, соответствующая номинальному размеру, от нее откладываются отклонения размеров при графическом изображении допусков и посадок.

Основное отклонение — одно из двух отклонений (верхнее или нижнее), используемое для определения положения поля допуска относительно нулевой линии. В ЕСДП СЭВ таким отклонением является отклонение, ближайшее к нулевой линии.

Квалитет — совокупность допусков, соответствующих одинаковой степени точности для всех номинальных размеров.

Допуски и отклонения для размеров до 500 мм устанавливают для тринадцати интервалов номинальных размеров в девятнадцати качествах, причем квалитет 18 включен специально в СТ 179—75 (см. стр. 97).

Приложение II

Сопоставление допусков по ЕСДП СЭВ (на базе системы ИСО) и системе ОСТ для размеров 1—500 мм (применительно к деталям из пластмасс)

Квалитеты ИСО	Ближайшие поля допусков или классы точности по ОСТ		Квалитеты ИСО	Ближайшие поля допусков или классы точности по ОСТ	
	валов	отверстий		валов	отверстий
IT6	$B = C_2; X_1^*$	$A_1 = C_1$	IT11	кл. 4	кл. 4
IT7	$B_{2a} = C_{2a}^*; X; G_p$	$A = C; X_1^*$	IT12	кл. 4a **	кл. 4a **
IT8	$L; Ш; T X^*; Pr_{2a}^*$	$A_{2a} = C_{2a}^*$	—	кл. 5	кл. 5
—	$B_3 = C_3$	$L; Ш$	IT13	кл. 6 **	кл. 6 *
IT9	X_3	$A_3 = C_3$	IT14	кл. 7	кл. 7
IT10	кл. 3a *	X_3	IT15	кл. 8 *	кл. 8 *
		кл. 3a *	IT16	кл. 9 *	кл. 9 *
			IT17	кл. 10 *	кл. 10 *
			IT18	—	—

* Допуски по системе ОСТ, полностью совпадающие с ИСО при размерах 1—180 мм.

** Классы точности по ГОСТ 11710—71 «Допуски и посадки деталей из пластмасс».

Приложение III

Значения допусков (в мкм) в качествах точности

Интервалы размеров, мм			Квалитет						
			6	7	8	9	10	11	12
До 3			6	10	14	25	40	60	100
свыше	3 до 6		8	12	18	30	48	75	120
»	6 » 10		9	15	22	36	58	90	150
»	10 » 18		11	18	27	43	70	110	180
»	18 » 30		13	21	33	52	84	130	210
»	30 » 50		16	25	39	62	100	160	250
»	50 » 80		19	30	46	74	120	190	300
»	80 » 120		22	35	54	87	140	220	350
»	120 » 180		25	40	63	100	160	250	400
»	180 » 250		29	46	72	115	185	290	460
»	250 » 315		32	52	81	130	210	320	520
»	315 » 400		36	57	89	140	230	360	570
»	400 » 500		40	63	97	155	250	400	630

Интервалы размеров, мм			Квалитет					
			13	14	15	16	17	18
До 3			140	250	400	600	1000	—
свыше	3 до 6		180	300	480	750	1200	—
»	6 » 10		220	360	580	900	1500	—
»	10 » 18		270	430	700	1100	1800	2700
»	18 » 30		330	520	840	1300	2100	3300
»	30 » 50		390	620	1000	1600	2500	3900
»	50 » 80		460	740	1200	1900	3000	4000
»	80 » 120		540	870	1400	2200	3500	5400
»	120 » 180		630	1000	1600	2500	4000	6300
»	180 » 250		720	1150	1850	2900	4600	7200
»	250 » 315		810	1300	2100	3200	5200	8100
»	315 » 400		890	1400	2300	3600	5700	8900
»	400 » 500		970	1550	2500	4000	6300	9700

Примечание. Для размеров до 1 мм качества от 14 до 18 не применяются.

Приложение IV

Достижимые качества точности для размеров литых изделий из пластмасс

Пластмасса	Интервалы размеров, мм	Качества точности для размеров				
		без предоставленных допусков	типа A ₁ (см. рис. 25) с предоставленными допусками		типа A ₂ и A ₃ (см. рис. 25) с предоставленными допусками	
			нормальная точность	повышенная точность	нормальная точность	повышенная точность
Фенопласт литевой с наполнителем (древесной мукой)	Свыше 1 до 250	13; 15	От 11 до 13	10	13; 14	11; 12
Полистирол, сополимеры стирола	Свыше 1 до 500	13; 15	То же	10	13; 14	11; 12
Полиэтилен низкой плотности	То же	17; 18	16; 17	14; 15	17; 18	15; 16
средней плотности	>	14; 15	13; 14	11; 12	14; 15	12; 13
высокой плотности	>	13; 14	12; 13	10; 11	13; 14	11; 12
Полипропилен	>	От 14 до 16	13; 14	11; 12	14; 15	12; 13
Капролон (поли-ε-капролактан)	>	15; 16	14; 15	12; 13	15; 16	13; 14
Поликарбонат	>	От 13 до 15	12; 13	10; 11	13; 14	11; 12

