

Уменьшение времени вулканизации резин при литье под давлением

Ю. Зауер,

REP-Deutschland GmbH (Германия)

В данной статье обсуждаются результаты работ по уменьшению времени вулканизации сырых резиновых смесей при литье под давлением резинотехнических изделий (РТИ), что позволяет существенно сократить общее время цикла и повысить производительность процесса. При этом удается повысить качество РТИ и уменьшить количество отходов. Приводятся конкретные примеры литья под давлением некоторых РТИ с уменьшенным временем вулканизации.

1. Температурно-временной цикл литья под давлением РТИ.

2. Известные пути уменьшения времени вулканизации.

3. Факторы, влияющие на время вулканизации.

3.1. Закономерности ламинарного течения.

3.2. Гнездность литьевой формы.

4. Система TurboCure – комплексное решение проблемы.

5. Примеры практического применения элементов TurboCure.

Заключение.

1. Температурно-временной цикл литья под давлением РТИ

Характерный температурно-временной цикл литья под давлением РТИ состоит из 5 основных стадий и в упрощенном виде представлен на рис. 1. Упрощенным он выглядит потому, что на каждой из стадий температура некоего объема материала (сначала в виде сырой резиновой смеси, а в конце цикла – в виде готового, вулканизированного изделия), продвигающегося по зонам перерабатывающего оборудования и оснастки, предполагается как бы одинаковой по его толщине и зависящей только от времени литья под давлением, хотя на самом деле в каждый момент времени существует градиент температуры и по толщине потока смеси (а затем и изделия). Таким образом, для простоты начального анализа речь пока идет о средней температуре материала.

На первой стадии процесса, по мере продвижения исходной резиновой смеси вдоль вращающегося шнека нагретого материального цилиндра узла впрыска литьевой машины, осуществляется нагрев смеси от начальной температуры $T_0 \approx 20^\circ\text{C}$ до температуры

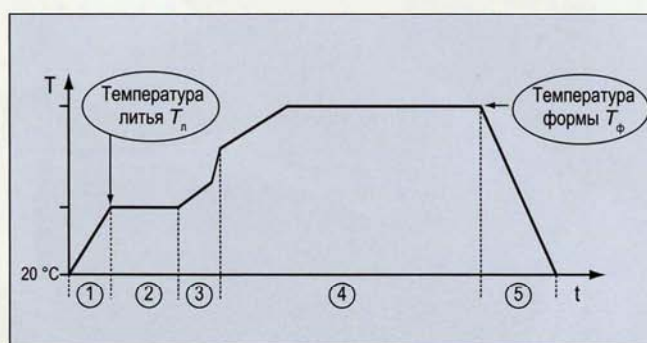


Рис. 1. Характерный температурно-временной цикл литья под давлением РТИ, состоящий из 5 стадий (пояснения см. в тексте статьи): T – температура; t – время

литья T_l , выбираемой в зависимости от типа материала. Эта температура задается, контролируется и, при необходимости, регулируется в целях оптимизации режима литья.

На второй стадии смесь находится перед шнеком и подготавливается к впрыску, приобретая заданную температуру T_l по всему своему объему.

На третьей стадии процесса литья осуществляется впрыск сырой резиновой смеси в оформляющую полость литьевой формы, в течение которого происходит дальнейший нагрев материала – в первую очередь за счет высоких напряжений сдвига в самой смеси при ее движении внутри формы (внутренние источники тепла), но также и за счет контакта с поверхностью каналов литниковой системы и оформляющей полости формы, нагретой до температуры T_f (внешние источники тепла).

На четвертой стадии, после заполнения смесью оформляющего гнезда, средняя температура материала все еще ниже, чем у стенок формы, поэтому в гнезде смесь нагревается до температуры формы T_f , при которой она выдерживается в течение некоторого заданного времени для более полного прохождения химического

Sauer J. Reduzierung der Vulkanisationszeit beim Spritzgiessen // Gummi, Fasern, Kunststoffe. – 2009, Nr. 7. – S. 439 – 445.

