

Достоинства и недостатки трех методов литья под давлением, наиболее пригодных для изготовления деталей оптического назначения, по сравнению со стандартной литьевой технологией

Характеристика деталей	Литье с подпрессовкой	Литье с вариотермическим термостатированием формы	Многослойное литье
Большая толщина стенок (> 4 мм)	(+) Высокая размерная точность за счет создания давления формования при подпрессовке; (+) отсутствие необходимости в утолщенном литнике; (+) меньший уровень остаточных напряжений благодаря равномерному давлению формования	(+) Уменьшение следов от свободных струй; (+) возможность уменьшения времени охлаждения	(+) Возможность уменьшения времени цикла (+) повышенная точность размеров, так как усадка компенсируется последующими слоями; (+) низкая опасность появления следов от свободных струй; (-) возможность возникновения остаточных напряжений в поверхностных слоях и коробления
Малая толщина стенок (< 4 мм)	(+) Уменьшенное давление впрыска при заполнении гнезд увеличенного объема; (+) Уменьшенные остаточные напряжения благодаря меньшему перепаду давления на стадиях впрыска и выдержки под давлением	(+) Уменьшенное давление литья благодаря более медленному охлаждению расплава; (-) возможно увеличение времени цикла	(±) Преимуществ при изготовлении изделий с малой толщиной стенок не имеется
Большие различия в толщине стенок	(+) Подпрессовка на определенных участках поверхности способствует повышению точности размеров изделия; (-) при подпрессовке по всей поверхности тонкие участки изделия ограничивают эффективность подпрессовки	(±) Ограничения при выборе способа нагревания формы	(+) Повышенная точность размеров, так как усадка компенсируется последующими слоями
Большая величина отношения длины течения расплава к толщине стенок	(+) Уменьшенное давление литья при заполнении гнезд увеличенного объема; (+) Меньший уровень остаточных напряжений благодаря меньшему перепаду давления на стадиях впрыска и подпрессовки	(+) Уменьшенное давление литья благодаря более медленному охлаждению расплава; (±) коробление при одностороннем вариотермическом термостатировании	(-) Дальнейшее увеличение отношения длины течения к толщине стенок требует повышения давления литья, что связано с ростом остаточных напряжений
Изделия пространственной формы	(-) Низкая эффективность воздействия подпрессовки на наклонные поверхности	(±) Ограничения при выборе способа нагревания	—
Микро- и наноструктурированная поверхность	(+) Равномерное формирование структуры поверхности в направлении течения расплава	(+) Высокая точность формирования структуры благодаря более медленному охлаждению расплава	—

Примечание. (+) – преимущество; (–) – недостаток; (±) – ограничение метода.

лей оптического назначения [2]. По этой технологии расплав ПМ впрыскивается в гнездо формы, имеющее увеличенный объем, а во время следующей стадии – стадии подпрессовки – сжимается перемещающимися элементами формы.

При изготовлении деталей с увеличенным соотношением «длина течения расплава/толщина стенок» существенно увеличенное гнездо формы сначала заполняется лишь частично, а требуемая конфигурация придается детали только на стадии подпрессовки. Характерными особенностями такой технологии являются уменьшенное давление впры-

ска и обусловленный этим низкий уровень остаточных напряжений в детали. При изготовлении же деталей с большей толщиной стенок целесообразно заполнять на стадии впрыска весь объем гнезда, а на стадии подпрессовки только компенсировать усадку отливки. В этом случае также может быть обеспечено снижение остаточных напряжений и повышение точности размеров изделия по сравнению со стандартной технологией литья под давлением.

В зависимости от геометрических особенностей детали процесс подпрессовки может осуществляться либо по всей