Примечание. 1. Таблица составлена на основании рекомендаций стандарта ГДР TGL 22-240, включенных в качестве одного из вариантов в методические материалы СЭВ «Технологические рекомендации по применению СТ 179-75».

2. Толщина стенок деталей, отлитых под давлением, до 18 мм.

3. Для деталей из полистирола качество 10 для размеров до 80 мм и качество 11 для размеров до 250 мм.

Приложение V

Назначение качеств точности размеров формуемых элементов в зависимости от точности изделий

Качества размеров деталей из пластмасс	Качества размеров формуемых элементов		
	вал (пуансон)	отверстие (матрица)	межосевое расстояние
IT10	h6—h8	H6—H8	±1/2 (IT6—IT8)
IT11	h7—h9	H7—H9	±1/2 (IT7—IT9)
IT12	h8—h10	H8—H10	±1/2 (IT8—IT10)
IT13	h9—h11	H9—H11	±1/2 (IT9—IT11)
IT14÷17	h10—h12	H10—H12	±1/2 (IT10—IT12)

ЛИТЕРАТУРА

- Горелова Г. В., Здор В. В., Свечарник Д. В. Метод оптимума номинала и его применение. М., «Энергия», 1970. 200 с.
- Брагинский В. А. Технология прессования точных деталей из термореактивных пластмасс. Л., «Химия», 1971. 256 с.
- Марков Н. Н., Кайнер Г. Б., Сацердотов П. А. Погрешность и выбор средств при линейных измерениях. М., «Машиностроение», 1967. 392 с.
- Брагинский В. А. Анализ качества производства деталей из пластмасс с помощью математической статистики. Л., изд. ЛДНТП, 1959. 28 с.
- Якушев А. И. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения (изд. 4, стереотип.). М., «Машиностроение», 1975. 472 с.
- Термопласты конструкционного назначения. Под ред. Е. Б. Тростянской. М., «Химия», 1975. 240 с.
- Лапшин В. В. Основы переработки термопластов литьем под давлением. М., «Химия», 1974. 272 с.
- Зайферт У., Брагинский В. А., Мирзоев Р. Г. В кн.: Машины и технология переработки полимеров. Л., изд. ЛТИ им. Ленсовета, 1970, с. 42—50.
- Cornely J. Verfahrenstechnik beim Spritzgießen von Thermoplasten. Leipzig, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1969. 312 S.
- Канавец И. Ф., Баталова Л. Г. Пласт. массы, 1964, № 9, с. 50—54.
- Böhm R., Schaaf W. Plaste u. Kautschuk, 1964, H. 8, S. 504—510.
- Beschel H., Peters H., «Kunststoffe», 1963, H. 5, S. 277—281.
- Breuer H., Rehage G. Kolloid. Z., 1967, Bd. 216/17, S. 159—166.
- Hellwege K.-H., Knappe W., Lehmann P. Ibid., 1962, Bd. 183, S. 110—120.
- Тагер А. А. Физико-химия полимеров. М., «Химия», 1968. 536 с.
- Квятковская Г. Ф. Пласт. массы, 1968, № 2, с. 53—56.
- Schram A. Kolloid. Z., 1957, Bd. 151, S. 18—21.
- Stockmair W. «Kunststoffe», 1962, H. 9, S. 522—524.
- Houwink R., Staverman J. Chemie und Technologie der Kunststoffe. Leipzig, Akademische Verlagsgesellschaft, 1963. 402 S.
- Wiegand H., Vetter H. «Kunststoffe», 1966, H. 11, S. 761—769.
- Мак-Келви Д. М. Переработка полимеров. Пер. с англ. М., «Химия», 1965. 442 с.
- Бернхардт Э. Переработка термопластичных материалов. Пер. с англ. М., «Химия», 1965. 748 с.
- Рагимов А. М., Сагалаев Г. В., Шембель Н. Л. Пласт. массы, 1971, № 9, с. 30—34.
- Becht J., Hellwege K.-H., Knappe W. Kolloid. Z., 1967, Bd. 216/17, S. 150—158.
- Leegwater M., «Plastverarbeiter», 1970, H. 4, S. 279—282.
- Menges G., Leibfried D. Ibid., H. 5, S. 313—320.
- Абрамов В. В., Канавец И. Ф. Пласт. массы, 1967, № 1, с. 36—39.
- Bauer W., Weisshaar F. «Plastverarbeiter», 1963, H. 8, S. 443—448.
- Woebcken W., Seus E. «Kunststoffe», 1967, H. 8, S. 637—644.
- Schlunke M., Patschke E. «Plastverarbeiter», 1971, H. 2, S. 89—93.
- Geyer H. «Kunststoffe», 1975, Bd. 65, H. 1, S. 7—13.
- Абрамов В. В., Канавец И. Ф. Пласт. массы, 1966, № 2, с. 23—25.
- Woebcken W. «Kunststoffe», 1961, Bd. 51, H. 9, S. 547—551.
- Bruton I. F. «Modern Plastics», 1962, 3, p. 127—214.

