

Комбинированная технология изготовления несущих конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе непрерывных волокон, объединяющая в себе полимеризацию капролактама in-situ (иначе – «по месту», т. е. в форме) с образованием полиамидной матрицы ПКМ и литье под давлением функциональных элементов конструкций, постепенно выходит на уровень ее реализации в экономически эффективном серийном производстве. Ключевым компонентом производственной ячейки при этом является узел подготовки и впрыска реакционноспособной смеси. На выставке K-2016 компания ENGEL Austria GmbH представила новый реакционный модуль, на который подана заявка на патент и который устанавливает новую веху на пути к серийному производству.



Полимеризация ϵ -капролактама в форме открывает новые перспективы для изготовления полимерных изделий из ПКМ на основе термопластичных матриц и волокнистых наполнителей, в данном случае – легких лопат

Производство легких несущих конструкций с полимеризацией в форме

Н. Мюллер, д-р, П. Эггер, Л. Райт, д-р, Г. Штайнбихлер, д-р, ENGEL Austria GmbH (г. Швертберг, Австрия)

Одностадийное автоматизированное серийное производство готовых к использованию изделий из гранулированных полимерных материалов с применением технологии литья под давлением уже давно стало стандартным. В области изготовления легких изделий и конструкций из ПКМ на основе волокнистых наполнителей, в том

числе тканей и однонаправленных лент, такой уровень эффективности пока еще не достигнут. Выходом из этой ситуации является повышение экономической эффективности технологий их изготовления. Из числа используемых в промышленных масштабах современных способов производства технология пропитки под высоким давлением (HP-RTM) более

всех других отвечает конечной цели, заключающейся в одностадийном превращении сухой волокнистой заготовки в готовое к практическому применению изделие.

Полимеризация ϵ -капролактама непосредственно внутри пропитанной композицией на его основе волокнистой заготовки, уже находящейся в форме, с последующей функ-

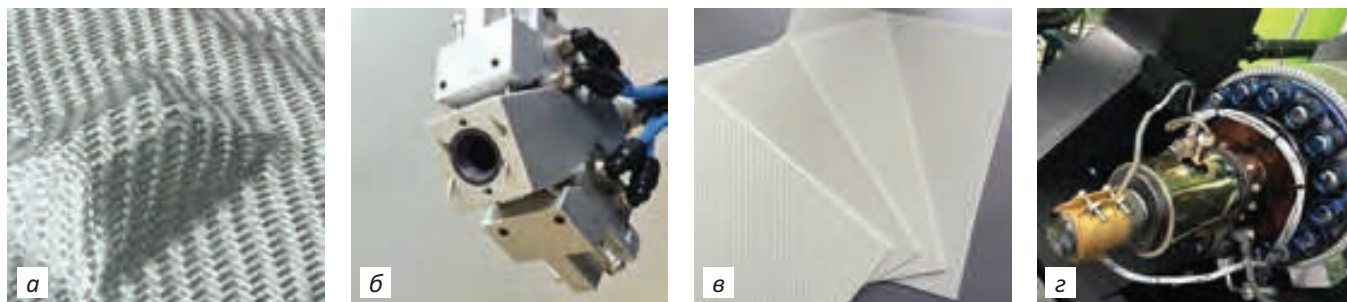


Фото 1. Последовательность основных операций технологического процесса изготовления изделий из ПКМ с приформованными функциональными элементами с применением технологии полимеризации в форме (все иллюстрации: ENGEL): а – сборка сухого многослойного пакета-заготовки и придание ей конфигурации, близкой к конфигурации будущего изделия; б – укладка заготовки в форму с помощью робота; в – полимеризация в форме с образованием несущей части изделия; г – приформовка дополнительных функциональных элементов по технологии литья под давлением

ционализацией несущей структуры с применением способа литья под давлением открывает дополнительные возможности (фото 1). Такой подход, с одной стороны, позволяет дополнительно повысить эффективность производственного процесса, а с другой стороны – наилучшим образом соответствует тенденции более широкого использования термопластичных материалов в качестве матрицы ПКМ. Но при этом обращение с ϵ -капролактамом, вязкость которого в расплавленном состоянии близка к вязкости воды, требует применения специально разработанного оборудования. Для этой цели могут быть использованы многие успешно зарекомендовавшие себя в области литья под давлением технические решения, включая, например, высокоточный впрыск с помощью сервоэлектрических узлов впрыска.

