

Под воспроизводимостью результатов к.-л. процесса производства продукции понимают его характеристику, определяемую близостью свойств изделий при их повторном изготовлении. В идеальном случае эти свойства от цикла к циклу должны быть идентичными. При литье под давлением – как и при других технологиях изготовления продукции – воспроизводимость имеет очень важное значение, так как решающим образом влияет на технико-экономическую эффективность производства. По этой причине зачастую возникает необходимость предварительной оценки производственных установок или их узлов на ранней стадии на предмет возможности обеспечения воспроизводимого технологического процесса. А вот как это сделать?



Воспроизводимость технологического процесса далеко не всегда является постоянной величиной (все иллюстрации: ENGEL)

# Насколько воспроизводима воспроизводимость

Й. Гиссауф, К. Майер, ENGEL Austria GmbH (г. Швертберг, Австрия)

Высокая воспроизводимость на протяжении длительного времени в общем и целом предполагает высокую устойчивость к воздействию внезапно или постепенно изменяющихся возмущающих факторов. Такими возмущающими факторами могут быть колебания условий окружающей среды, износ машин и форм или изменения свойств перерабатываемых материалов, особенно при смене партий.

Но кто может знать, какие именно возмущающие факторы в ходе технологического процесса могут стать значимыми и заслуживающими внимания? В какой степени они проявят себя и – самое главное – насколько сильное влияние окажут на качество изготавливаемых изделий? На практике подобные сценарии перспективного развития ситуации зачастую оставляют без внимания, ограничиваясь лишь оценкой фактической стабильности повторяемости, причем даже и это при ближайшем рассмотрении оказывается не таким простым делом.

## Сравнение со стандартным отклонением и разбросом значений

Для быстрой оценки воспроизводимости, как правило, измеряются массы впрыска при выпол-

нении нескольких последовательных циклов литья под давлением (рис. 1). Полученные значения служат основой для вычисления стандартного отклонения  $\sigma$  и разброса значений показателей, как разности ( $\max - \min$ ) между максимальным и минимальным значениями (в русскоязычной литературе эти статистические параметры распределения случайной величины называют соответственно средним квадратическим отклонением и размахом. – Прим. ред.). Оба параметра часто выражают в процентах к сред-

нему арифметическому значению массы впрыска – это позволяет более объективно выполнять сравнение опытных значений (эти параметры в русскоязычной литературе называют соответственно коэффициентом вариации и относительным размахом. – Прим. ред.).

Диапазон разброса значений считается вполне удовлетворительным, если он не превышает 0,1 % средней массы изделия. Недостаток такого подхода состоит в том, что диапазон разброса определяется только по двум измеренным

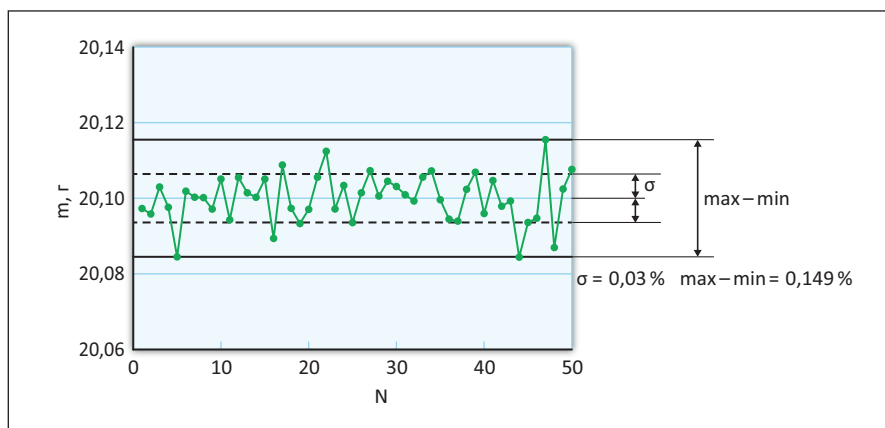


Рис. 1. Изменение массы впрыска ( $m$ ), стандартного отклонения ( $\sigma$ ) и разброса значений  $m$  ( $\max - \min$ ) при 50 последовательных циклах литья под давлением – статистические параметры, которые обычно используются как исходные данные для быстрой оценки воспроизводимости процесса литья по критерию  $m$  ( $N$  – порядковый номер цикла)

значениям – максимальному (max) и минимальному (min). Промежуточные значения при этом не учитываются. На этот небольшой недостаток можно было бы не обращать внимания, так как при проведении кратковременного теста на воспроизводимость – например, путем анализа 50 циклов литья под давлением – скрытым в действительности остается и многое другое, но об этом несколько позже.

