

# Микролитье под давлением с применением инверсионного шнека

Новые технологии ускоряют инновационные процессы и разработки в области микросистем, сферы применения которых в настоящее время выходят далеко за рамки рынка полупроводников. В свою очередь, возрастающая миниатюризация используемых в микросистемах полимерных деталей требует специфических для них и одновременно экономичных методов производства, каковым является, в частности, микролитье под давлением. Новый вариант этого метода, осуществляемый с помощью инверсионного шнека, объединяет в себе преимущества поршневого впрыска в плане его воспроизводимости и точности с хорошей гомогенизацией полимерного материала, перерабатываемого традиционным трехзонным шнеком. Реализация данного метода стала возможной благодаря отражению геометрии традиционного шнека с внутренней стороны материального цилиндра узла пластикации литьевой машины в сочетании с вращающимся внутри цилиндра поршнем, который используется также для впрыска расплава в литьевую форму. Инверсионный шнек позволяет минимизировать объем расплава, находящегося в материальном цилиндре, за счет уменьшения размеров поршня и собственно цилиндра, выполняющего роль инверсионного шнека. В данной статье представлены результаты разработки инверсионного шнека и показаны его функциональные возможности. Обсуждаются также вопросы термомеханического воздействия на пластицируемый инверсионным шнеком материал за время его пребывания в нагретом состоянии.

К. Хопманн, д-р, Т. Фишер, д-р, М. Рик, Институт переработки пластмасс Рейн-Вестфальской высшей технической школы г. Аахена (Германия)

## Введение

Динамичное развитие современной микросистемной техники (МСТ) и освоение ею новых сфер применения во многом объясняется инновациями в области процессов производства МСТ [1]. В то время как традиционные, основанные на полупроводниках технологии изготовления, например, датчиков пути, скорости или ускорения, уже давно нашли свои рыночные ниши, наблюдается ускоренный рост применения МСТ в изделиях оптического назначения, например, в медицине, микрофлюидике и микроаналитике. Кроме того, микросистемы и микродетали все более широко используются в сфере информационных технологий и в автомобилестроении [1]. Денежный оборот мирового рынка МСТ, отличавшегося последние 5 лет высокими ежегодными темпами роста – на уровне примерно 20 %, достиг в 2017 г. отметки порядка 21 млрд долл. США, что подтвердило прогнозы, сделанные в маркетинговом исследовании [2]. Большое значение для развития и производства МСТ и, в частности, микроэлектромеханических систем имеют полимерные мате-

риалы благодаря широкому спектру их свойств и эффективным методам переработки, включая литье под давлением, литье со вспениванием и с применением пластикации ультразвуком [3–5]. Особенно широко для производства мелких и микродеталей МСТ из полимерных материалов используется микролитье под давлением, отличающееся высокой степенью автоматизации, экономичностью и, что особенно важно, свободой и широкими возможностями конструктивного исполнения микродеталей [6, 7].

## 1. Традиционные методы производства микродеталей

В целом к микродеталям относят макродетали с элементами микроструктуры, микропрецизионные детали с допусками в микрометровом диапазоне и массой от 0,1 до 10 г, а также собственно микродетали массой менее 0,1 г [8, 9]. Из них проблему особой сложности представляют именно микродетали в отношении воспроизводимости самых малых масс впрыска, что потребовало разработки новых конструкторско-технологических

решений в микролитье под давлением. Для реализации таких малых масс впрыска в настоящее время используются поршни или поршневые шнеки уменьшенного диаметра. При этом пластикация перерабатываемого полимерного материала происходит на отдельной технологической стадии.

Альтернативой данному методу микролитья является технология пластикации и впрыска с помощью инверсионного шнека, которая была разработана в Институте переработки пластмасс Рейн-Вестфальской высшей технической школы г. Аахена (Германия) в сотрудничестве с фирмой Arburg (г. Лосбург, Германия) в рамках проекта Немецкого научно-исследовательского объединения 702 (DFG-Forschergruppe 702). В статье представлены основные результаты данной работы.

## 2. Концепция пластикации с помощью инверсионного шнека

Изготовление сложных полимерных элементов МСТ предъявляет высокие требования к процессам впрыска и пластикации очень