Одностадийная технология изготовления готовых изделий

В настоящее время существует несколько различных способов, которые позволяют изготавливать трехмерные формованные изделия, содержащие в своей структуре армирующие ткани или однонаправленные ленты. Многоступенчатый вариант предусматривает изготовление предварительно монолитизированных заготовок с применением раскроя, нагрева, формования и литья под давлением. Такой подход применяется, главным образом, в тех случаях, когда невелики тех-

нологические отходы производства и отсутствует необходимость в локальных усиливающих элементах для придания изделию повышенной жесткости и прочности.

В случаях же более сложных по конструкции изделий, когда от наполнителя требуется повышенная драпируемость и, кроме того, необходимо локальное усиление собираемого многослойного пакета заготовки, преимуществами обладают реакционные технологии, в частности способ HP-RTM. Так, например, при сборке таких заготовок (иначе – преформ) в их определенных участки могут целенаправленно укладываться однонаправленные армирующие наполнители. В то же время придание изделию дополнительных функциональных свойств в случае применения технологии HP-RTM связано со значительными затратами. Дело в том, что традиционно производимые по этой технологии изделия изготавливаются из ПКМ на основе терморективных связующих – эпоксидных или полиуретановых, что вынуждает, как правило, отдельно изготавливать необходимые крепежные и усиливающие элементы, а затем соединять их с базовым изделием.

В описываемой технологии также используются сухие волокнистые заготовки, которые пропитываются низковязкой реакционно-способной композицией на основе ϵ -капролактама с последующей его полимеризацией и образовани-

ем полиамида 6 (ПА 6). К полученному базовому изделию непосредственно вслед за этим методом литья под давлением приформовываются необходимые функциональные элементы. В результате в рамках одного процесса, осуществляемого в интегрированной производственной ячейке, образуется готовое к практическому применению изделие. Именно в этом и заключается главное преимущество технологии полимеризации в форме.

Мономеры остаются под полным контролем

При переработке ϵ -капролактама в форме речь идет об анионной полимеризации с разрывом кольца (рис. 1). При комнатной температуре ϵ -капролактамы представляют собой кристаллическое вещество белого цвета. Температура плавления этого мономера составляет $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, а его вязкость в расплавленном состоянии – всего около $10\text{ мПа}\cdot\text{с}$. Именно по этой причине ϵ -капролактамы наилучшим образом подходят для пропитки сухих волокнистых структур.

При подготовке к полимеризации в форме в ϵ -капролактамы в отдельных резервуарах добавляются катализатор и активатор (*Baeck G., Egger P., Berg L. F. Polymerisation und Formgebung in der Maschine vereint // Kunststoffe. 2012. Nr. 10. S. 146–150*). Благодаря этим агентам непосредственно после смешивания обоих компонентов смеси начинается реакция полимеризации. За счет

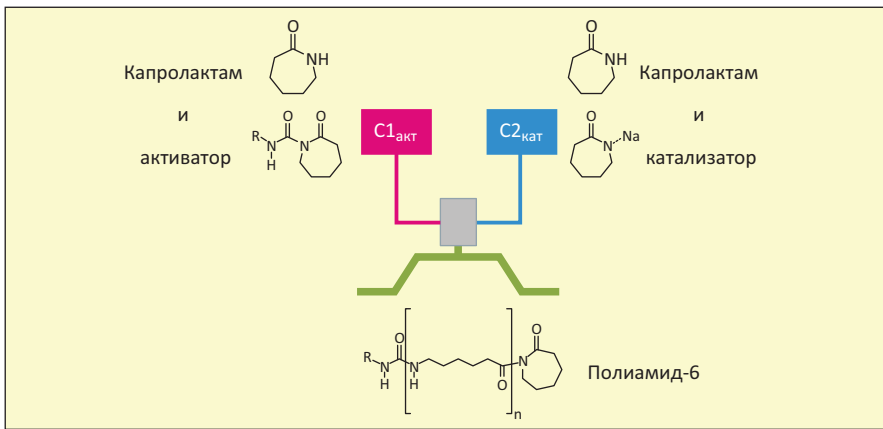


Рис. 1. Схема реакции анионной полимеризации ϵ -капролактама с разрывом кольца, в результате которой образуется ПА 6 ($C1_{акт}$ и $C2_{кат}$ – смеси капролактама с активатором и катализатором соответственно)

использования готовых смесей, содержащих требуемые агенты в нужных количествах, обращение с реакционноспособными компонентами существенно упрощается. Важным требованием является предохранение гранулированного материала от воздействия содержащейся в воздухе влаги. Для этого достаточно просто соблюдать обычные правила обращения с чувствительными к воздействию влаги материалами, а именно: заблаговременно доставить материалы для выравнивания температурных различий в производственное помещение и быстро перегрузить их из транспортных мешков в герметично закрывающиеся дозирующие контейнеры реакционной установки, а мешки – при наличии в них остатков материала – аккуратно закрыть.