В последнем десятилетии исследований, направленные на изучение технических возможностей оборудования и технологических процессов, получают все более широкое распространение. При определенных граничных условиях отбирается некоторое количество изделий и выполняется оценка показателя качества, наиболее важного для последующего функционирования изделия. Этот показатель может быть, например, критичным размером изделия. По результатам измерений – при условии их нормального распределения – вычисляется вышеупомянутое стандартное отклонение. На основании этого стандартного отклонения и допусков для рассматриваемого показателя рассчитывается индекс пригодности машины  $C_m$ , который показывает, сколько раз шестикратное стандартное отклонение (иначе – 6-сигмовый интервал) укладывается в предварительно заданное поле допуска (при нормальном распределении случайной величины, каковой являются все показатели каче-

ства продукции, вероятность нахождения ее текущего значения внутри 6-сигмового интервала составляет 0,997, т. е. практически равна единице. – *Прим. ред.*). В приведенном на рис. 2 примере 6-сигмовый интервал иллюстрируют шесть расположенных одна над другой двойных стрелок внутри желтого прямоугольника. Как можно видеть, желтый прямоугольник примерно 2,3 раза укладывается в пространстве между верхней и нижней границами поля допуска. Как правило, значение  $C_m$  должно быть больше 1,67.

Нижний индекс пригодности машины  $C_{m,u}$  показывает, сколько раз трехкратное стандартное отклонение укладывается в диапазон между требуемым значением и нижней границей поля допуска. Аналогичным образом верхний индекс пригодности машины  $C_{m,o}$  показывает, сколько раз трехкратное стандартное отклонение укладывается в диапазон между требуемым значением и верхней границей поля допуска. В приведенном примере трехкратное стандартное отклонение иллюстрируют три расположенных одна над другой двойных стрелки внутри оранжевого прямоугольника. Из рис. 2 видно, что оранжевый прямоугольник примерно 3 раза укладывается в диапазоне между нижней границей поля допуска и средним значением, но только 1,59 раза – между средним значением и верхней границей поля допуска.

Таким образом, параметры  $C_{m,u}$  и  $C_{m,o}$  описывают расположение ре-

зультатов измерений в пределах границ допусков. Чем больше индекс, тем в большей степени результаты измерений удалены от соответствующей границы поля допуска. Малое значение индекса указывает на наличие проблемы. По этой причине именно меньший по величине из двух индексов  $C_{m,u}$  и  $C_{m,o}$  рассматривается как критический индекс пригодности машины  $C_{m,k}$ . В описанном выше примере (см. рис. 2) критическим является индекс  $C_{m,o}$ . В отношении критического индекса также часто применяется сформулированное выше требование: он должен быть больше 1,67. В то время как разброс результатов измерений, характеризуемый индексом  $C_m = 2,3$ , отвечает данному требованию, значение индекса  $C_{m,o}$ , равное 1,59, является слишком низким – результаты измерений располагаются слишком близко от верхнего предельного значения. В этом случае следует попытаться путем регулирования настроечных параметров повлиять на усадку изделия с таким расчетом, чтобы несколько уменьшить его длину. Если это не удастся, то остается лишь соответствующим образом изменить геометрические характеристики литьевой формы.