процесса вулканизации, заключающегося в образовании редкосетчатой структуры РТИ и начинающегося уже при заполнении гнезда. При этом время нагрева на этой стадии тем больше, чем больше толщина изделия. Известно, что скорость вулканизации смеси увеличивается с увеличением ее температуры, которая, однако, не должна превышать некоего значения, допустимого для перерабатываемой сырой резины и выбираемого в качестве T_{ϕ} .

Наконец, на пятой, завершающей, стадии, начинающейся после извлечения изделия из формы, происходит его охлаждение, в течение которого также может протекать дополнительная вулканизация материала. Поэтому в целях комплексного контроля процесса литья под давлением должен контролироваться и режим охлаждения изделия, хотя данная стадия и не является темой обсуждения в данной статье.

2. Известные пути уменьшения времени вулканизации

Традиционно переработчики используют два основных пути сокращения времени вулканизации сырых резиновых смесей при литье под давлением. Во-первых, стараются оптимизировать температурный режим пластикации и гомогенизации сырой резины в материальном цилиндре узла пластикации и впрыска литьевой машины с последующим контролем и возможно более точным поддержанием установленного режима в серийном производстве. Во-вторых, пытаются обеспечить возможно более точные и постоянные температурные условия для всех гнезд многогнездных форм, что может стать слишком дорогостоящим мероприятием без существенного эффекта. Например, из-за различных расстояний между нагревательными элементами и оформляющей поверхностью гнезд (особенно гнезд сложной формы) практически невозможно исключить различные перепады температур между ними.

Специалисты компании REP Group (Франция) решили пойти принципиально другим путем, условно названным Thermotrac, – менее затратным, но более эффективным с точки зрения стабильности процесса литья под давлением и сокращения времени вулканизации. Но в начале решения поставленной задачи были проанализированы и, по возможности, реализованы традиционные пути ее решения с точки зрения температурного режима литья.

Известно, что так называемый «краевой эффект», заключающийся в тепловых потерях от формы в окружающую среду, приводит к тому, что температура поверхности формы (особенно в ее углах) заметно ниже, чем внутри формы. При этом, как правило, различны и температуры формообразующих поверхностей отдельных гнезд многогнездной формы, и поскольку требуемое время вулканизации необходимо рассчитывать для более холодного гнезда, то расчетное время четвертой стадии цикла литья всегда будет завышенным по отношению к более нагретым гнездам. Специалистами компании была разработана специальная компьютерная программа Isothermould, которая позволяет

рассчитывать систему нагрева и термостатирования литьевой формы, обеспечивающую, несмотря на «краевой эффект», практически одинаковую температуру всех оформляющих гнезд.

Дополнительный резерв сокращения времени вулканизации был использован при одновременном использовании другого известного переработчикам резин параметра – предельной степени вулканизации (иначе – степени сшивания), более объективно характеризующего этот процесс и глубину его прохождения. Поэтому в расчетах температурных режимов опирались и на этот критерий, значение которого в идеальном случае должно быть постоянным у всех готовых литьевых РТИ.

Наконец, был полностью реализован еще один, также известный в отрасли, путь сокращения времени вулканизации, заключающийся в предельно допустимом повышении температуры впрыскиваемой в форму сырой резиновой смеси за счет повышения давления литья и, как следствие, скоростей и напряжений сдвига в смеси. Так, в компании REP был разработан и изготовлен узел впрыска с давлением литья вплоть до 3000 бар. Однако этот путь имеет и известные ограничения из-за опасности механического разрушения впрыскиваемой смеси и негативного влияния на прочность и долговечность РТИ.

Далее, с целью кардинального решения поставленной задачи, были более глубоко проанализированы характерные для литья под давлением факторы, влияющие на время вулканизации сырых резиновых смесей.