В расплавляющем модуле смеси мономеров нагреваются до температуры 120 °С, которая уже близка к температуре полимеризации, варьирующейся в пределах от 140 до 160 °С. В процессе переработки материала температуре формы следует уделять особое внимание – равномерная температура формы является важным условием стабильного протекания реакции и получения продукции высокого качества.

Строгая синхронизация инжекционных поршней

Как и при переработке термопластов, в процессе полимеризации в форме необходимо предотвратить опасность излишнего теплового воздействия на реакционноспособные компоненты. По этой причине компания ENGEL разработа-

ла новый реакционный модуль, в котором смеси материалов расплавляются строго в требуемом количестве и незадолго до их переработки. В модулях плавления одновременно находится количество жидких реакционноспособных компонентов в объеме, соответствующем не более чем трем циклам (рис. 2). Уровень заполнения непрерывно контролируется и поддерживается в пределах допустимых границ, устанавливаемых оператором.

Синхронный и точный впрыск обоих реакционноспособных компонентов является самым важным требованием в процессе полимеризации в форме. Два не связанных между собой механически инжекционных поршня сначала набирают независи-

мо друг от друга в требуемых количествах компоненты смеси для того, чтобы затем в ходе синхронизируемого с помощью электронной системы движения передать их в гнездо формы. Сопла смесительной камеры также должны открываться и закрываться синхронно с движением поршней. Требуемая точность работы обеспечивается с помощью сервоэлектрических приводов, подобных тем, что используются для впрыска материала на электрических литьевых машинах, а также с помощью программного обеспечения для управления технологическим процессом, разработанного специально для технологии полимеризации в форме. После смешивания компонентов ϵ -капролактама полимеризуется в течение 2–3 мин в гнезде формы с образованием высокомолекулярного ПА 6.

При оптимизации технологического процесса в качестве основных задач рассматривались уменьшение времени цикла и обеспечение минимальной пористости изделия. Если время цикла в значительной степени зависит от реакционной способности смеси, и оператор лишь в ограниченных пределах может влиять на него путем регулирования температуры формы, то пористостью можно целенаправленно управлять за счет соответствующей корректировки параметров технологического процесса, снижая ее практически

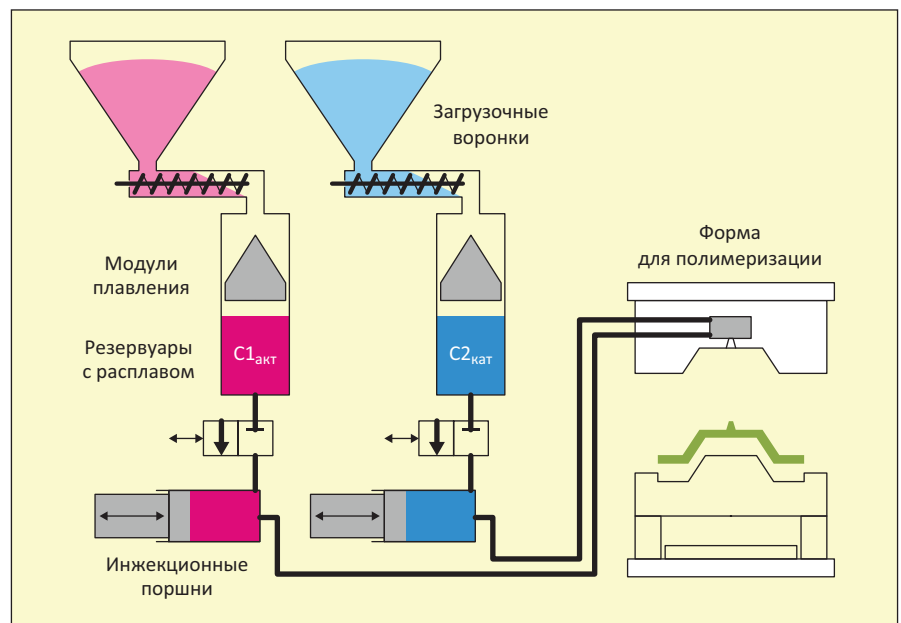


Рис. 2. Схема нового реакционного модуля, особенностью которого является возможность уменьшения тепловой нагрузки на мономеры, поскольку в модулях плавления смесей $C1_{акт}$ и $C2_{кат}$ одновременно находятся жидкие реакционноспособные компоненты в объеме, соответствующем не более чем трем технологическим циклам