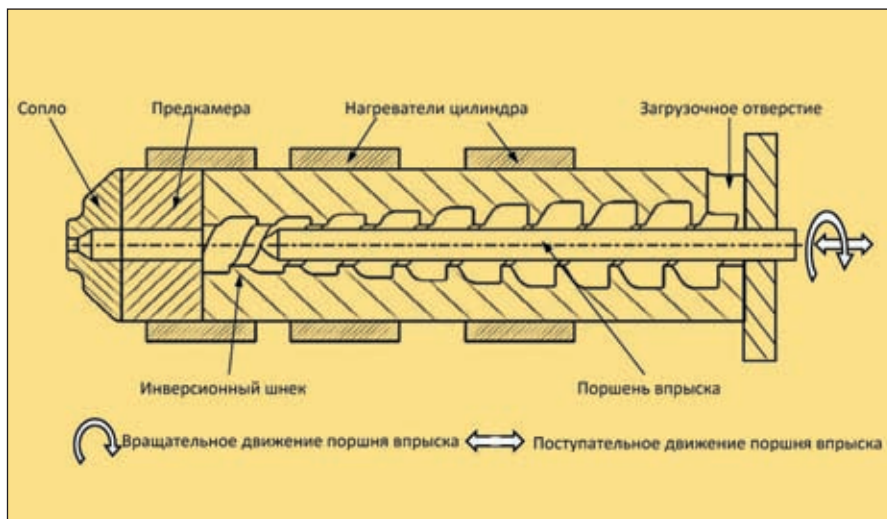


Рис. 1. Принципиальная схема инверсионного шнека

малых объемов расплава. Обычные трехзонные шнеки обеспечивают воспроизводимые объемы впрыска в диапазоне относительного хода шнека от 1 до 3 его диаметров  $D$  [10]. В случае микролития ограничения на диаметр шнека накладывают фактор термомеханического воздействия на материал во время его пластикации и минимально необходимая глубина нарезки шнека в зоне загрузки, которая при переработке стандартного гранулята составляет 4 мм. Из этих соображений минимально необходимый диаметр шнека должен быть равен 14 мм, а минимальный объем впрыска – примерно  $2 \text{ см}^3$  [11]. Поэтому воспроизводимое производство микродеталей массой на уровне миллиграммов, осуществляемое с помощью стандартных узлов пластикации, рассчитанных на переработку большого количества материала, возможно только при избыточных размерах впускного литника и литниковой системы в целом. Альтернативные решения, основанные на разделении движений пластикации и впрыска, позволяют при использовании впрыскивающих поршней или поршневых шнеков малых диаметров осуществлять эти движения с большей точностью и перерабатывать благодаря этому меньшие объемы материала. Преимуществом же альтернативных концепций, основанных на применении трехзонных пластицирующих шнеков, является хорошая термомеханическая гомогенизация расплава.

Концепция инверсионного шнека, принципиальная схема ко-

торого представлена на рис. 1, объединяет преимущества гомогенной шнековой пластикации с прецизионной точностью движения впрыскивающего поршня. При этом пластикация перерабатываемого материала происходит при вращении поршня в цилиндре с внутренней нарезкой, соответствующей внешней нарезке традиционного шнека. Эта «шнековая» геометрия с внутренней стороны цилиндра пластикации позволяет применить поршень уменьшенного диаметра, так как здесь нет его механического ослабления благодаря отсутствию винтового профиля. Тем самым становится возможной переработка стандартного гранулята путем выбора достаточной глубины нарезки в цилиндре [12]. По сравнению с традиционной шнековой пластикацией инверсионный шнек позволяет добиться мень-

шего отношения объема расплава, находящегося в цилиндре, к объему впрыска, что уменьшает опасность термодеструкции перерабатываемого материала из-за повышенного времени его пребывания в нагретом состоянии.

### 3. Исследование функциональных возможностей инверсионного шнека

На начальном этапе исследований функциональные возможности инверсионного шнека были подтверждены в результате проведения серии экспериментов на лабораторной установке экструзионного типа (рис. 2). Цилиндр пластикации этой установки конструктивно состоит из двух полуцилиндров с внутренней «шнековой» нарезкой, изготовленных по аддитивной технологии методом SLM (селективного лазерного наплавления), причем заданная геометрия нарезки была проверена методом оптического контроля. Температурный профиль в трех зонах цилиндра соответствовал реальным производственным условиям шнековой пластикации материала. Инверсионный шнек, геометрия спирали которого была рассчитана с учетом критериев Эльбе [13, 14], включала зону загрузки длиной  $0,5 L_s$  (здесь  $L_s$  – общая длина шнека), зону сжатия длиной  $0,3 L_s$  и зону дозирования длиной  $0,2 L_s$ . Диаметр поршня составлял 8 мм, так что при ходе дозирования в  $1 D$  теоретический объем впрыска был равен  $0,4 \text{ см}^3$  [15].

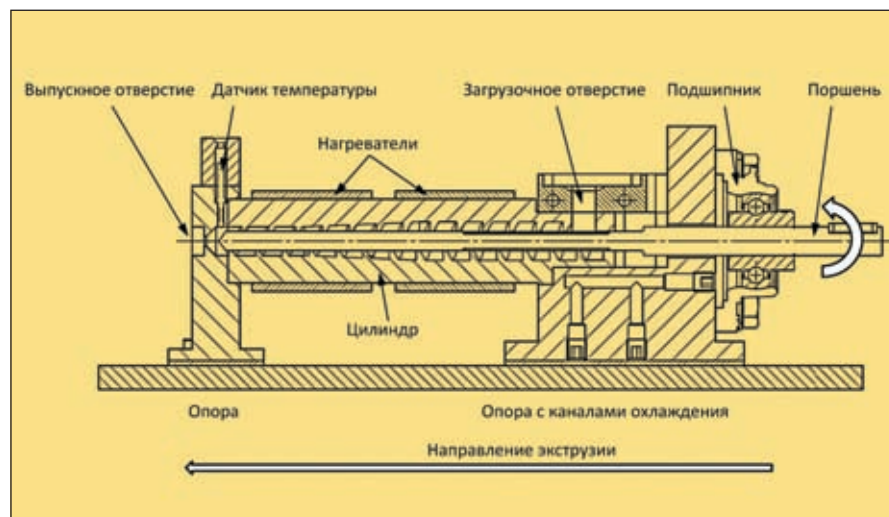


Рис. 2. Принципиальная схема лабораторной установки экструзионного типа для экспериментов с инверсионным шнеком