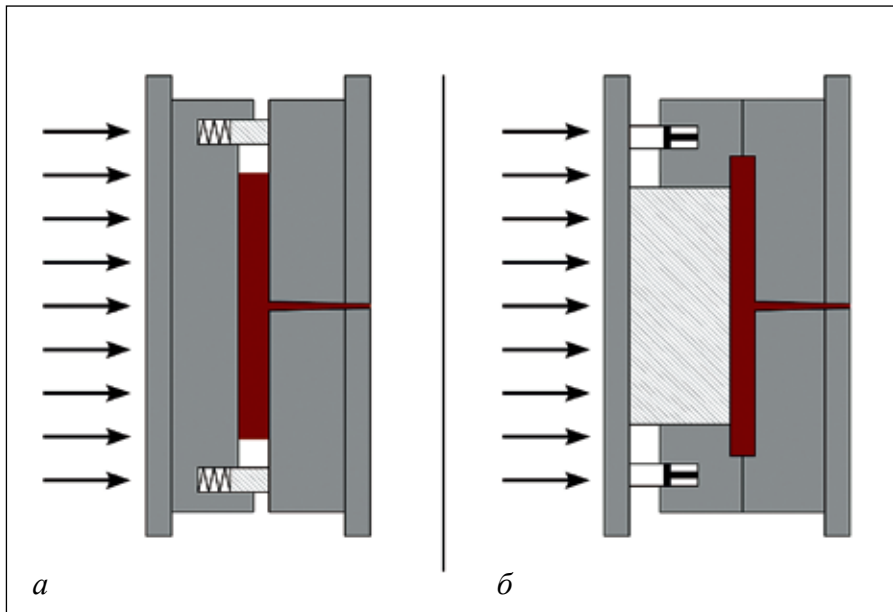


Рис. 2. Схемы возможных вариантов исполнения литьевой формы, в которых процесс подпрессовки осуществляется с помощью узла смыкания литьевой машины (рисунок: Engel): а – подпрессовка по всей площади отливки с пружинной уплотнительной рамкой; б – подпрессовка по определенной части поверхности изделия, при которой нагрузка на уплотнительную рамку создается с помощью гидравлического устройства

ее поверхности, либо в пределах определенной ее части. Для предотвращения вытекания расплава ПМ в плоскости разъема формы зачастую применяются уплотнительные рамки, охватывающие оформляющее гнездо. Требуемое усилие уплотнения создается при этом с помощью пружинных элементов или гидроцилиндров (рис. 2). С целью предотвращения обратного течения расплава в направлении узла плаستيации необходимо использовать сопла с запирающими устройствами или запирающие механизмы с заслонками. Для минимизации количества перемещающегося расплава

и связанных с этим остаточных напряжений указанные механизмы должны быть расположены в непосредственной близости от гнезда формы.

Наряду с литьевыми формами на качество оптических деталей влияют тип выбранной литьевой машины и системы управления. Обычно наладчики быстро разбираются в программном обеспечении процесса литья с подпрессовкой, разработанном, например, для электрических машин серии e-motion (производитель: фирма Engel Austria GmbH, г. Швертберг), благодаря его аналогичности программному обеспечению для процессов впрыска и выдержки под давлением при стандартном литье. Операционная среда при этом разделена на четыре основные части:

- подпрессовка с регулируемой скоростью;
- переключение;
- подпрессовка с регулированием давления в форме или усилия подпрессовки;

- позиционное регулирование (изохорное охлаждение).

Эти части соответствуют и стандартному технологическому процессу (рис. 3).

На стадии подпрессовки с регулируемой скоростью гнездо формы полностью заполняется, после чего расплав уплотняется. Оператор может отрегулировать протекание процесса таким образом, чтобы переключение происходило в зависимости от величины перемещения, времени, усилия подпрессовки или давления в форме. При этом закон изменения усилия подпрессовки или давления в форме может гибко приспособляться к особенностям процесса изготовления конкретной детали. Во время охлаждения детали до температуры ее извлечения из формы на величину остаточных напряжений в ней можно оказывать заметное влияние путем регулирования преобладающего перепада давления или количества перемещаемого расплава. Слишком высокие остаточные напряжения ухудшают среди прочего оптические свойства линз и могут привести к образованию трещин в наносимых на линзы покрытиях.