#### **«Подводные камни» оценки воспроизводимости**

При проведении теста на воспроизводимость специалисты по литью под давлением определяют, по меньшей мере, один из вы-

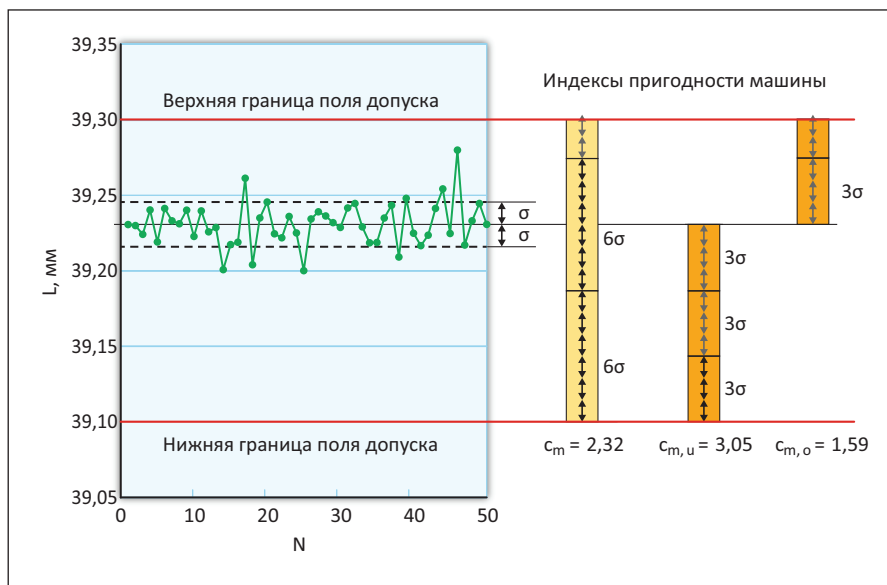


Рис. 2. По результатам измерения длины ( $L$ ) изделий, изготовленных в ходе 50 последовательных циклов литья под давлением, и соответствующего стандартного отклонения (показано в виде сдвоенных стрелок) можно рассчитать индексы пригодности машины ( $C_m$ ,  $C_{m,u}$  и  $C_{m,o}$ ):  $N$  – порядковый номер цикла

шеупомянутых численных показателей. Это позволяет оценить технологический процесс или – правильнее сказать – его текущее состояние. Практика показывает, что результаты одного теста на воспроизводимость часто не выдерживают более тщательной перепроверки. Причиной этого является большое количество источников возможных ошибок; ниже описаны те из них, которые проявляют себя особенно часто.

Первая ошибка появляется при так называемых испытаниях «на скорость», когда сотрудники предприятия в конце рабочего дня при-

нимают решение о быстром отборе 50 дополнительных образцов при последовательных впрысках с целью их дальнейшего исследования. Часто в этих случаях замечают слишком поздно – когда уже измерены значения массы впрыска – или вообще не замечают (в наихудшей ситуации), что технологический процесс к моменту извлечения изделий еще не до конца стабилизировался. Поэтому перед тестом на воспроизводимость необходимо всегда проверить, достиг ли технологический процесс стадии стабильного протекания (см. практические рекомендации № 1).

### Измерения с нарушениями

Следующий случай связан со взвешиванием. Многие полагают, что успешное пользование весами на кухне или в ванной комнате уже само по себе является свидетельством достаточной квалификации для определения массы изделий при проведении теста на воспроизводимость. Какое заблуждение! Как и любые другие измерения, взвешивание требует определенной квалификации. Это означает, что необходимо обеспечить работоспособность измерительного средства и исключить воздействие, например, сквозняков. Взвешивания целесообразно проводить не в производственном помещении, а в лаборатории, причем взвешиваемые изделия не должны выступать за края чаши весов.

Необходимо также иметь в виду, что различное время хранения изделий после их извлечения из формы из-за разного количества поглощенной этими изделиями влаги может привести к искажению результатов взвешивания, как и наличие электростатических зарядов на изделиях. Последнее обстоятельство известно далеко не всем. Поэтому рекомендуется снять электрические заряды с изделий с помощью ионизированного воздуха.

### Неоптимальные настройки

Можно предполагать, что тот, кто учтет все вышеизложенное, сможет получить корректные результаты



### Практические рекомендации № 1.

#### Является ли технологический процесс стабилизовавшимся?

В большинстве случаев бывает очень непросто ответить на вопрос, является ли технологический процесс полностью стабилизовавшимся (установившимся) или нет. Для уверенного ответа необходимо проследить за изменением нескольких параметров от цикла к циклу на протяжении достаточно длительного времени. Современная система управления машиной CC300 компании ENGEL обеспечивает возможность графического представления параметров технологического процесса и позволяет с одного взгляда оценить состояние процесса и тенденции в изменении этих параметров на экране дисплея. Таким образом, полностью уходит в прошлое необходимость выявления изменений путем сравнения бесконечных колонок чисел.

