

От многих изделий из полимерных материалов требуются высокая жесткость, теплостойкость и химическая стойкость. В данной статье речь идет не о дорогих суперконструкционных термопластах, таких как полиэфирэфиркетон или полифениленсульфид, а о более дешевых материалах – реактопластах, о которых часто и несправедливо забывают. На заводе компании Baumgarten automotive technic, которая использует в настоящее время адаптивную систему управления APC plus компании KraussMaffei при крупносерийном литьевом производстве изделий из этих материалов, значительно снизился уровень брака.

Цех литья под давлением на заводе компании Baumgarten automotive technic



## Преимущества литья под давлением реактопластов с использованием системы APC plus

К. Виланд, Н. Топик, KraussMaffei (г. Мюнхен, Германия), Я. Хирц, Baumgarten (г. Бурбах, Германия)

Термопласты, широко используемые, например, в автомобилестроении, во многом уступают по свойствам металлам. В частности, их нельзя использовать для изготовления поршней тормозного цилиндра, которые кратковременно должны выдерживать температуру более 400 °С, или комплектующих деталей масляных насосов, которые должны длительное время оставаться деформационно устойчивыми под воздействием высоких термомеханических нагрузок или стойкими к воздействию агрессивной среды. В этих случаях представляется возможным использование реактопластов, которые часто не попадают в поле зрения многих разработчиков изделий. Кроме того, эти материалы особенно привлекательны с экономической точки зрения.

В отличие от металлических отливок определенной геометрической формы, которые требуют последующей обработки резанием, изделия из реактопластов можно изготовить за один цикл литьем под давлением. Кроме того, обычные реактопласты

имеют более низкую плотность, чем, например, алюминий, не говоря о стали. Наличие дешевого наполнителя в матрице (фенольной, эпоксидной, полиэфирной и др.), содержание которого может достигать 80 %, позволяет еще более снизить стоимость реактопластов. Однако их химическая структура, изменяющаяся в результате отверждения от линейной к сетчатой в процессе переработки, чувствительность к температурным воздействиям и напряжениям сдвига при переработке, высокое содержание волокнистых и (или) других наполнителей, а также колебания свойств от партии к партии усложняют для специалистов производство изделий из реактопластов литьем под давлением и сохранение стабильности массы впрыска.

Компания Baumgarten automotive technics GmbH уже 60 лет занимается крупносерийным производством изделий из реактопластов и, насчитывая 75 сотрудников в своем штате, поставляет сложные технические детали на различные рынки, например, автомобиль-

ной и энергетической отраслей промышленности. Там, где металл должен быть заменен на пластик, специалисты компании оптимизируют геометрию изделий с учетом особенностей свойств полимерных, в том числе термореактивных, материалов и самостоятельно разрабатывают концепции как литьевых форм, так и всего процесса производства. Кроме того, компания Baumgarten является экспертом и консультантом по всем вопросам, связанным с реактопластами.

С 2017 г. на своем головном предприятии в г. Бурбахе (Германия) компания Baumgarten, поставляющая комплектующие для автомобильной промышленности, применяет на двух производственных установках такую функцию литьевой машины, как адаптивная система управления APC plus компании KraussMaffei. Эта система анализирует текущее состояние процесса и постоянно сравнивает его с кривой заданных значений (опорной кривой). При этом точка переключения на стадию подпитки

и профиль давления подпитки регулируются автоматически в соответствии с давлением расплава (более подробно о функции APC plus применительно к переработке термопластов см. в ПМ № 6, 2017, с. 34–37. – Прим. ред.).