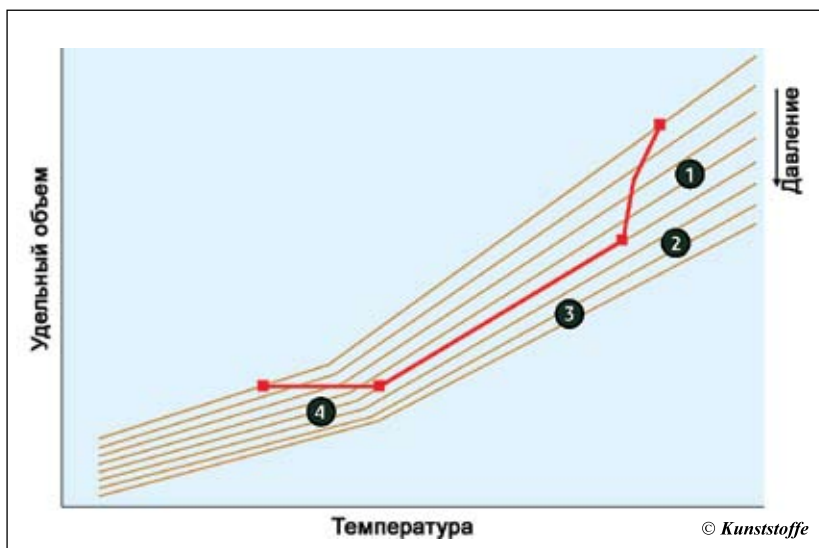


Рис. 3. Операционная среда программного обеспечения процесса литья с подпрессовкой разделена на четыре части (с позиций диаграммы состояния), которые соответствуют стандартному технологическому процессу (рисунок: Engel): 1 – впрыск и подпрессовка с регулируемой скоростью; 2 – переключение; 3 – подпрессовка с регулированием давления в форме или усилия смыкания; 4 – позиционное регулирование (изохорное охлаждение)

Изохорное охлаждение предотвращает изменение объема отливки и способствует уменьшению остаточных напряжений. При этом подпрессовочный зазор, а следовательно, и объем оформляющего гнезда формы должны оставаться неизменными. Для этого на форме устанавливают датчик перемещения, используемый для позиционного регулирования.

Изохорное охлаждение предотвращает изменение объема отливки и способствует уменьшению остаточных напряжений. При этом подпрессовочный зазор, а следовательно, и объем оформляющего гнезда формы должны оставаться неизменными. Для этого на форме устанавливают датчик перемещения, используемый для позиционного регулирования.

Точность электрических литьевых машин

Как упоминалось, при изготовлении деталей оптики требования к точности их раз-

меров и конфигурации особенно высоки. Нередко величина допуска устанавливается в пределах ± 20 мкм. Этими условиями обуславливаются и высокие требования к точности и воспроизводимости всех относительных перемещений рабочих органов литьевой машины. Электрические литьевые машины являются самым подходящим видом литьевого оборудования для изготовления высокоточных оптических деталей, так как датчики перемещения сервомоторов в сочетании с кинематическими характеристиками коленно-рычажных механизмов обеспечивают высокую точность позиционирования. Исследования воспроизводимости установки подпрессовочного зазора перед началом процесса впрыска, выполненные с использованием индуктивного датчика перемещения в зоне разъема частей формы, показали, что на электрических литьевых машинах серии e-motion колебания этого параметра находятся в пределах ± 5 мкм.

Наряду с высокой воспроизводимостью перемещений литьевые машины этого типа характеризуются также высокой динамичностью работы узла смыкания и запирания формы. Это их преимущество может быть использовано, в частности, при изготовлении тонкостенных литьевых деталей с микроструктурированной поверхностью. В этом случае сначала в результате резкого изменения усилия подпрессовки формируется микроструктура поверхности, а затем создаются условия для достижения минимальной величины остаточных напряжений.

Улучшение качества формования с помощью вариотермического термостатирования

При вариотермическом термостатировании литьевая форма (или, по меньшей мере, ее поверхность) перед каждым впрыском нагревается, а затем охлаждается. Благодаря этому в зоне контакта расплава ПМ со стенками формы обеспечивается более высокая, чем при обычном термостатировании, температура, и процесс отвердевания расплава замедляется. Это позволяет в зависимости от геометрических характеристик и поверхностной структуры формуемой детали улучшать различные ее свойства (см. таблицу). Для нагревания гнезда формы, наряду со способами термостатирования, основанными на использовании теплоносителей (воды, пара или масла), могут применяться и другие способы, предусматривающие применение индукционного нагрева, инфракрасного излучения или нагрева электросопротивлением [1]. Охлаждение осуществляется, как правило, с помощью воды.