Через систему управления установкой можно было в широком диапазоне регулировать скорость вращения поршня. Максимальная скорость его вращения, однако, была ограничена значением 60 1/мин, так как при более высоких скоростях наблюдались утечки расплава через уплотнительные поверхности, обусловленные определенным допуском на геометрические размеры полуцилиндров, изготовленных аддитивным методом. Подача гранулята в зону сжатия с помощью поршня, имевшего гладкую поверхность, оказалась невозможной. Тогда был изготовлен поршень, имевший продольные пазы в зоне загрузки и частично в зоне сжатия, который позволил реализовать в лабораторной экструзионной установке подачу и пластикацию гранулятов полипропилена (ПП) и полиоксиметилена (ПОМ). Вместе с тем было установлено, что подача и перерабатываемость материала при первоначально выбранной геометрии инверсионного шнека сильно зависит от формы и специфических свойств полимерных гранул с высокой твердостью и малой деформативностью, как, например, у полиметилметакрилата (ПММА). Такие гранулы не распределялись в продольном направлении в зоне загрузки и образовывали мостики и скопления, подвергавшиеся сильным нагрузкам со стороны вращающегося поршня вплоть до разрушения. Грануляты ПП и ПОМ с частицами линзообразной формы и меньшей жесткости показали лучшее поведение в зоне загрузки. Вместе с тем возникли проблемы с производительностью подачи гранулята и, как следствие, его пластикации. Так, для ПОМ типа Hostaform C52021 (производитель – фирма Ticona GmbH, г. Зульцбах, Германия) при скорости вращения поршня 60 1/мин производительность подачи гранулята оказалась равной 90 мг/с. Эта слишком небольшая даже для микролитья величина вытекала из особенностей подачи материала в зоне загрузки инверсионного шнека. С одной стороны, увеличению производительности препятствовало образование мостиков гранулята в зоне загрузки, которое приводило к последующему его пульси-

рующему перемещению вперед. С другой стороны, подачу гранулята затрудняла сравнительно высокая шероховатость поверхности шнека, обусловленная возможностями аддитивной технологии его изготовления (высота неровностей Rz составляла в среднем около 31 мкм). При соблюдении максимально допустимой окружной скорости вращения поршня 0,3 м/с, рекомендуемой для переработки технических полимерных материалов [16], максимальная расчетная скорость его вращения при диаметре 8 мм может составить 350 1/мин. Из этого вытекает, что при линейной экстраполяции производительности подачи гранулята ее максимальное значение должно достигнуть вполне приемлемой для производства микродеталей величины – 525 мг/с. Таким образом, с учетом очевидных требований к физической и температурной гомогенности расплава было (пока что теоретически) подтверждено принципиальное функциональное свойство инверсионного шнека. Кроме того, опыты со сменной цвета материала, проведенные на установке экструзионного типа с использованием исходной геометрии инверсионного шнека, показали, что, несмотря на повышенную шероховатость его поверхности, при скорости вращения 30 или 60 1/мин обеспечивается малое время пребывания ПОМ в материальном цилиндре – в пределах 3–5 мин. Тем не менее при использовании поршня и цилиндра с исходной геометрией нарезки производительность подачи и пластикации гранулята осталась зависимой от формы гранул и присущих им свойств.

#### 4. Оптимизация геометрии инверсионного шнека

Проверка функциональных возможностей шнека непосредственно на микролитевой машине потребовало оптимизации процесса в целях обеспечения требуемой производительности подачи и, соответственно, пластикации материала и доказательства возможности достижения температурной и материальной гомогенности расплава. Поэтому были изменены геометрические характеристики загрузочного отверстия, инверсионного шнека

и поршня с учетом требований процесса литья под давлением.

Так как в случае инверсионного шнека не может быть гарантирован надежный контакт гранулята и поршня из-за непостоянного диаметра гранул, то в той же степени не может гарантироваться обязательная транспортировка твердого гранулята из зоны загрузки в зону сжатия, как при обычном методе пластикации за счет вращения шнека. Поэтому для надежной подачи гранулята вдоль по цилиндру необходимо было капитальное изменение геометрии зоны загрузки. Ее оптимизация потребовала предварительного исследования геометрически различных загрузочных отверстий относительно поведения гранулята при его загрузке. Неустойчивость подачи гранулята вследствие, например, образования мостиков, негативно отражается на производительности пластикации в виде прерывания или пульсации расхода материала. Лучшие результаты были получены при длине загрузочного отверстия, равной трем каналам нарезки инверсионного шнека с двумя гребнями. В этом случае была достигнута максимальная производительность подачи гранулята ПОМ (при ее линейной зависимости от скорости вращения поршня), равная 180 мг/с с погрешностью в пределах 0,7 %, при максимальной же скорости вращения поршня в данной серии опытов, равной 60 1/мин. Новое загрузочное отверстие показано на рис. 3 в качестве составной части геометрически оптимизированного инверсионного шнека.