### Уменьшение колебаний давления внутри формы

В 2016 г. компания Baumgarten запустила проект с использованием функции APC plus сначала как вид входного контроля покупного сырья, чтобы лучше исследовать отклонения в его свойствах от партии к партии. Для этого на гидравлической машине серии CX с усилием смыкания 1600 кН, на которой изготавливалась крышка вакуумного насоса (фото 1), была установлена предыдущая версия системы APC. Однако возникли проблемы, связанные с высоким содержанием наполнителя. Учитывая это, специалисты компании KraussMaffei в ходе работ видоизменили систему до версии APC plus. Теперь в системе были запрограммированы харак-



Фото 1. Пластиковая крышка вакуумного насоса должна иметь абсолютно плоскую внешнюю поверхность (справа), поэтому главное требование здесь заключается в том, чтобы на ней не отражалась сильно выраженная ребристая структура с обратной стороны крышки из-за большой усадки материала в местах ребер (слева), как это было бы в случае термопластов. Эту задачу можно без проблем решить, используя для изготовления крышки фенолоформальдегидный реактопласт (все иллюстрации: KraussMaffei)

теристики различных реактопластов – например, характерная для конкретного материала компрессионная кривая, благодаря чему можно было непрерывно измерять вязкость материала и регулировать момент переключения с заполнения

формы на подпитку, причем индивидуально для каждого цикла.

Преимущества нового решения выходят далеко за рамки простого анализа: процент отбраковки регулировочных колец масляного насоса, изготавливаемых из феноло-

#### Технология RTM

Структурные и полуструктурные узлы, например, детали днища кузова, боковые рамы или каркасы сидений

#### Мокрое прессование RTM

Полуструктурные узлы из вторичного углеродного волокна, например, гибридные детали

[www.kraussmaffei.com](http://www.kraussmaffei.com)



#### Технология Surface RTM

Элементы лицевой поверхности, усиленные волокном, с возможностью окрашивания, например, детали крыши, облицовка двери, багажник или капот двигателя

#### Технология IMC

Усиленные волокном структурные элементы, например, фронтальная панель автомобиля, силовой каркас, каркас панели приборов



#### Технология FiberForm

Усиленные непрерывным волокном детали, например, крш-элементы, усилители стоек или каркасы сидений

Решения в области волокнистых композитных материалов для создания прочных облегченных конструкций

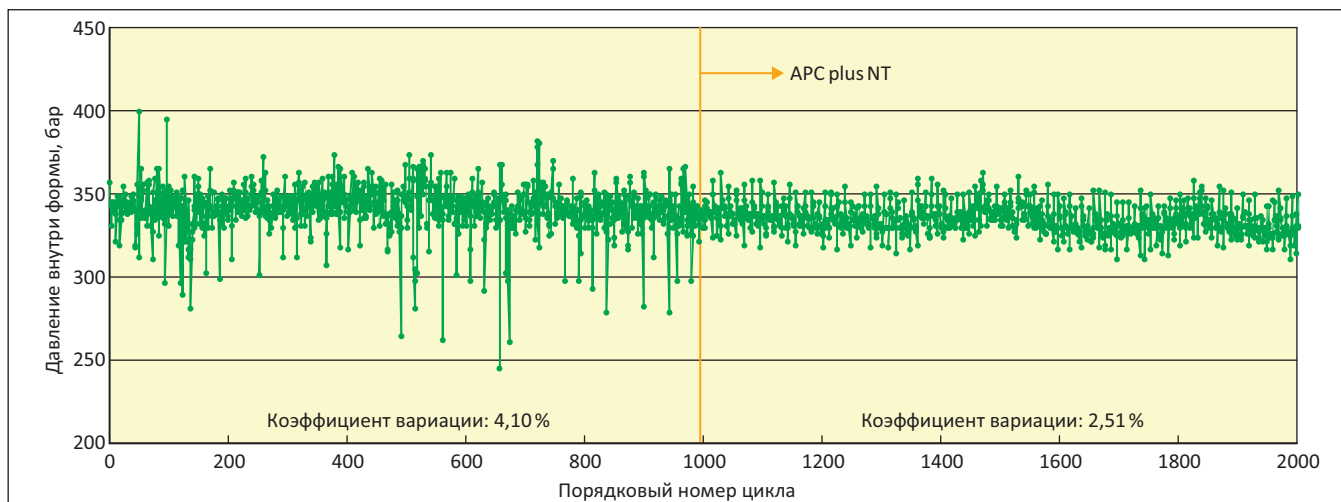


Рис. 1. Результаты длительного тестирования литья под давлением деталей из реактопластов, проведенного без системы APC plus и с системой, показали, что при ее использовании диапазон колебаний давления внутри формы значительно уменьшился