3. Факторы, влияющие на время вулканизации

3.1. Закономерности ламинарного течения

Анализ ламинарного течения материала в процессе литья под давлением показывает, что скорости течения и напряжения сдвига в смеси сильно отличаются (рис. 2), и самыми нагретыми оказываются внешние слои, в которых наблюдаются максимальные градиенты скоростей течения по толщине потока (иначе – скорости сдвига) и, как следствие, наибольшие напряжения сдвига и в которых наиболее интенсивно происходит превращение механической энергии

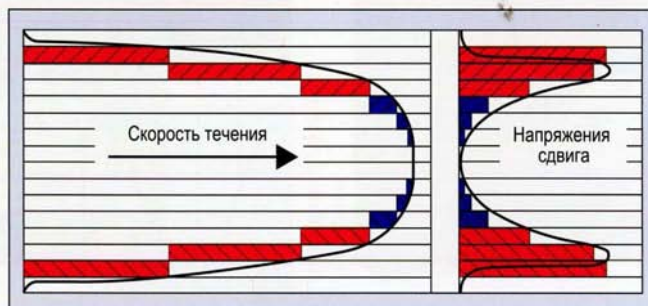


Рис. 2. Характерные эпюры скоростей и напряжений сдвига в потоке сырой резиновой смеси при ее ламинарном течении в каналах литьевой формы (красным цветом показаны более нагретые слои потока, синим цветом – менее нагретые)

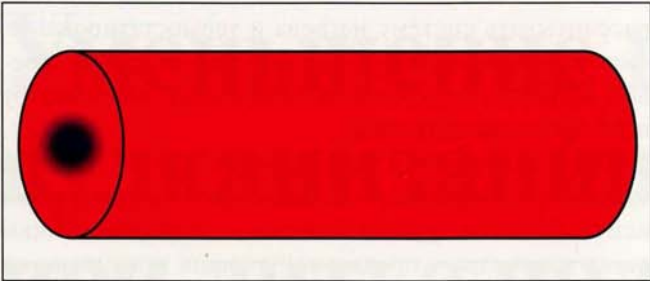


Рис. 3. Характерная термограмма цилиндрического потока резиновой смеси (красным цветом показаны более нагретые слои потока, синим цветом – менее нагретые)

сил внутреннего трения в тепловую энергию. Кроме того, за счет теплопроводности к этим слоям подводится и дополнительное тепло от нагретых стенок каналов и оформляющих гнезд. Именно эти слои потока смеси ограничивают возможности повышения давления и соответственно скорости впрыска смеси из-за опасности разрушения потока и преждевременного начала вулканизации. Вместе с тем в том же потоке имеются и внутренние слои, которые менее нагреты из-за меньших напряжений сдвига (рис. 3) и которые, в конечном счете, лимитируют требуемое время вулканизации сырой резиновой смеси.

Следует заметить при этом, что на практике самые внешние слои потока смеси, касающиеся стенок каналов или формы, имеют, как правило, меньшую температуру, чем у прилегающих к ним и находящихся чуть ближе к центру потока слоев (см. рис. 2), поскольку самые внешние слои находятся в непосредственном контакте со стенками, имеющими вполне определенную заданную температуру, которая может быть и меньше, чем температуры внутри потока.

Далее, при ламинарном течении смеси, которое наблюдается при литье под давлением РТИ, практически отсутствует перемешивание слоев и, следовательно, отсутствует возможность конвективного теплообмена между ними, что ведет к увеличению неравномерности распределения температуры в потоке по мере его

течения в форме. Так, результаты термометрирования показали, что, например, максимальный перепад температур по толщине потока резиновой смеси марки NBR 75 Sh при ее течении в цилиндрическом канале диаметром 8 мм и длиной 250 мм при определенной скорости впрыска может увеличиться с 10 до 51 °С (рис. 4).

Таким образом, главной проблемой на пути уменьшения времени вулканизации является перепад температур в слоях потока резиновой смеси, наименьшей из которых соответствует и наименьшая скорость вулканизации, а следовательно, и наибольшее время, требующееся для этого процесса.