Конструктивное исполнение материального или, иначе, пластицирующего цилиндра (а фактически – инверсионного шнека) в виде двух полуцилиндров позволило провести анализ состояния материала в процессе его подачи и транспортировки. Как оказалось, плавление гранулята по сравнению с обычными пластицирующими шнеками начинается раньше, частично уже в зоне загрузки, что объясняется малой глубиной каналов нарезки (см. рис. 3) и, как следствие, улучшенными условиями передачи тепла от цилиндра материалу. Поэтому стало возможным сокращение длины зоны загрузки в пользу зоны сжатия.

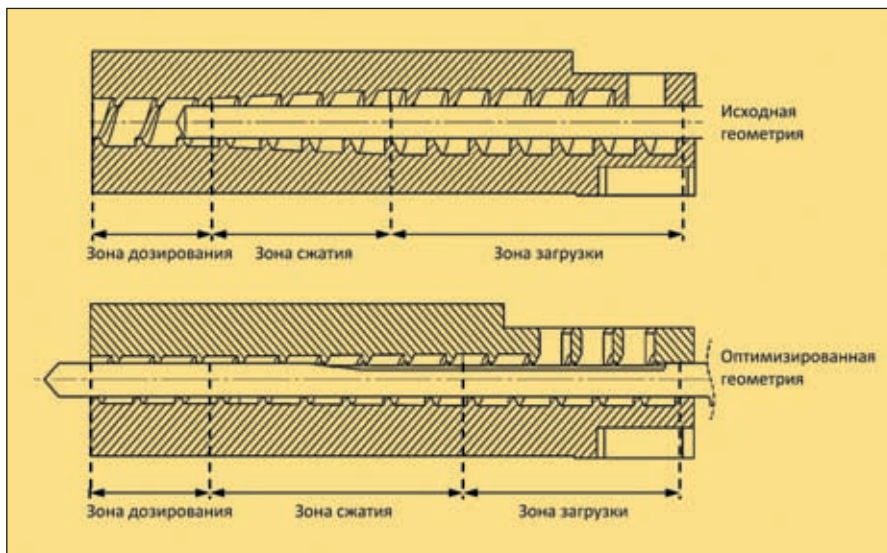


Рис. 3. Исходная и оптимизированная геометрия инверсионного шнека

Дальнейшие эксперименты показали, что использование поршня с продольными пазми в зоне загрузки позволило не только улучшить подачу стандартного гранулята, но и – на следующем этапе оптимизации геометрии инверсионного шнека – уменьшить глубину каналов нарезки как в зоне загрузки, так и в зоне сжатия (см. рис. 3). Так, у геометрически оптимизированного инверсионного шнека глубина каналов нарезки составляет 2 мм в зоне загрузки (при глубине 2 мм пазов у шнека) и уменьшается на 1 мм на протяжении зоны сжатия. Поскольку при меньшей – по сравнению с инверсионным шнеком исходной геометрии – глубине нарезки уменьшился и объем заполнения твердым материалом зоны загрузки, то для компенсации этого была увеличена длина зоны сжатия. Общая же длина зон загрузки и сжатия осталась неизменной за счет сокращения длины зоны загрузки. На рис. 3 можно сравнить схематично представленные инверсионные шнеки – с исходной и окончательно оптимизированной геометрией.

Оценку функциональных возможностей геометрически оптимизированного инверсионного шнека сначала осуществляли по результатам эксперимента на установке экструзионного типа (см. рис. 2). Оказалось, что перерабатываемость ПММА осталась ограниченной, как и при использовании инверсионного шнека с исходной геометрией. В отношении переработки ПОМ, напротив, были зарегистрированы замет-

ные улучшения. Критериями оценки результатов оптимизации инверсионного шнека были выбраны производительность пластикации и давление расплава. Так, по сравнению с инверсионным шнеком с исходной геометрией производительность пластикации была повышена с 91 до 159 мг/с (при скорости вращения поршня 60 1/мин) с одновременным уменьшением примерно на 2 мг/с ее стандартного отклонения – до 12 мг/с. При увеличении скорости вращения поршня – вплоть до 100 1/мин – наблюдался линейный подъем до 30 бар давления расплава в сопле установки экструзионного типа. Дальнейшее повышение скорости вращения поршня приводило к утечкам расплава в местах уплотнений, что нарушало воспроизводимость роста давления. Результаты этих экспериментов по переработке

ПОМ приведены на рис. 4. Причиной показанного на этом рисунке большого стандартного отклонения давления при скорости вращения поршня, равной 100 1/мин, как раз и является отмеченный выше фактор утечек расплава.