формальдегидного реактопласта, наполненного 70 % стеклянных волокон и минерального наполнителя, и производимых большими партиями на литьевой машине CX 200, значительно снизился. Эта комплектующая деталь постоянно изготавливается с 2014 г. в три смены и отличается высокой размерной точностью при длительном использовании (фото 2). Так как кольцо регулирует давление масла в двигателе, то оно практически не должно деформироваться при температурах от  $-30$  до  $140$  °С в течение всего срока службы автомобиля: допуск по его высоте составляет всего 10 мкм. Окружающая среда представляет собой агрессивную смесь масла, воды, добавок и других веществ. Кроме того, на кольцо действуют статические и динамические силы, потому что при сжатии пружины до

крайнего положения давление масла воздействует на обратный клапан.

Еще до введения системы APC plus на заводе Baumgarten контроль давления внутри формы служил основным критерием качества, и детали, изготовленные со слишком большим отклонением от номинального значения этого показателя автоматически отбраковывались. Результаты тестирования, проведенного в течение 48 ч (24 ч без системы APC plus и 24 ч с системой), показали, что при активировании данной функции диапазон колебаний давления внутри формы значительно уменьшился: его коэффициент вариации снизился с 4,10 до 2,51 % (рис. 1). Таким образом, грубые ошибки, которые могут возникнуть в результате изменения размеров гранул, содержания наполнителя или наличия частиц пыли, компенсируются благодаря

функции APC plus, и поэтому могут быть установлены более узкие допуски на размеры деталей.

Если провести более детальный анализ, то изменения давления внутри формы представляют особый интерес. Так, отклонения от заданного давления даже в пределах  $\pm 30$  бар могут привести к разрывам потоков расплава в форме и поставить под сомнение качество будущих деталей, поскольку могут оказать негативное влияние на ее прочность, а также ухудшить качество ее поверхности.

### Одинаковое значение OFT-теста при разных свойствах реактопласта

В будущем с помощью системы APC plus должны быть исследованы и другие явления, что позволит ответить, например, на вопросы о том, как быть, если показатель текучести



Фото 2. С 2014 г. производство высокоточных регулировочных колец масляного насоса с допуском всего лишь 10 мкм на исполнительные размеры, изготавливаемых на заводе Baumgarten из наполненного фенолформальдегидного реактопласта, ведется на литьевой машине CX 200 в непрерывном трехсменном режиме работы

расплава сильно изменяется, но деталь отвечает тем же критериям качества? И что тогда происходит в процессе переработки?

Практические исследования непосредственно на литевой машине зачастую имеют гораздо большую ценность для переработчиков, чем методы испытаний, осуществляемые вне машины, такие как, например, определение вязкости материала на капиллярном вискозиметре (OFT: Orifice-Flow-Test). Дело в том, что текучесть реакционноспособного реактопласта одновременно зависит и от его начальной вязкости, и от реакционной способности, т. е. является результирующей величиной. Это означает, что материал с низкой исходной вязкостью и высокой реакционной способностью может достигать того же результата теста OFT, что и материал с высокой вязкостью и низкой реакционной способностью, однако ведут они себя совершенно иначе в материальном цилиндре литевой машины.

Стремление компании Baumgarten лучше понять терморек-

тивные материалы сделало ее экспертом в этой области. Ее рекомендации будут полезны как клиентам, так и тем предприятиям, которые перерабатывают термопласты, но хотели бы расширить ассортимент своей продукции за счет реактопластов. Представители таких компаний чаще всего не решаются на освоение неизведанной сферы и ищут партнера по проекту, потому что реактопласты требуют отдельных знаний и значительного опыта работы с ними.