Анализ параметров настройки машины или технологических параметров позволяет легко определить, является процесс стабилизовавшимся или нет. Как видно из рис. 3, технологические параметры – объем впрыска  $V$  (см. рис. 3, а), вязкость  $\eta$  (см. рис. 3, б) и время дозирования  $t_{\text{доз}}$  (см. рис. 3, в) – стабилизируются уже через несколько циклов после пуска машины.

При наличии перепада температур  $\Delta T$  охлаждающей воды между входящим в литьевую форму потоком и выходящим из нее можно заметить, что стабилизация режимов работы обоих термостатирующих контуров достигается в разное время (см. рис. 3, д, е). Такое различие можно объяснить тем, что эти термостатирующие контуры «обслуживают» разные части литьевой формы. Чем больше термостатируемая масса, тем более продолжительное время требуется для стабилизации перепада температур.

На машинах с коленно-рычажными механизмами смыкания формы пиковое значение усилия смыкания  $F_{\text{см. max}}$  изменяется до момента достижения литьевой формой ее рабочей температуры, что обусловлено тепловым расширением (см. рис. 3, г). Поэтому именно данный параметр в наилучшей степени подходит для определения момента оптимального прогрева литьевой формы.

В тех случаях, когда шести графиков оказывается недостаточно или в ходе технологического процесса появляется необходимость исследования и графического отображения какого-либо другого параметра в протоколе данных этого процесса, оператору достаточно лишь коснуться колонки соответствующего параметра. С помощью полученного таким образом графика можно, например, увидеть, что для стабилизации температуры в зоне материального цилиндра требуется не меньше шести циклов (рис. 4).

или – если выражаться точнее – правильные результаты для существующих граничных условий. Одним из важных граничных условий является рабочая точка, под которой понимают совокупность всех настроек, выбранных пользователем. Выражаясь более простым языком, можно сказать, что воспроизводимость зависит от настроек. Некоторое снижение температуры литьевой формы или увеличение скорости впрыска может привести к изменению воспроизводимости как во время относительно короткого периода проведения измерений, так и (причем, скорее всего, в большей степени) в рамках более длительного интервала времени.

В практической работе очень редко удается при оптимизации технологического процесса одновременно обеспечить его высокую стабильность и, как следствие, воспроизводимость. Зачастую бывает достаточно проведение оптимизации в соответствии с общими правилами технологии литья под давлением. В качестве примеров можно указать на два существенных признака, характеризующих качество настроек процесса:

- первое: соответствует ли режим работы привода узла впрыска выбранному графику изменения скорости впрыска? Это условие может не выполняться, например, в случае достижения предельного значения давления впрыска, установленного для защиты литьевой формы;
- второе: остается ли неизменным от впрыска к впрыску по своей прин-