На основе полученных данных была проведена оценка возможностей использования геометрически оптимизированного инверсионного шнека для микролитья. С учетом почти линейной зависимости производительности пластикации от скорости вращения поршня и температурных граничных условий производительность пластикации может быть экстраполирована до потенциально возможного значения 550 мг/с при максимальной скорости вращения поршня 350 1/мин. Из этих данных вытекает, что время дозирования должно составить от 0,7 до 2,2 с для значений массы впрыска от 0,4 до 1,2 г и производительность пластикации при этом не является ограничением для времени цикла. Рост давления расплава в зоне сопла также оказывается достаточным для пластикации с точки зрения обеспечения нужного давления подпора (давления перед поршнем). Время пребывания материала в нагретом состоянии, как и в опытах с инверсионным шнеком исходной геометрии, лежит во вполне приемлемом для микролитья диапазоне. Поэтому дальнейший эксперимент с применением геометрически оптимизированного шнека был проведен на реальной установке для микролитья под давлени-

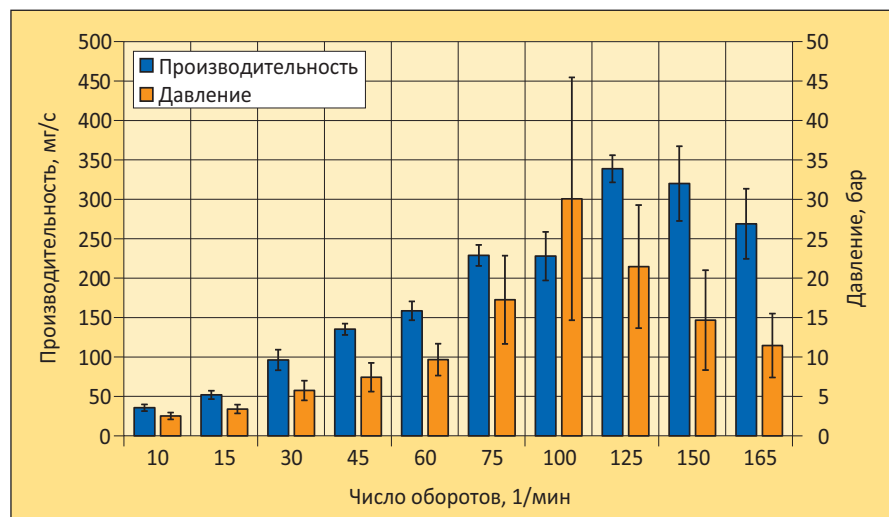


Рис. 4. Массовая производительность и давление расплава в зависимости от числа оборотов инверсионного шнека

ем. Но в этом случае – в отличие от инверсионного шнека с исходной геометрией – внутренняя нарезка полуцилиндров была получена не по аддитивной технологии, а методом фрезерования с последующим полированием для обеспечения высокого качества рабочей поверхности шнека. Кроме того, в узле пластикации и впрыска был использован затвор обратного потока. Эксперимент проводили на литьевой машине модели типа Allrounder 270 A 350-70 компании Arburg.

### 5. Экспериментальное исследование инверсионного шнека на литьевой машине

Целью экспериментов с инверсионным шнеком на литьевой машине было исследование процесса дозирования и его воспроизводимости, а также влияния параметров литья под давлением на время пребывания выбранных полимерных материалов в нагретом состоянии внутри материального цилиндра. В заключение было оценено термомеханическое воздействие на перерабатываемые материалы в процессе их пластикации.

В результате опытов в режиме экструзии, проведенных на микролитьевой машине, была установлена возможность успешной переработки с помощью оптимизированного инверсионного шнека всех исследованных материалов – POM, ПК, микрогранулята ПП марки Stamylan P 2000 (производитель – фирма DSM N.V., Нидерланды) и даже плохо перерабатываемого на лабораторной установке ПММА. При этом, благодаря высокому качеству полированных рабочих поверхностей инверсионного шнека, достигалась непрерывная и без пульсаций пластикация перерабатываемых материалов. Анализ воспроизводимости процесса проводили по результатам измерения массы микропластин, которые отливали с неполным заполнением оформляющей полости формы для исключения влияние сжатия расплава на массу микродеталей. Путем замены литниковых втулок в форме варьировали объем литников, чтобы можно было проверить воспроизводимость различных объемов дозирования. Массу впрыска изменяли в диапазоне от

0,3 до 2,2 г для учета влияния позиции поршня на воспроизводимость впрыска. Скорость вращения поршня варьировалась в диапазоне от 50 до 350 1/мин.

На рис. 5 представлены результаты измерения массы микродеталей из POM и ПП в зависимости от объема впрыска и скорости вращения поршня. Эти результаты показывают, что инверсионный шнек позволяет обеспечить воспроизводимость дозирования в широком диапазоне скоростей вращения поршня. При этом отклонения при изготовлении опытных образцов из POM составили в среднем практически для всех объемов впрыска всего лишь 1,4 %. И только при объеме впрыска менее 0,6 см<sup>3</sup> стандартное отклонение массы образцов POM увеличилось до 2,4 %.

Анализ литьевых микрообразцов ПП показал несколько лучшую по сравнению с POM воспроизводимость их массы, усредненное отклонение которой составило всего 0,8 %, однако при этом оказалось невозможным реализовать максимальную массу впрыска 2,2 г при малой производительности пластикации (при скорости вращения поршня 50 1/мин). Воспроизводимость массы микродеталей из обоих полимеров можно было улучшить путем повышения давления подпора, что, впрочем, негативно отражается на времени дозирования. Время дозирования POM без давления подпора составляло 28 с для самого большого объема дозирования при скорости вращения поршня 50 1/мин

и могло быть уменьшено до 7,7 с за счет повышения скорости вращения до 350 1/мин. Поэтому время дозирования больших объемов расплава может стать определяющим для времени цикла. Эксперимент также показал ухудшение производительности пластикации для объемов дозирования больше объема, занимаемого пространством внутри цилиндра по длине поршня, равной 3D, так как при этом уменьшается эффективная длина паза поршня из-за увеличения его хода. Впрочем, для производства микродеталей при объемах дозирования от 0,3 до 0,9 см<sup>3</sup> и давлении подпора 50 бар можно считать вполне приемлемым время дозирования, установленное в пределах от 1,5 до 3,5 с.