В первую очередь должны строго контролироваться условия хранения терморективных материалов, поскольку они чувствительны к воздействию факторов окружающей среды; это также касается и вопросов их транспортировки. Например, реактопласты «запоминают» воздействие температуры и влажности, что требует точной оценки их свойств перед переработкой и корректировки режима литья под давлением. Повышенная влажность и температура окружающей среды или просто слишком

длительный срок хранения могут навредить реактопласту и привести к отклонениям в процессе его переработки. Кроме того, поскольку его абразивность при наличии наполнителя создает чрезмерную абразивную нагрузку на форму и материальный цилиндр, необходимо использовать специальные, износостойкие сорта стали для их изготовления. В этом случае компания Baumgarten подробно прописывает требования к этим сталям.

Колебания температуры переработки реактопластов или длительное пребывание в материальном цилиндре могут привести к тому, что они вследствие своей реакционной способности могут начать отверждаться уже при их пластфикации, что не даст сработать обратному клапану. Из-за высокого содержания наполнителя (в компании Baumgarten – от 30 до 80 %) и более низких температур переработки по сравнению с термопластами терморективные композиции едва поддаются сжатию в соответствующей зоне материального цилиндра.

**НОВАЯ  
ОРБИТА**  
Инжиниринговая компания



Проект



Поставка



Монтаж



Сервис

**Frigel**  
Intelligent Process Cooling

**RosMould** 18-20 июня  
2019 г.  
Приглашаем посетить наш стенд  
Павильон 1, стенд D14, в «Крокус Экспо»



**Охлаждайтесь за счет окружающей среды!**

Максимальная экономия электроэнергии в холодный период при использовании пассивных самодреннующихся радиаторов.

Доверьте охлаждение производства системе **ECODRY** - это надежно, технологично и очень выгодно!

Адрес: 123592, г. Москва, ул. Кулакова, д. 20 Тел.: 8-800-505-01-05 Факс: (499) 740-22-28 E-mail: info@novayaorbita.ru www.novayaorbita.ru

В результате этого минимальные отклонения остаточной подушки материала или момента начала заполнения формы, которые обслуживающий персонал, конечно, не может обнаружить в процессе работы, сказываются непосредственно на дозе впрыска. И, не имея возможности автоматически ввести изменения, никак невозможно повлиять на механизм и кинетику процесса пластичности и впрыска.

### Объем заполнения оформляющей полости формы остается постоянным

Указанные выше колебания успешно компенсируются системой APC plus – как для сыпучих реактопластов, так и для премиксов типа ВМС, а также для жидких и твердых силиконов. На рис. 2 видно, что, например, объем фенольного реактопласта с органическим наполнителем при давлении 1000 бар в материальном цилиндре снижается на 3,7%. Но если тот же реактопласт содержит стеклянные волокна и минеральный наполнитель в количестве 80%, то деформация сжатия составляет всего 1,8%. Для сравнения: аналогичный показатель у термопластичного полимера – полипропилена – составляет приблизительно от 8 до 9%.

Чтобы адаптивная система управления APC plus была удобной для оператора и учитывала наиболее частые колебания содержания наполнителя, при использовании сыпучих реактопластов оператор может просто выбирать более низкую или высокую степень наполне-