Вариотермическое термостатирование допускает возможность независимого оптимального регулирования температуры в соответствии с особенностями конкретного процесса. На стадии охлаждения может применяться вода со значительно более низкой начальной температурой, чем при обычном термостатировании, что создает благоприятные условия для уменьшения времени охлаждения при изготовлении изделий с большой толщиной стенок.

При моделировании закона изменения температуры, например, для насадочной линзы светодиода из полиметилметакрилата, изготавливаемой с применением методов традиционного и вариотермического термостатирования и имеющей толщину 11 мм, начальную температуру в пер-

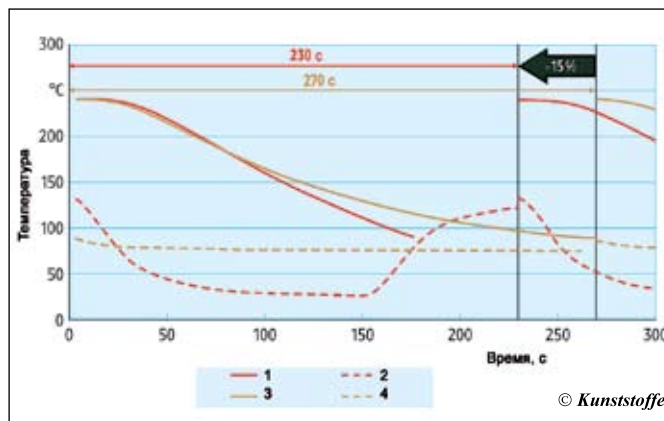


Рис. 4. Полученные расчетным путем графики изменения температуры середины детали (1, 3) и поверхности формы (2, 4) (начиная с момента заполнения гнезда формы) с применением методов вариотермического (1, 2) и традиционного (3, 4) термостатирования на примере изготовления из полиметилметакрилата насадочной линзы светодиода толщиной 11 мм. Повторное нагревание стенки гнезда формы начинается еще в первом цикле — в момент времени, соответствующий отметке 150 с (рисунок: Engel)

вом случае поддерживали на постоянном уровне (75 °C), а во втором случае изменяли в пределах от 125 °C до 25 °C. В результате удалось добиться уменьшения времени цикла на 15 % (рис. 4).

Преимущества вариотермического термостатирования очевидны: оно позволяет улучшить качество литьевых деталей и одновременно уменьшить — при определенных условиях — время цикла. К недостаткам можно отнести относительно высокие (в зависимости от способа термостатирования) капиталовложения и увеличение потребления энергии.

Повышение качества за счет многослойной структуры

Относительно «молодым» методом литья под давлением оптических деталей является метод многослойного литья, который иначе обозначают также терминами Overmolding или Multilayer. Он может быть использован в первую очередь для улучшения качества линз большой толщины. В соответствии с этим способом сначала изготавливают заготовку линзы, на которую затем наносят один или несколько дополнительных слоев того же ПМ. Для этой цели наиболее пригодными являются литьевые формы с вращающимися столами или индексными плитами, но может быть использован также способ литья с перемещением заготовки в другую форму. Основным преимуществом этого способа является то, что нанесение дополнительных слоев позволяет устранять впадины и другие поверхностные дефекты. Примером изготовленного этим способом изделия является линза (рис. 5), на поверхности которой в демонстрационных целях был создан определенный рисунок. Затем на эту линзу был нанесен слой ПМ толщиной 2 мм, в результате чего рисунок стал полностью невидимым. Способ многослойного литья под давлением позволяет устранять даже значительные поверхностные дефекты.

На часто задаваемый вопрос о возможности уменьшения времени цикла за счет применения метода многослой-

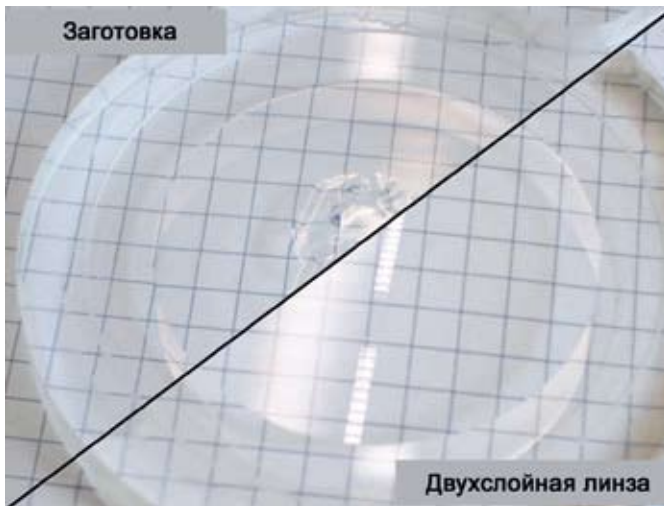


Рис. 5. Заготовка с поверхностным дефектом до и после нанесения дополнительного слоя полимерного материала толщиной 2 мм (источник: IKV Aachen)