На следующем этапе работ были исследованы время пребывания  $t_{пр}$  перерабатываемого материала в нагретом состоянии и процесс его гомогенизации. В этой серии опытов был использован цветной суперконцентрат в составе материала пластинчатых образцов. Независимое от деталей время цикла как сумма времен дозирования и впрыска служило для определения  $t_{пр}$ . Изменение цвета и диапазон значений  $t_{пр}$  определяли по результатам анализа характеристик цвета литников образцов с помощью специального программного обеспечения обработки цветных изображений ImageJ (разработчик – Национальный институт здоровья США). Таким образом по изменению градаций серой шкалы при непрерывном производстве литьевых образ-

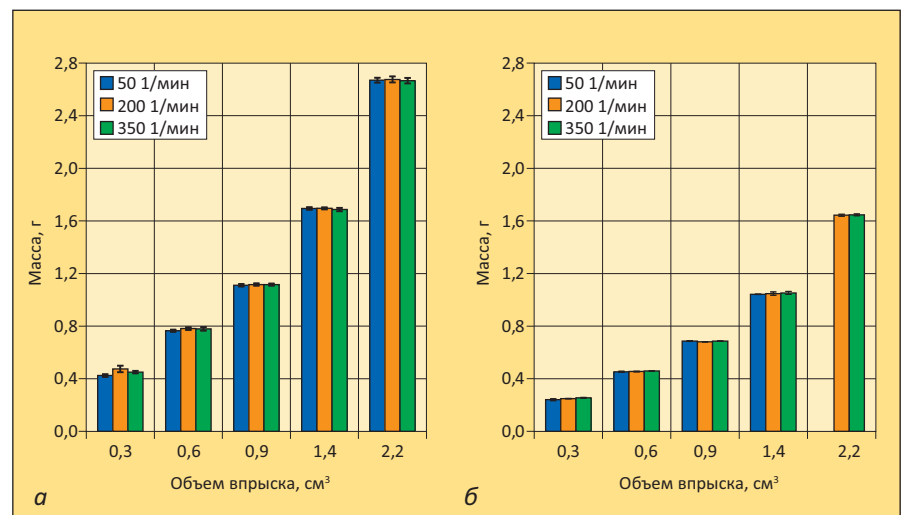


Рис. 5. Масса деталей из POM (а) и микрогранулированного ПП (б) в зависимости от объема впрыска и числа оборотов инверсионного шнека

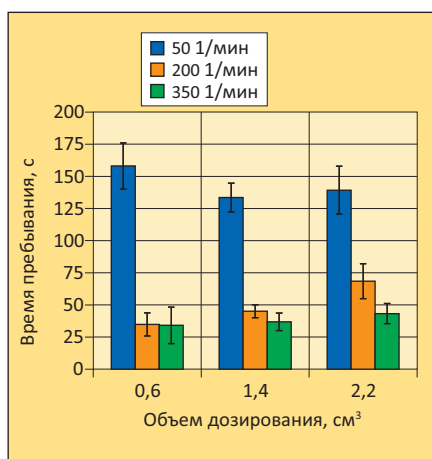


Рис. 6. Время пребывания POM в нагретом состоянии при его переработке в зависимости от объема дозирования и числа оборотов инверсионного шнека

цов были определены соответствующие значения  $t_{пр}$ , которые представлены на рис. 6.

Из этого рисунка видно, что вполне возможной оказалась воспроизводимая переработка POM с помощью инверсионного шнека при времени  $t_{пр}$  заметно менее 2 мин. Самое большое значение этого времени составило 158 с при скорости вращения поршня 50 1/мин и объеме дозирования 0,6 см³. Принципиальные зависимости значений и диапазона  $t_{пр}$  от параметров переработки материалов с помощью инверсионного шнека были похожи на подобные зависимости для традиционного шнека. Так, например, при повышении скорости вращения поршня с 50 до 350 1/мин время пребывания может быть уменьшено на 78 %. С повышением объема дозирования наблюдается, как и следовало ожидать, увеличение времени  $t_{пр}$ , в то время как повышение давления подпора лишь несущественно влияет на значение  $t_{пр}$ . Было также установлено, что при использовании инверсионного шнека рекомендуемое для литья под давлением время  $t_{пр}$  в пределах от 3–8 мин [17] гарантированно не превышает независимо от выбранных параметров процесса переработки.

Исследование микродеталей визуально-оптическим методом показало, что в них при малых значениях  $t_{пр}$  отсутствует какая-либо неомогенность материала.