3.2. Гнездность литьевой формы

Неравномерность распределения температуры по сечению потоков резиновой смеси в разводящих каналах многогнездных форм приводит к тому, что внешние, более нагретые слои потоков заполняют в основном ближние (по отношению к центральному литнику) гнезда, а менее нагретые слои – удаленные гнезда (рис. 5). Причем это наблюдается даже при одинаковой температуре всех гнезд и одинаковой длине разводящих каналов. Кроме того, пониженная температура смеси обуславливает ее более высокую вязкость, что ведет к более медленному заполнению гнезда. С этим явлением, заключающимся в неравномерности температуры и вязкости смеси при заполнении ею различных гнезд многогнездных форм, знаком практически каждый специалист по переработке резин литьем под давлением. Частичным, но не кардинальным, решением этой проблемы может быть балансировка разводящей литниковой системы за счет изменения размеров отдельных литниковых каналов. Но, например, попытка повысить температуру центральных слоев потока путем дальнейшего увеличения напряжений сдвига – за счет сужения литниковых каналов и (или) за счет увеличения давления и скорости впрыска – обязательно будет связана с опасностью перегрева внешних слоев

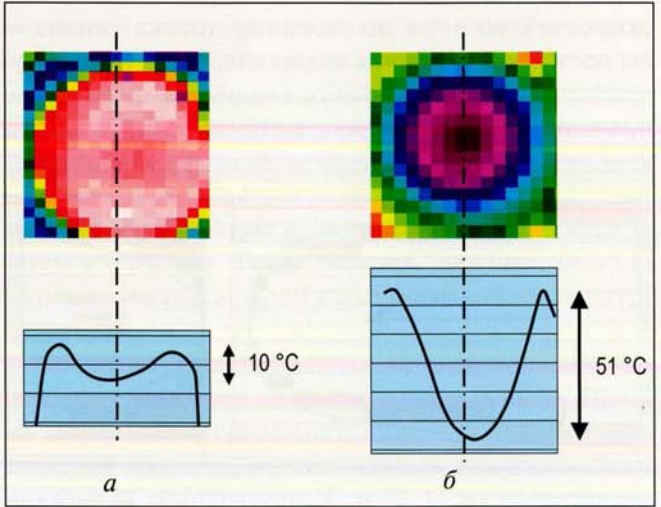


Рис. 4. Распределение температуры по сечению потока резиновой смеси марки NBR 75 Sh на входе (а) и в конце (б) цилиндрического канала диаметром 8 мм и длиной 250 мм

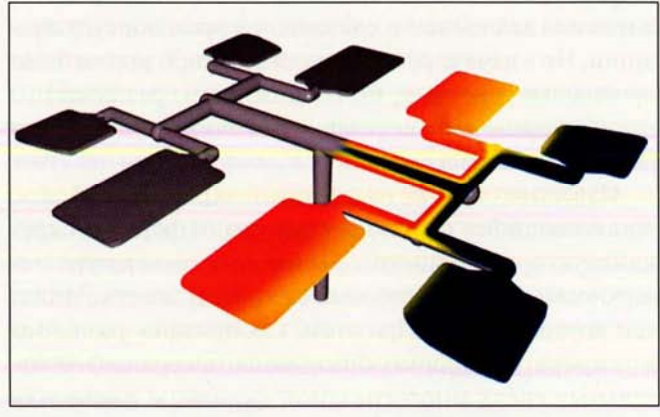


Рис. 5. Типичное распределение температуры по отливкам РТИ в различных гнездах многогнездной литьевой формы (оранжевый цвет соответствует наибольшей температуре, синий – наименьшей; распределение температуры в левых четырех отливках условно не показано из-за симметричности расположения гнезд)