35. Завгородний В. К., Калинин Э. Л., Марам Е. И. Литые машины для термопластов и реактопластов. М., «Машиностроение», 1968. 376 с.
36. Торнер Р. В. Основные процессы переработки полимеров. М., «Химия», 1972. 454 с.
37. Seyfarth P. Plaste u. Kautschuk, 1969, H. 1, S. 42—45.
38. Ложечко Ю. П., Матвеев М. Н., Брагинский В. А. В кн.: Машины и технология переработки полимеров. Л., изд. ЛТИ им. Ленсовета, 1974, с. 147—154.
39. Соколов А. Д., Швец М. М. Литые реактопласты. Л., «Химия», 1975. 88 с.
40. Сягаева С. И. Технол. судостроения, 1972, № 9, с. 31—36.
41. Технологичность конструкций деталей и узлов коммутационной аппаратуры и агрегатов из термореактивных пластмасс (РТМ-1970). 2-е изд. М., изд. Н.-и. ин-та технологии и организации производства, 1974, 218 с.
42. Sors L. Plaste u. Kautschuk, 1975, H. 2, S. 197—199.
43. Пронников А. С. Основы надежности и долговечности машин. М., Изд. стандартов, 1969. 160 с.
44. Catic J., Wübken G. «Kunststoffe», 1971, H. 1, S. 775—779.
45. Кубарев А. И., Климов Ю. Ф., Зайцева Л. П. Методы оценки и обеспечения надежности технологических процессов. М., Изд. стандартов (ВНИИНМАШ, ВНИИКИ. Серия: Управление качеством продукции), 1975, 42 с.
46. Catic J. «Plastverarbeiter», 1974, H. 11, S. 679—682.
47. Catic J. «Kunststoffe», 1975, H. 3, S. 122—128.
48. Горкер М. И., Брагинский В. А. Оптимизация и управление процессом литья под давлением полимерных материалов. М., изд. ЦБНТИмедпром. Мин. мед. пром. СССР. 1976. 52 с.
49. Menges G., Stitz S. «Gummi-Asbest-Kunststoffe», 1972, Bd. 25, H. 4, S. 309—318.
50. Menges G., Vardel J. Ibid., H. 8, S. 718—722.
51. Melchior F. «Kunststoffe», 1971, Bd. 61, H. 9, S. 609—612.
52. Peter J. Soc. Plast. Eng. 30th Ann. Techn. Conf. Chicago, III, 1972, part 2, p. 847—850.
53. Chandra R. Ibid., p. 831—836.
54. Stitz S., Hengesbach H. «Plastverarbeiter», 1974, H. 4, S. 201—208.
55. Paulson D. SPE Journal, 1971, 27, № 1, p. 37—41.
56. Tadatoshi S., Kiyokazo K. Japan Plast. Age, 1972, v. 10, № 2, p. 14—19.
57. Hunkar D. PRT/Polymer Age, 1973, v. 4, № 10, p. 375—377.
58. Menges G. «Kunststoffe», 1971, Bd. 61, H. 2, S. 74—80.
59. Currie R. «Modern Plastics», 1968, v. 45, № 14, p. 122—126.
60. Точность производства в машиностроении и приборостроении. Под ред. А. Н. Гаврилова, М., «Машиностроение», 1973. 568 с.
61. Дунин-Барковский И. В., Смирнов Н. В. Теория вероятностей и математическая статистика в технике. М., Гостехиздат, 1955. 426 с.
62. Бронфельд Г. Б., Михайлов А. В. В кн.: Качество пластмасс и надежность изготавливаемых из них изделий. Л., изд. ЛДНТП, 1976, с. 39—44.
63. Налимов В. В. Теория эксперимента. М., «Наука», 1971. 208 с.
64. Горский В. Г., Адлер Ю. П. Планирование промышленных экспериментов. М., «Металлургия», 1974. 264 с.
65. Seifert U., Mirsojew R. G., Braginski W. A. Plaste u. Kautschuk, 1975, H. 2, S. 123—126.
66. Ашмарин И. П., Васильев Н. Н., Амбросов В. А. Быстрые методы статистической обработки и планирование экспериментов. Л., Изд. ЛГУ, 1971. 88 с.
67. Адлер Ю. П. Введение в планирование эксперимента. М., «Металлургия», 1969. 157 с.
68. Beck H. Spritzgießen. München. C. Hanser Verlag, 1963. 220 S.