В заключение с применением гель-проникающей хроматографии было исследовано термомеханическое воздействие на материал при

его переработке с помощью инверсионного шнека, чтобы количественно оценить результаты этого воздействия. В этих целях были изготовлены образцы POM с максимальным механическим воздействием на пластицируемый расплав при скорости вращения поршня 350 1/мин и давлении подпора 70 бар. В качестве объектов сравнения с литьевыми образцами POM были выбраны исходный гранулят и гранулят, находившийся при температуре плавления в течение соответствующего времени цикла. Исследования показали, что при использовании инверсионного шнека и объеме впрыска 2,2 см³ какого-либо заметного негативного термомеханического воздействия на материал не наблюдается. Об этом свидетельствует молекулярно-массовое распределение, представленное в сравнении на рис. 7 для всех трех типов исследованных образцов.

### Заключение

Результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод о целесообразности использования инверсионного шнека для микролитья под давлением термопластичных полимерных материалов с производительностью пластикации, вполне приемлемой для экономичного производства микродеталей. Однако, при этом требуется выбор оптимальных параметров процесса переработки, например, высокой скорости вращения впрыскивающего поршня для обеспече-

ния времени дозирования заданного объема впрыска, которое не влияло бы на время цикла литья. Следует учитывать также, что производительность пластикации зависит от типа материала на стадии его загрузки в материальный цилиндр (он же – инверсионный шнек).

Кроме того, данная технология отличается малыми значениями времени пребывания материала в нагретом состоянии при его переработке инверсионным шнеком, и в процессе исследований не было зафиксировано какого-либо деструктивного влияния на перерабатываемый материал даже наиболее интенсивного термомеханического воздействия на него в процессе пластикации. Одновременно инверсионный шнек обеспечивает хорошую гомогенность материала, подготавливаемого к впрыску. Тем самым технология микролитья с применением инверсионного шнека открывает возможность экономичного производства микродеталей, в том числе из термочувствительных полимерных материалов. Поэтому на следующем этапе работ предполагается выбрать в качестве объектов именно такие материалы, например, полилактид, который среди прочего все более широко используется в медицине. В результате такие преимущества использования инверсионного шнека, как возможность обеспечения минимально необходимого времени пребывания материала в нагретом состо-

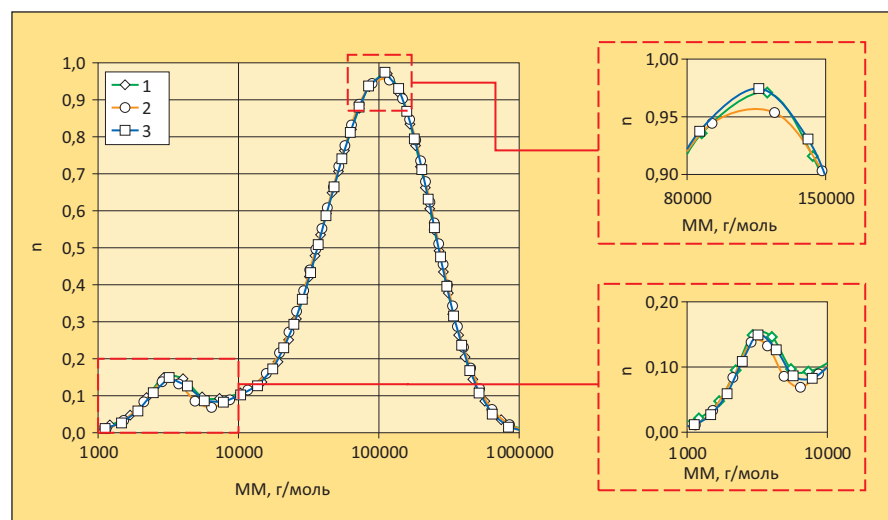


Рис. 7. Дифференциальная функция  $\rho$  молекулярно-массового распределения исходного гранулята (1), материала литьевой микродетали, изготовленной с применением инверсионного шнека (2), и гранулята, термообработанного по температурному режиму пластикации с применением инверсионного шнека (3): MM – молекулярная масса

янии в процессе его переработки, отсутствие негативного термомеханического воздействия на него и хорошая гомогенизация позволили бы распространить данную технологию на более широкий спектр полимерных материалов и новые сферы их применения.

В дальнейшем планируется также развить концепцию инверсионного шнека в направлении дополнительной оптимизации зоны загрузки материала и геометрии шнека. Путем совершенствования его геометрии и пазов на поршне в зоне загрузки можно еще более улучшить условия подачи гранулятов с повышенной твердостью гранул. Это опять же позволит расширить спектр полимерных материалов, перерабатываемых с помощью инверсионного шнека.

### Литература

1. *Griess A.* Integrierte Intelligenz / Pressemitteilung, Referat Mikrosystemtechnik, Bundesministerium fuer Bildung und Forschung, 2010.
2. *Mounier E.* Proceedings of the dMEMS 2012 Workshop on design, control and software implementation for distributed MEMS / MEMS Markets & Applications, Besancon, Frankreich, 2012.
3. *Neuy C., Zucker J.* Kompetenz im Kleinen // Kunststoffe. – 2007. – Nr. 6. – С. 30.
4. *Hopmann C., Fischer T.* New plasticising process for increased precision and reduced residence times in injection moulding of microparts // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2015. – No. 9. – P. 51.
5. *Wagenknecht T., Collin H., Krajewsky P., Bloss P.* Heißprägen von Mikrostrukturen // Kunststoffe. – 2006. – Nr. 3. – С. 55.
6. *Bloss P., Juetner G., Jacob S.* u. a. Proceedings of the 29<sup>th</sup> Annual Meeting of the

Polymer Processing Society. A Wide Variety of Micro Injection Molding Technologies is Now Applicable to Small Series and Mass Production, Nuernberg, 2013.