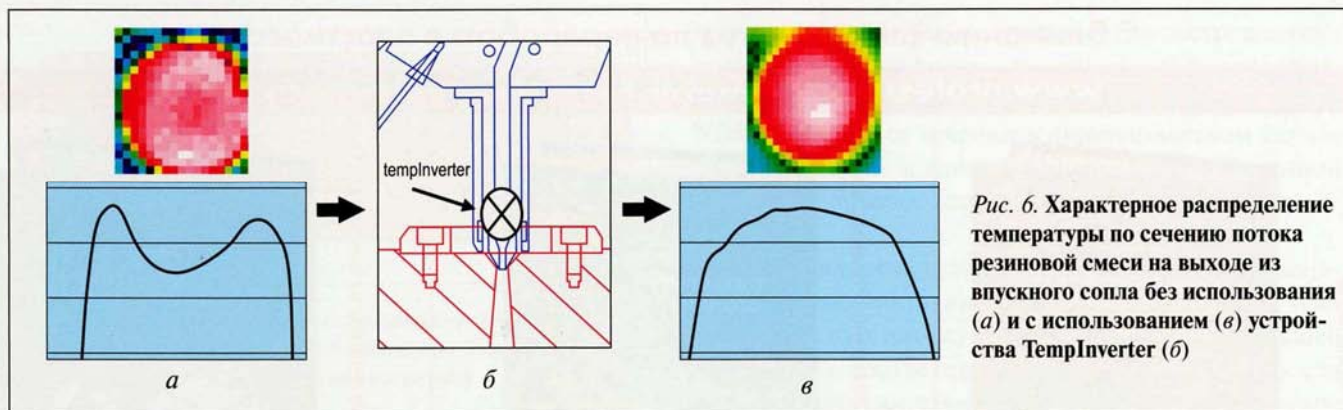


Рис. 6. Характерное распределение температуры по сечению потока резиновой смеси на выходе из впускного сопла без использования (а) и с использованием (в) устройства TempInverter (б)

потока, температура которых не должна превышать допустимого уровня.

Получается, что длительность четвертой стадии литья под давлением (см. рис. 1) в многогнездных формах

должна определяться временем вулканизации наименее нагретых отливок, хотя оно будет избыточным по отношению к другим, более нагретым отливкам в других гнездах.

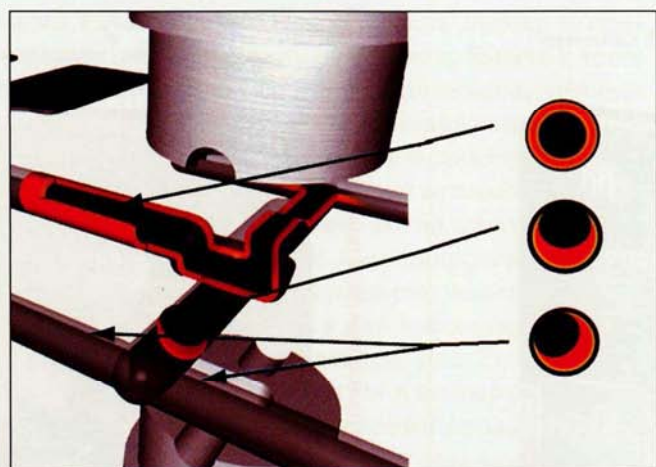


Рис. 7. Типичное асимметричное (две нижние термограммы) распределение температуры в сечении потока резиновой смеси, движущегося по литниковым каналам, и симметричное (верхняя термограмма) – при использовании модуля FillBalancer