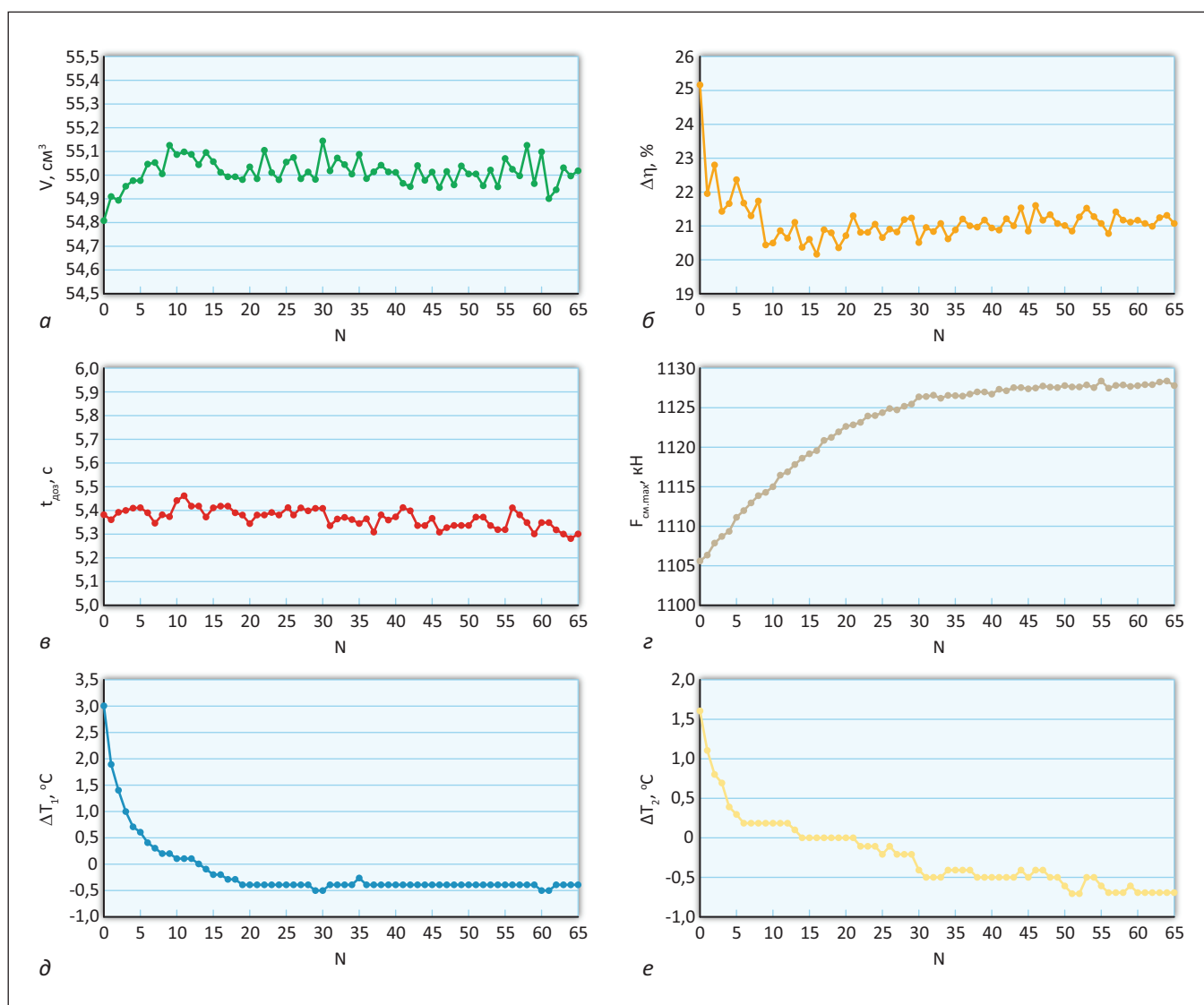


Рис. 3. Для того чтобы сделать уверенное заключение о том, является ли процесс стабилизировавшимся, необходимо проследить за изменением нескольких параметров от цикла к циклу. Результаты соответствующих измерений система управления литьевой машины СС300 позволяет выводить в графической форме (другие пояснения см. в тексте практических рекомендаций № 1):  $V$  – объем впрыска;  $N$  – порядковый номер цикла;  $\Delta\eta$  – изменение вязкости расплава;  $t_{\text{доз}}$  – время дозирования;  $F_{\text{сж.мах}}$  – пиковое значение усилия смыкания;  $\Delta T_1$  и  $\Delta T_2$  – перепад температур на входе и выходе первого и второго контуров охлаждения литьевой формы соответственно

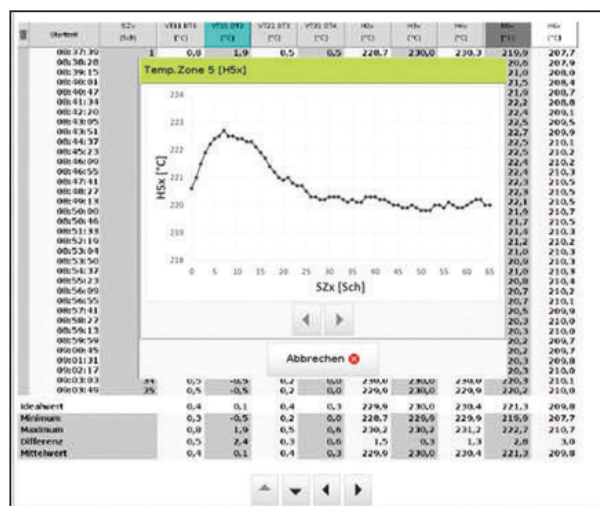


Рис. 4. По данным протокола испытаний в любой момент времени можно построить соответствующий график