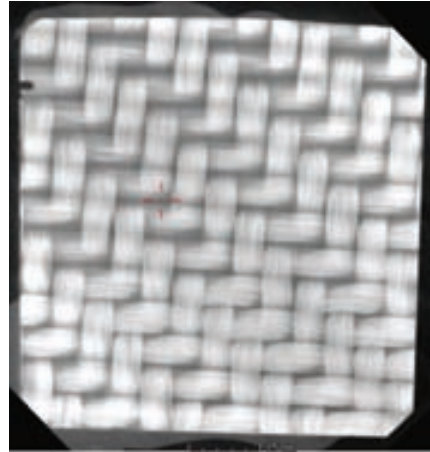
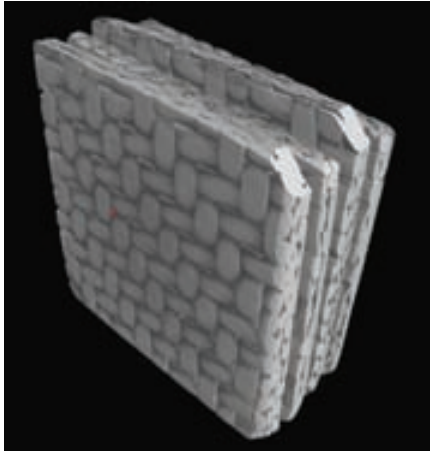


Фото 2. Результаты компьютерной томографии показывают, что тканый наполнитель ПКМ может пропитываться низкомолекулярной реакционноспособной композицией практически без образования пор в готовом изделии

до нуля (фото 2). Наиболее важными параметрами при этом являются степень вакуумирования формы перед впрыском и величина давления в форме к моменту окончания процесса инъекции расплава.

Многокомпонентная технология с использованием силы тяжести

Комбинация технологии полимеризации в форме с литьем под давлением открывает широкие возможности для изготовления готовых к использованию облегченных изделий из ПКМ. При этом на первом этапе на основе сухой заготовки изготавливается несущая часть изделия с полиамидной матрицей, которая непосредственно после процесса полимеризации ϵ -капролактама в форме извлекается из этой формы роботом и перемещается в гнез-

до литьевой формы. Как и при обычном многокомпонентном литье под давлением с переносом заготовки, в этой литьевой форме на втором этапе процесса к несущей части изделия приформовываются различные дополнительные детали, такие как окантовка краев, ребра жесткости, выступы для привинчивания крепежных деталей или создаются локальные участки увеличенной толщины. С целью уменьшения количества различных материалов в готовом изделии и из соображений совместимости с матрицей ПКМ в качестве материала дополнительных функциональных элементов применяется предпочтительно тот же, что и матрица ПКМ, ПА 6, наполненный, например, короткими волокнами.

Поскольку смеси капролактама с добавками подаются к смеситель-

ной камере формы через обогреваемые шланги, местоположение реакционного модуля может выбираться совершенно свободно. Например, с целью уменьшения занимаемой площади его можно смонтировать позади литьевого узла.

Новый реакционный модуль можно использовать в комбинации с различными литьевыми машинами компании ENGEL. Преимущество производственных установок с вертикальным направлением смыкания при полимеризации в форме заключается в том, что сухая заготовка может укладываться в нижнюю часть формы и быть там зафиксированной просто-напросто под действием собственного веса (рис. 3). Если форма оснащена приспособлениями для фиксации и удерживания заготовки, то с таким же успехом могут применяться и горизонтальные литьевые машины.

На основе вертикального прессы модели ENGEL v-duo 700 компания ENGEL совместно с фирмой Schoefer GmbH (г. Швертберг, Австрия), успешно зарекомендовавшей себя в области производства оборудования для полимеризации в форме, создала первоначальный вариант комплексной ячейки для изготовления легких лопат (фото 3 и фото у заголовка статьи), которая была продемонстрирована на выставке K-2016. Применение вертикального узла смыкания для изготовления изделий данного типа существенно упрощает манипуляции с заготов-