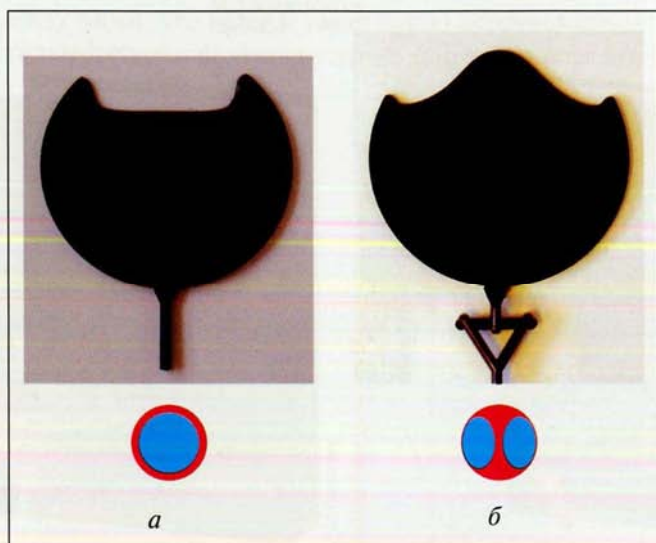


Рис. 8. Характерное распределение температуры по сечению потока во впускном литниковом канале (внизу) и внешний вид резиновой смеси в один из моментов заполнения ею оформляющего гнезда (вверху) без использования (а) и с использованием (б) устройства FillBalancer Max

4. Система TurboCure – комплексное решение проблемы

Комплексное конструкторско-технологическое решение описанной выше проблемы, разработанное фирмой REP-Deutschland GmbH и названное TurboCure, включает в себя три модуля, названные TempInverter (расположен в узле впрыска), FillBalancer (на разводящих каналах) и FillBalancerMax (перед входом в оформляющее гнездо).

TempInverter. Устройство TempInverter находится в конце сопла материального цилиндра узла впрыска (рис. 6, б) и предназначено для некоторого выравнивания (см. рис. 6, в) неравномерного профиля температуры, который уже формируется в потоке во время его течения по каналу сопла (см. рис. 6, а). Это достигается за счет перенаправления внешних, более нагретых, слоев в центральную, менее нагретую, зону потока и наоборот. Только за счет этого мероприятия можно поднять на 10 °С температуру внутри потока, выходящего из сопла, и несколько снизить общее время вулканизации смеси. Заявка на патент на устройство TempInverter находится в стадии рассмотрения.

FillBalancer. Из-за неравномерности распределения температуры в сечении потока появляется нежелательная асимметрия температурного поля, возникающая в потоке после поворота в разводящих литниковых каналах (рис. 7), следствием чего, в свою очередь, становятся не одинаковые по температуре и вязкости смеси условия заполнения различных гнезд (см. рис. 5). Для исправления этого недостатка предназначен модуль FillBalancer, который выравнивает температуры и массы потоков по гнездам. Выравнивание (балансировка) температурного поля в каждом впускном канале в каждое гнездо создает предпосылки для одинаковых условий вулканизации смеси во всех гнездах и, тем самым, дополнительно способствует снижению времени вулканизации.

Помимо фактора температуры, важное значение не только для сокращения времени вулканизации резиновой смеси, но и для качества РТИ имеет реология

течения потока. Так, при неравномерном заполнении гнезд повышается давление на смесь в уже заполненных гнездах, следствием чего может быть образование грата в местах разъема формы, а в еще не заполненных гнездах продолжается течение смеси с пониженным давлением, что может привести к недоливам в РТИ и некачественному схватыванию смеси с закладными элементами. И в том, и в другом случае может потребоваться регулярная затратная очистка формы. Использование модуля FillBalancer позволяет одновременно решить и проблему равномерного заполнения всех гнезд.

Следует заметить, что данный конструкторско-технологический принцип управления потоком вязкой жидкости известен из опыта литья под давлением термопластов, где управляющий модуль имеет торговое название MeltFlipper и запатентован фирмой Beaumont Technology Inc. (BTI). Ее партнером является компания REP, которая имеет лицензионное право на использование этого принципа в технологии литья РТИ и специалисты которой имеют достаточно знаний и опыта для расчета конструкции модуля FillBalancer в зависимости от конструкции и гнездности формы, формы и длины литниковых каналов.