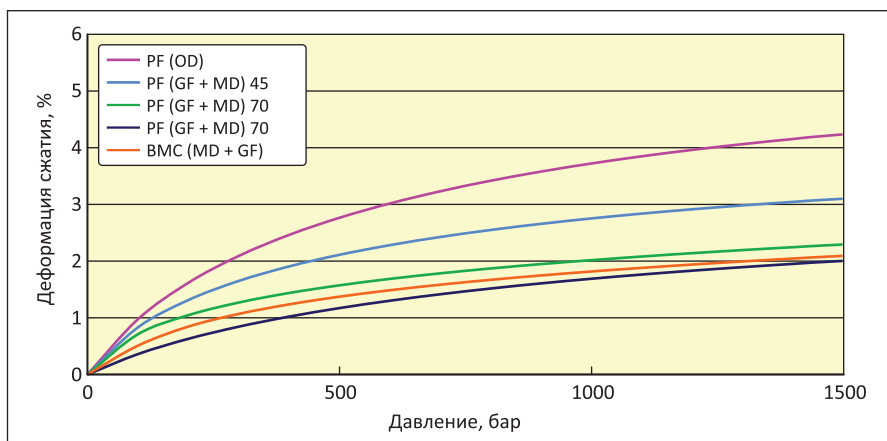


Рис. 2. Чем выше степень наполнения реактопласта и меньше давление сжатия в цилиндре, тем ниже кривая деформации сжатия, характерная для конкретного материала: PF – фенолоформальдегидный реактопласт; ВМС – полиэфирный премикс; OD и MD – органический и минеральный наполнитель соответственно; GF – стеклянные волокна; числа указывают степень наполнения реактопластов в процентах

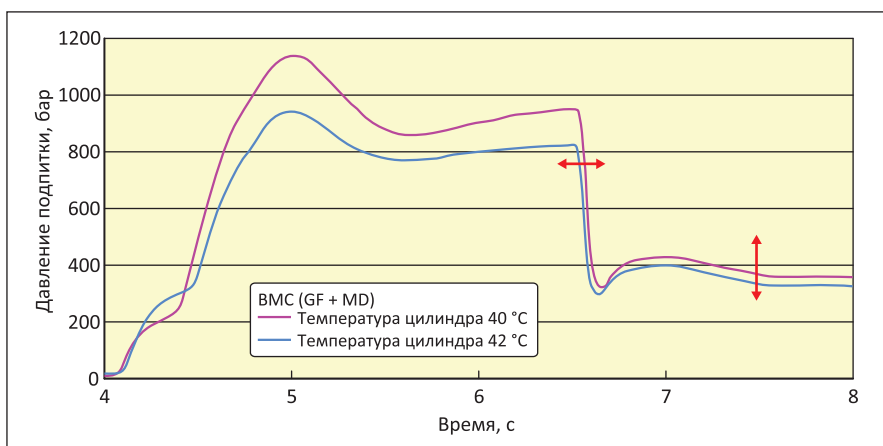


Рис. 3. Когда температура материального цилиндра поднимается на 2 °C, а перерабатываемый полиэфирный ВМС становится менее вязким, система APC plus заранее переключает процесс литья на подпитку и понижает давление подпитки во избежание перелива: GF + MD – смесь стеклянных волокон и минерального наполнителя (другие пояснения – в тексте статьи)

ния. То, что APC plus основывается на кривых деформации сжатия материала в материальном цилиндре узла впрыска литьевой машины, характерных для каждого материала, является ее отличительной особенностью и имело решающее значение для успешного патентования системы в 2015 г.

В ходе производственного процесса система APC plus на основании прогнозируемого объема впрыска сама регулирует точку переключения на подпитку и величину давления подпитки таким образом, чтобы объемное заполнение формы оставалось постоянным (рис. 3). Если, например, при переработке ВМС температура цилиндра увеличивается на 2 °C, что может произойти при использовании «дрейфующего» термостата или в лет-

нюю жару и в результате чего материал становится более текучим, система APC plus раньше переключает процесс с давления впрыска на подпитку (горизонтальная стрелка на рис. 3). Одновременно уменьшается давление подпитки (вертикальная стрелка на рис. 3). И то, и другое происходит во избежание перелива полости формы.

Возмущающие воздействия, которые могут иметь место при литье под давлением, такие как изменения условий окружающей среды или свойств сырья от партии к партии, а также случайные колебания, которые непредсказуемо возникают по ряду причин от цикла к циклу, автоматически регулируются и компенсируются самой системой APC plus в одном и том же цикле литья. Обслуживающий персонал обычно не замечает подобные явления. Тем не менее сотрудники должны детально ознакомиться с новыми принципом и алгоритмом действий, чтобы осознанно не вмешиваться в процесс, как было до этого, в случае появления отклонений. Операторы должны понимать это и полагаться на то, что машина автоматически поддерживает постоянный объем заполнения формы.