7. *Michaeli W., Kamps T., Schmachtenberg E.* u. a. Mit neuen Prozessketten zu wirtschaftlicher Mikrofertigung // Mikroproduktion. – 2007. – Nr. 6/4. – С. 18.

8. *Ammer D.* Mikrospritzgießmaschine  $\mu$ -Jet mit Linearantrieb – Entwicklung und Validierung / Technische Universität Muenchen, Dissertation, 2008.

9. *Spennemann A.* Eine neue Maschinen- und Verfahrenstechnik zum Spritzgießen von Mikrobauteilen / RWTH Aachen, Dissertation, 2000.

10. *Bichler M.* Prozessgroessen beim Spritzgießen. Teil 2: Optimales Hubvolumen // Plastverarbeiter. – 2001. – Nr. 9. – С. 160.

11. *Ganz M.* Spritzgießen von Mikrobauteilen // Plastverarbeiter. – 2005. – Nr. . – С. 44.

12. *Hopmann C., Fischer T.* Mit Inversschnecke zu mehr Praezision bei Mikrobauteilen? // K-Profi. – 2013. – Nr. 2/1–2. – С. 18.

13. *Elbe W.* Untersuchungen zum Plastifizierverhalten von Schnecken-spritzgießmaschinen / RWTH Aachen, Dissertation, 1973.

14. *Elbe W.* Der Plastifiziervorgang – Verfahrenstechnische Forderungen und Erkenntnisse / Spritzgießtechnik, Duesseldorf: VDI-Verlag, 1980.

15. *Hopmann C., Fischer T., Kluecker E.* Proceedings of the Annual Technical Conference (Antec) of the Society of Plastics Engineers (SPE), Innovative Plasticizing Method for Micro Injection Molding / Las Vegas, NV, USA, 2014.

16. *Jaroschek C.* Spritzgießen fuer Praktiker. – Muenchen: Carl Hanser Verlag, 2013.

17. *Stueck D.* Verweilzeit im Griff // Plastverarbeiter. – 2003. – Nr. 4. – С. 56.

### Справка

С дополнительной информацией о методах расчета времени пребывания полимерного материала в нагретом состоянии при его переработке литьем под давлением, в том числе микролитьем, можно ознакомиться в следующих источниках:

1. *Дувидзон В. Г.* Оптимизация гнздности литьевых форм и типоразмера ТПА // Полимерные материалы. – 2018. – № 6. – С. 4–12.

2. *Кляйнебрам М.* Минимизация времени пребывания полимерного материала в узле пластикации // Полимерные материалы. – 2018. – № 7. – С. 40–42.

Редакция журнала

### Use of the Inverse Screw for Micro-injection Moulding

C. Hopmann, T. Fischer, M. Rieck

*New manufacturing processes are driving innovation and developments in microsystem technology. Today, the range of applications of microsystems extends beyond semiconductors. The ongoing miniaturization of plastic components requires component-specific and economical production methods, e.g., micro-injection moulding. Micro injection moulding using an inverse screw combines the advantages of a piston injection in terms of a precise and reproducible injection process with the good homogenisation properties of a conventional three-zone screw. By integrating the screw geometry in the surface of the plasticising cylinder, the plasticisation is possible in combination with a rotating piston, which is also used for injecting the melt. The inverse screw allows for a minimised melt volume in the plasticising cylinder. This paper describes the development of the inverse screw and its feasibility for micro-injection moulding. On the basis of residence time tests, the thermal load of the polymer is discussed. ■*

*Hopmann C., Fischer T., Rieck M.* Einsatz einer Inversschnecke für das Mikrospritzgießen // Gummi, Fasern, Kunststoffe. – 2018 – Nr. 1–2. – С. 42–47.

## «Ключевые тренды в композитах: наука и технологии»

В Москве 5–8 декабря 2018 г. в МГТУ имени Н. Э. Баумана состоится Международный форум «Ключевые тренды в композитах: наука и технологии».

**Цели мероприятия:** трансфер технологий из науки в промышленность; создание совместных проектов и лабораторий вместе с ведущими иностранными учеными; совместные публикации; демонстрация новейших научных достижений.

Ключевые спикеры – ведущие отечественные и зарубежные специалисты, представители госкорпораций и органов власти.

В рамках форума пройдут научно-практическая конференция и выставка. Участники смогут обменяться свежими

идеями и опытом в области производства композитов, найти партнеров и инвесторов. На площадке форума также состоится чемпионат мира по композитам – Composite Battle World Cup.

**Контакты по вопросам участия в конференции:**  
Виктория Ключева: +7 (909) 935-10-70, conf2018@emtc.ru.

**Контакты по вопросам участия в выставке и для СМИ:**  
Анастасия Вырикова: +7 (903) 559-73-72, avyrikova@emtc.ru.

**Сайт форума:** <https://forum.emtc.ru>.

**Facebook & Instagram:** @CompositeForum

Пресс-служба Межотраслевого инженерингового центра «Композиты России» МГТУ имени Н. Э. Баумана ■