FillBalancer Max. Модуль FillBalancer Max (запатентован той же, упомянутой выше, фирмой BTI) устанавливается в конце впускного канала в оформляющее гнездо и предназначен для перенаправления более

нагретой смеси, расположенной во внешних слоях потока, в наиболее критичные области гнезда, например, в его центральную часть (рис. 8), в которую обычно поступает менее нагретая смесь, требующая большего времени вулканизации. Данное мероприятие позволяет не только сократить время цикла, но и предотвратить возможность образования дефектов в виде, например, холодных спаев из-за неравномерного заполнения смесью оформляющего гнезда (см. рис. 8, а).

5. Примеры практического применения элементов TurboCure

Ниже приведены примеры практического применения элементов системы TurboCure при изготовлении

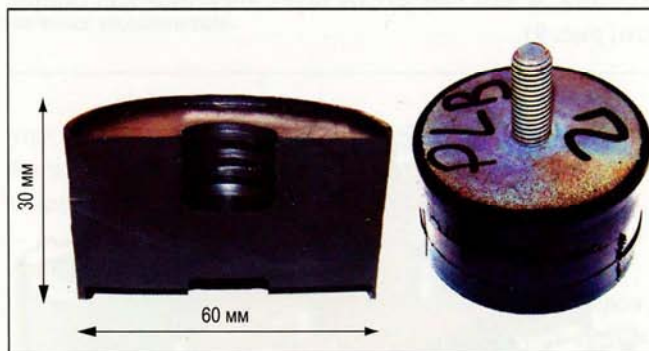


Рис. 9. Резиновая опора, изготовленная литьем под давлением с применением системы TurboCure

некоторых РТИ (опора, втулка и кабельная насадка) и достигаемого при этом технико-экономического эффекта.

Опора. Данное изделие (рис. 9) изготавливается из резиновой смеси марки 50 Sh A на основе натурального каучука в 8-гнездной форме при ее температуре, равной 187 °С.

Исходное время вулканизации резиновой смеси составляло 285 с. Применение же модуля TempInverter позволило уменьшить его до 205 с (т.е. экономия времени составила 28 %), в совокупности с модулем FillBalancer – до 170 с (40 %), а при дополнительном использовании модуля FillBalancer Max – до 140 с (51 %). При этом было достигнуто высокое качество изделия, о чем свидетельствует внешний вид опоры (см. рис. 9).

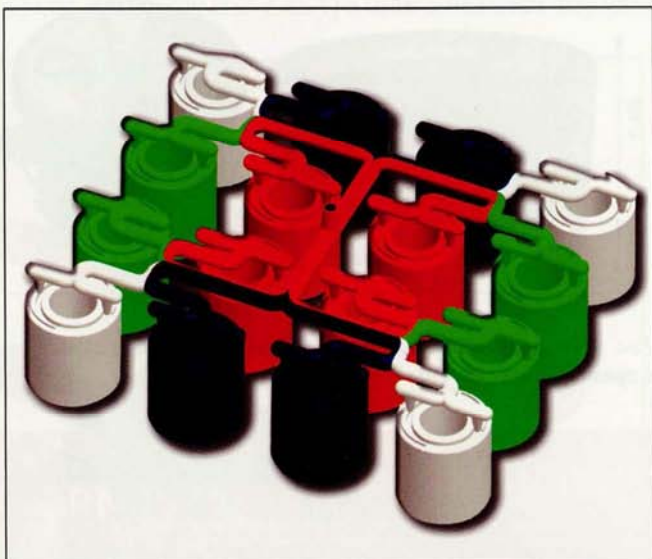


Рис. 10. Резиновые втулки, изготавливаемые в 16-гнездной литьевой форме (разные цвета соответствуют 4 характерным группам потоков с различной температурой)