69. Налимов В. В. Применение математической статистики при анализе вещества. М., «Наука», 1960. 384 с.
70. Горкер М. И., Брагинский В. А., Полежаев В. В. Пласт. массы, 1975, № 11, с. 34—36.
71. Giraudi C. Kunstst.-Plast., 1974, 21, № 11, S. 17—21.
72. Stiner W. R. Ibid., S. 27—28.
73. Воробьев Ю. А. В кн.: Новое в расчете точности сопряжений деталей из пластмасс. Л., изд. ЛДНТП, 1974, с. 9—12.
74. Горкер М. И. В кн.: Качество пластмасс и надежность изготавливаемых из них изделий. Л., изд. ЛДНТП, 1976, с. 81—84.
75. Брагинский В. А., Ростовцев А. М., Шумихин В. Н. В кн.: Полимеры в машинах. Серия С-IX «Новые материалы в машиностроении». М., изд. НИИМаш, 1968.
76. Говоров И. Д., Ростовцев А. М. Механизация обработки и контроля деталей из пластмасс. М., ГОСИНТИ, 1969. 24 с.
77. Ростовцев А. М., Криваткин А. М., Мотавкин А. В. В кн.: Стеклопластиковое волокно и стеклопластики. Вып. 2. М., изд. НИИТЭХИМ, 1971, с. 50—52.
78. Гостев В. Н. В кн.: Точность и взаимозаменяемость деталей из пластмасс. Л., изд. ЦБТИ, 1963, с. 18—36.
79. Catic J. «Kunststoffe», 1974, H. 3, Bd. 64, S. 141—146.
80. Плуталов В. Н. В кн.: Новое в расчете точности сопряжений деталей из пластмасс. Л., изд. ЛДНТП, 1974, с. 5—8.
81. Брагинский В. А., Мирзоев Р. Г. В кн.: Конструирование деталей из пластических масс. М., изд. МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского, 1966, с. 20—30.
82. Ложечко Ю. П., Брагинский В. А. В кн.: Машины и технология переработки полимеров. Л., изд. ЛТИ им. Ленсовета, 1972, с. 81—87.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Производственные задачи обеспечения и повышения точности изделий . .	5
Усадка литых изделий	12
Усадка при литье под давлением	14
Усадка при литье без давления	36
Методы оценки усадки	40
Взаимосвязь усадки и точности	43
Точность литых изделий	45
Литьевая система как объект регулирования и управления	49
Средства контроля, регулирования и управления	56
Методы экспериментального исследования точности	70
Нормы точности	82
Точность микропрецизионных изделий	87
Организационно-технические мероприятия по контролю и регулированию точности	90
Вопросы взаимозаменяемости и конструктивной определенности изделий .	94
Гладкие соединения	97
Резьбовые соединения	99
Конструктивная определенность как функциональное свойство изделий	102
Приложения	106
Литература	109

Владимир Абрамович Брагинский

ТОЧНОЕ ЛИТЬЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПЛАСТМАСС

Редактор Э. Э. Ярцева

Техн. редактор Ф. Т. Черкасская

Корректор Батракова Г. П.

Обложка художника Л. А. Яценко

М-12804. Сдано в наб. 31.08.76. Подп. к печ. 7.01.77.

Формат бумаги 60×90¹/₁₆. Бум. тип. № 2. Усл. печ. л. 7,0.

Уч.-изд. л. 7,8. Зак. 294. Тираж 8800 экз.

Изд. № 616. Цена 39 коп.

Издательство «Химия», Ленинградское отделение. 191186, г. Ленинград,
Д-186. Невский пр., 28

Ордена Трудового Красного Знамени Ленинградская типография № 2
имени Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном
комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии
и книжной торговли
198052, Ленинград, Л-52, Измайловский проспект, 29.