ного литья под давлением однозначного ответа дать нельзя. Время цикла в значительной степени зависит от геометрических характеристик изделия, распределения наносимого слоя по толщине и температурного режима.

При использовании вращающегося стола продолжительность отдельных периодов времени пребывания заготовки или отливки на каждой из позиций должна быть по возможности одинаковой. Предполагается, что заготовка прижимается обеими сторонами к стенкам литьевой формы, а дополнительно наносимые на нее слои охлаждаются только с одной стороны. Отсюда следует, что с точки зрения оптимального теплового режима толщина дополнительных слоев должна быть в два раза меньше толщины первого слоя. В случае двухслойного изделия значения толщины заготовки и дополнительного слоя должны относиться друг к другу как $2/3:1/3$, в случае трехслойного изделия – как $2/4:1/4:1/4$ и т. д. Строго говоря, это правило справедливо только для плоских пластин, но может быть использовано также в качестве ориентира для определения толщины отдельных слоев и при изготовлении других литьевых деталей простой формы.

Режим термостатирования в идеальном случае на каждой из позиций вращающегося стола устанавливается индивидуально. При этом следует обращать внимание на то, чтобы наружные поверхности, особенно важные для оптических функций детали, подвергались термостатированию в соответствии с требованиями к качеству этих поверхностей. Начальная же температура внутренних поверхностей может быть снижена с целью уменьшения времени охлаждения изделия.

Для получения близких к действительности данных о времени охлаждения моделирование процесса термостатирования следует выполнять с деталями реальной геометрической формы. Так, для плоско-выпуклых линз толщиной 30 мм, изготовленных из поликарбоната, моделирование выполнялось при разных краевых условиях. При этом сравнивались способы изготовления одно-, двух- и трехслойных литьевых деталей. В случае трехслойной детали возможны два варианта исполнения: либо все три

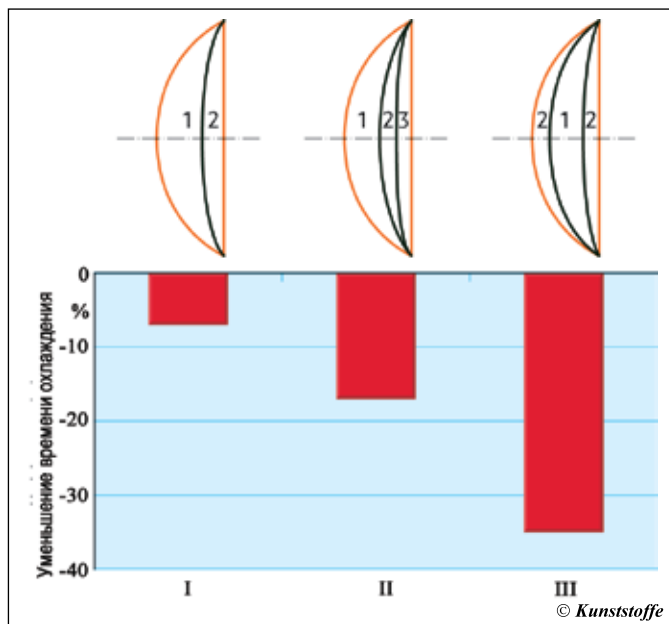


Рис. 6. Результаты моделирования различной последовательности нанесения дополнительных слоев показывают, что метод многослойного литья под давлением существенно уменьшает время охлаждения по сравнению с однослойным литьем: I – двухслойное литье; II – трехслойное литье с последовательным нанесением слоев; III – трехслойное литье, при котором на внутренний слой наносятся наружные слои; разным температурам стенок формы соответствуют разные цвета (черный – 60 °С; красный – 90 °С) (рисунок: Engel)

слоя наносятся один на другой последовательно, либо на обе стороны предварительно изготовленного внутреннего слоя наносятся дополнительные поверхностные слои. При моделировании исходили из того, что внутренние поверхности подвергаются более интенсивному охлаждению (температура стенки составляла 60 °С вместо 90 °С). Было установлено, что многослойное литье с различным расположением слоев и соответствующие температурные режимы позволяют существенно уменьшить время охлаждения по сравнению со способом изготовления однослойной линзы той же толщины (рис. 6).