### Особенности литья под давлением деталей из реактопластов с более высокими дозами впрыска

Слишком раннее начало отверждения реактопластов является одной из самых больших проблем

на пути к увеличению дозы впрыска, потому что контролировать этот сложный процесс становится все труднее с увеличением объема материала. Компания Baumgarten в настоящее время работает на машинах компании KraussMaffei с усилием смыкания от 800 до 3000 кН и диаметром шнека от 35 до 70 мм. Продукция для автомобильной промышленности выпускается здесь миллионами единиц. Примерами являются поршни тормозного цилиндра из реактопласта, которые были поставлены в США в количестве 1,3 млрд шт. и уже давно получили там признание при эксплуатации, но в Европе все еще не настолько распространены.

На заводе в г. Бурбахе производятся также прецизионно точные комплектующие детали для гидравлических насосов, которые поставляются клиентам по всему миру. Однако появляется все больше запросов на изделия массой до 2 кг и более. Особенно высокие темпы роста таких заказов наблюдаются в энергетическом секторе.

Наряду со стойкостью к износу и стабильностью, от многих полимерных изделий требуются высокие электроизоляционные свойства и герметичность, что обуславливает востребованность реактопластов. Электроизолирование элементов электроники мо-

### Об эффективности адаптивной системы управления APC plus

Расширенные возможности адаптивной системы управления APC plus компании KraussMaffei теперь охватывают не только переработку термопластов, но и весь спектр термореактивных полимерных материалов. Литье под давлением реактопластов является сложным процессом, поскольку преждевременное отверждение, высокое содержание наполнителя и возможный обратный поток расплава во время впрыска затрудняют точность воспроизведения свойств изделий от цикла к циклу. Машинная функция APC plus управления технологическим процессом литья обеспечивает стабильность дозы впрыска как сыпучих реактопластов, так и премиксов типа ВМС. В результате в компании Baumgarten automotive technics GmbH, которая одной из первых внедрила систему APC plus, значительно уменьшилось количество брака.

жет осуществляться при использовании реактопластов на основе эпоксидного связующего. В этом случае такие элементы применяются в качестве закладных деталей при литье под давлением и полностью обволакиваются полимерным материалом.

### Возможности применения реактопластов в крупносерийном производстве

Обе компании – KraussMaffei и Baumgarten – более 35 лет поддерживают хорошие партнерские отношения, о чем свидетельствует быстрое внедрение системы APC plus (фото 3). Возможность испытать расширенную версию этой системы на реактопластах в условиях серийного производства была

успешно реализована. Производитель литевых машин и перерабатывающая фирма в рамках своего сотрудничества преследуют цель добиться большего признания реактопластов – класса полимерных материалов, о котором переработчики часто и несправедливо забывают. Поскольку во время обучения в вузах и при повышении квалификации углубленно изучаются только сами реактопласты, то технологи обычно мало знают о возможностях этих материалов, когда речь идет о прочных и долговечных полимерных изделиях. Поэтому компания Baumgarten активно сотрудничает с ведущими университетами, такими как Рейн-Вестфальский технический университет г. Аахена и Институт полимерных материалов г. Люденшайда. Чем больше развиваются секторы энергетики и мобильного транспорта в виде, например, более легких по массе электромобилей, тем больше могут выиграть от этого изделия из реактопластов, изготовленные по технологии литья под давлением.

### The Advantages of Thermosets Injection Molding with System APC plus

C. Wieland, N. Topic, J. Hirz

*Thermosets offer high stiffness, are heat and chemically resistant and flow freely into the machine: we are not talking about high-performance thermoplastic resins such as PEEK or PPS, but thermoset polymers. For processing these challenging materials, the large series specialist Baumgarten automotive technics employs the APC plus machine function from KraussMaffei. As a result, rejects have fallen significantly.* ■



Фото 3. Партнеры по внедрению системы APC plus в серийное литьевое производство изделий из реактопластов (слева направо): Николина Топик (KraussMaffei), Линус Шнайдер и Ян Хирц (оба из компании Baumgarten), а также Кордула Виланд (KraussMaffei)