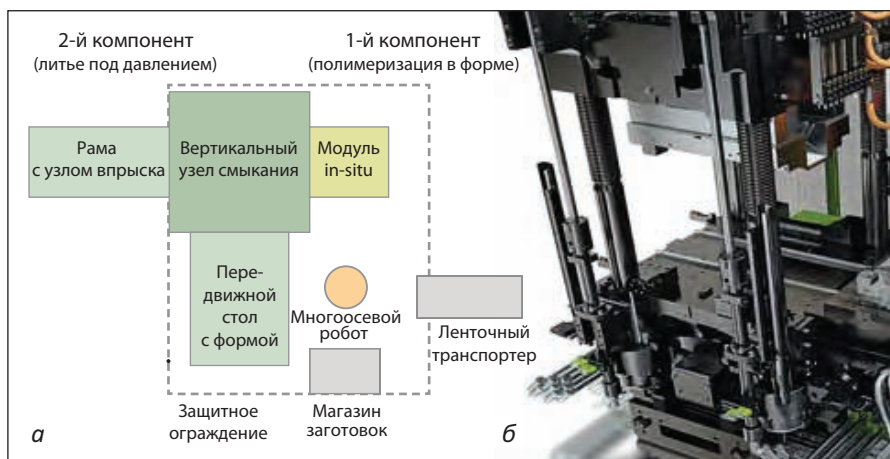


Рис. 3. При изготовлении продукции для многих областей применения использование силы тяжести обеспечивает определенные преимущества при манипуляциях с заготовками. На схеме (а) приведено расположение в плане основных узлов производственной ячейки для многокомпонентного процесса изготовления изделий из термопластичных ПКМ с полимеризацией в форме (in-situ) и с использованием вертикальной литьевой машины (б)

ками. Наиболее значимые и решенные частные проблемы были связаны, главным образом, с формой (термостатирование, герметизация гнезда для полимеризации в форме, обеспечение строгого геометрического соответствия гнезда литьевой формы несущей части изделия, изготавливаемой с применением технологии полимеризации в форме).

Пути дальнейшего повышения эффективности процесса

Пока еще не удалось обеспечить соответствие цикличности процессов полимеризации в форме и литья под давлением. Причина заключается в более продолжительном процессе полимеризации. Следует отметить, что при изготовлении изделий с одинаковыми раз-

мерами требуемое давление в форме при полимеризации в форме существенно ниже, чем при использовании технологии литья под давлением. При определенной компоновке производственной ячейки это различие можно выгодно использовать. Так, например, можно одновременно изготавливать несколько несущих элементов изделий с применением технологии полимеризации в нескольких гнездах многогнездной формы, после чего последовательно осуществлять приформовку к ним необходимых функциональных элементов в одногнездной форме для литья под давлением. В идеальном случае за счет этого можно добиться точного соответствия времени цикла полимеризации в форме и последую-

щей продолжительности литья под давлением.

Соединительным звеном между разными технологическими процессами и ключом к повышению производительности является автоматизация. Роботы осуществляют загрузку сухих заготовок в гнезда формы для полимеризации, перемещение изготавливаемых несущих частей изделий в литьевую форму, а также извлечение из нее готовых изделий.

Заключение

Благодаря новому, разработанному специально для переработки ε-капролактама реакционному модулю компании ENGEL удалось преодолеть важный барьер на пути объединения процессов полимеризации в форме и последующей функционализации изготавливаемых несущих изделий по технологии двухкомпонентного литья под давлением. Разработка технологии осуществлялась с применением продемонстрированной еще в 2012 г. компанией ENGEL машины-прототипа для полимеризации в форме. С тех пор в нее были внесены существенные концептуальные изменения, в частности, разделены узлы, предназначенные для подготовки и инъекции реакционноспособных компонентов.

В результате появилась производственная ячейка, позволяющая осуществлять точную и надежную переработку подготовленного в строго необходимом количестве ε-капролактама. Это открывает новые перспективные возможности практического применения изделий из термопластичных ПКМ для различных отраслей промышленности.

Перевод А. П. Сергеевкова

Production of Lightweight Structures with In-Situ Polymerization

N. Mueller, P. Egger, L. Reith, G. Steinbichler

In-situ polymerization of caprolactam to create fiber composite carrier structures with subsequent functionalization of the component through injection molding is very closely approaching the ideal of economic series production. One decisive equipment component here is the unit for preparing and injecting the reactive components. At K 2016, ENGEL Austria is defining the next milestone en route to series production, with a newly-developed reaction unit for which a patent has been registered. ■

Фото 3. Установка для изготовления легких лопат из термопластичного ПКМ обеспечивает комбинацию процессов полимеризации в форме и традиционного литья под давлением