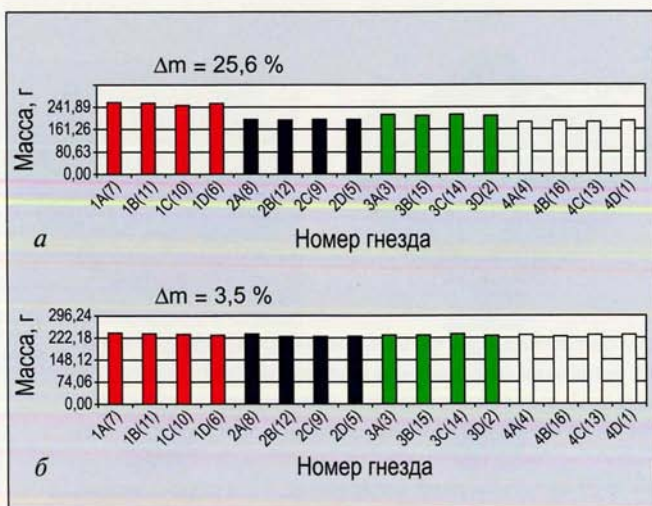


Рис. 11. Масса резиновых втулок, изготовленных в 16-гнездной форме без использования (а) и с использованием (б) устройства FillBalancer (Δm – разброс по массе втулок, отформованных в различных гнездах; цвет столбиков на рисунке указывает на принадлежность соответствующего изделия к группе изделий того же цвета на рис. 10)

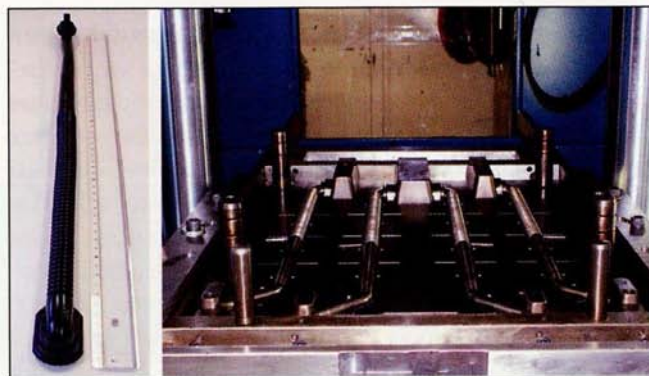


Рис. 12. Кабельная резиновая насадка (слева), изготовленная в форме с применением модуля TempInverter (справа)

Втулка. В данном случае применение модуля FillBalancer позволило на 42 % (с 510 до 300 с) сократить время вулканизации резиновой смеси на основе натурального каучука при одновременном изготовлении 16 резиновых опор (рис. 10) в многогнездной форме на вертикальной литьевой машине марки V68 / 400 Т. Кроме того, разброс по массе втулок, отформованных в различных гнездах, был снижен с 25,6 до 3,5 %.

Кабельная насадка. Данный пример иллюстрирует эффект от применения модуля TempInverter при изготовлении кабельных резиновых насадок из смеси марки EPDM 50 ShA (рис. 12) в 4-гнездной форме на вертикальной литьевой машине модели V59 / 260 Т: время вулканизации было снижено на 40 % (со 100 до 60 с).

Заключение

Описанные в работе элементы системы TurboCure – модули TempInverter, FillBalancer и FillBalancerMax – могут быть использованы по отдельности или в совокупности и предназначены, в первую очередь, для сокращения времени вулканизации резиновых смесей при литье под давлением РТИ (в некоторых случаях более чем на 50 %) и, тем самым, для повышения производительности процесса. Важно заметить при этом, что осуществляемая с их помощью оптимизация движения и перераспределения более и менее нагретых потоков резиновой смеси в каналах и оформляющих гнездах литьевых форм не связана с потреблением дополнительной тепловой энергии и, как показывает практика, способствует также снижению потерь давления, повышению стабильности свойств РТИ и их качества в целом.

Перевод В. А. Гончаренко

Reducing of rubber vulcanisation time by injection molding process

J. Sauer

This article aims at analyzing the rubber injection molding process and highlighting the limits that prevent vulcanisation time from being reduced. Afterwards some solutions will be proposed to overcome these limits and some industrial applications will be presented with values of improvement.