Таким образом, метод многослойного литья под давлением в общем случае способствует не только существенному улучшению качества поверхности, но одновременно и уменьшению времени охлаждения. Этот эффект проявляется в особой степени в тех случаях, когда внутренние слои изделия подвергаются более интенсивному охлаждению. Так, например, для рассмотренной выше линзы время охлаждения может быть уменьшено на 35 %. Конечно, при расчете технико-экономической эффективности этого метода переработчики должны принимать во внимание необходимость дополнительных капиталовложений, связанных с применением более сложного оборудования (вращающиеся столы, индексные пилы и т. п.).

Выгодные комбинации способов

Удовлетворение разнообразных требований, предъявляемых к деталям оптики из ПМ, может быть обеспечено путем комбинирования различных методов их изготовления. Струк-

турированные оптические детали (рис. 7), обеспечивающие равномерное освещение офисных помещений, из-за большой величины отношения длины течения расплава к толщине стенок детали требуют применения технологии литья с подпрессовкой. С другой стороны, высокая точность формирования углов микропирамид может быть обеспечена только с помощью вариотермического термостатирования литьевых форм. Эти методы успешно комбинируются на практике.

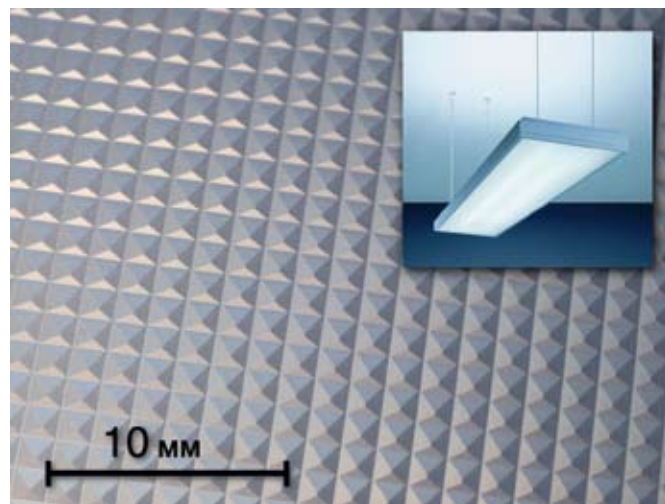


Рис. 7. Оптическая деталь с поверхностью, структурированной для равномерного освещения офисных помещений: формирование микропирамид с площадью основания 1,5×1,5 мм² осуществляется по технологии литья с подпрессовкой с применением вариотермического термостатирования литьевых форм (изготовитель: Zumtobel Lighting)

Из всего вышеизложенного можно сделать весьма оптимистичный и настраивающий переработчиков на практические действия вывод: описанные в статье примеры наглядно демонстрируют, что при изготовлении литьевых деталей оптического назначения может быть обеспечено оптимальное сочетание высоких требований к качеству продукции и хороших технико-экономических показателей производства.

Литература

1. Giessauf J., Pillwein G., Steinbichler G. Praezision im Fokus. Kunststoffe 98 (2008) 4. S. 87-92.
2. Thonemann O. E. Die Herstellung optischer Linsen im «Spritz-Praege-Verfahren» aus Polymethacrilat. Plstverarbeiter 18 (1967) 10. S.707-714.

Перевод А. П. Сергеевкова

Focus on Precision

M. Stricker, G. Pillwein, J. Giessauf

INJECTION MOLDING OPTICAL COMPONENTS. With above-average growth rates, optical technologies can be considered as setting the pace for the 21st century. However, the challenges when injection molding optical parts frequently differ from those encountered when injection molding conventional parts. In the face of international competition, the focus is shifting increasingly to innovative processing techniques.