ципальной форме график изменения давления впрыска? Это условие может не выполняться в тех случаях, когда, например, образующиеся в сопле холодные пробки определяют колебания давления впрыска на начальной стадии этого процесса.

Современные системы управления машинами – такие как система CC300 компании ENGEL Austria GmbH – помогают в практической работе найти ответы на сформулированные выше вопросы и тем самым обеспечить наилучшие условия для стабильного протекания процесса литья под давлением (см. практические рекомендации № 2).

### Тест на воспроизводимость с использованием данных технологического процесса

Измерения являются достаточно трудоемким делом, связанным

с затратами времени и средств. Почему бы в таком случае не использовать для предварительной оценки воспроизводимости параметры технологического процесса, т. е. фактические параметры настройки машины. Не свидетельствуют ли в достаточной степени о качестве машины наличие равномерной подушки расплава и стабильное время дозирования? Насколько удобным мог бы быть такой подход! При этом отпадает необходимость в выстраивании зависимостей с показателями качества формованных изделий. Особую сложность представляет собой вычисление индекса пригодности машины на основе параметров технологического процесса. Для этого необходимо располагать, как уже отмечалось выше, границами поля допуска. Однако эти границы для технологических парамет-

тров невозможно найти ни на одном чертеже изделия. Ниже этот вопрос рассматривается более детально.

### Свободное обращение с границами поля допуска

«Самым простым способом повышения реализуемости конкретного технологического процесса является раздвигание границ поля допуска: чем больше разница между верхней и нижней границами поля допуска, тем большее число раз укладывается в этом диапазоне стандартное отклонение». Эту формулировку из википедии [1] не следует воспринимать как основание для самообмана. Получается, что если границы поля допуска установлены произвольно, а желаемое качество изготавливаемых на машине изделий не обеспечивается, то границы поля допуска следует пересмотреть. Нет необходимости подчеркивать, что такой подход является абсолютно бессмысленным.

### Вспомогательные системы для управления технологическим процессом

Кто изучил описанные выше «подводные камни», сможет впредь избегать их и получать в результате измерений более обоснованные оценки воспроизводимости, по меньшей мере, на данный текущий момент времени. Но в самом начале данной статьи уже подчеркивалось, что практически невозможно предсказать, какие возмущающие

## Практические рекомендации № 2.

## Вывод фактических значений на график заданных значений

В протоколе технологического процесса и на соответствующих графиках отображается одно значение для каждого цикла. Такие данные не несут никакой информации об изменениях отображаемого параметра в процессе выполнения цикла литья под давлением. Однако оператор может наряду с графиком изменения, например, заданной скорости впрыска построить также кривые изменения фактических значений скорости и давления впрыска (рис. 5). Это позволяет без осложнений проверить, соответствует ли – и если «да», то в какой степени – режим работы привода узла впрыска настроенной скорости впрыска. В дополнение к этому можно проследить изменение давления впрыска и изучить возможные его резкие колебания, например, пиковые значения давления впрыска во время впрыска, обусловленные холодными пробками, на начальных участках кривых давления и т. п.

Кривую фактических значений, выведенную на график изменения заданного значения, следует читать справа налево. Ее можно разделить на три зоны (см. рис. 5). Темно-серая зона *a* соответствует периоду декомпрессии. Светло-серая зона *b* отражает стадию впрыска с регулируемой скоростью. Переход между зонами *b* и *c* соответствует моменту переключения, а зона *c* – части цикла процесса литья под давлением с регулированием давления. Представленные на рис. 5 кривые показывают, что режим работы привода узла впрыска соответствует заданному закону изменения скорости впрыска и не приводит во время выполнения впрыска к негативным отклонениям, например, к появлению пиковых значений давления.

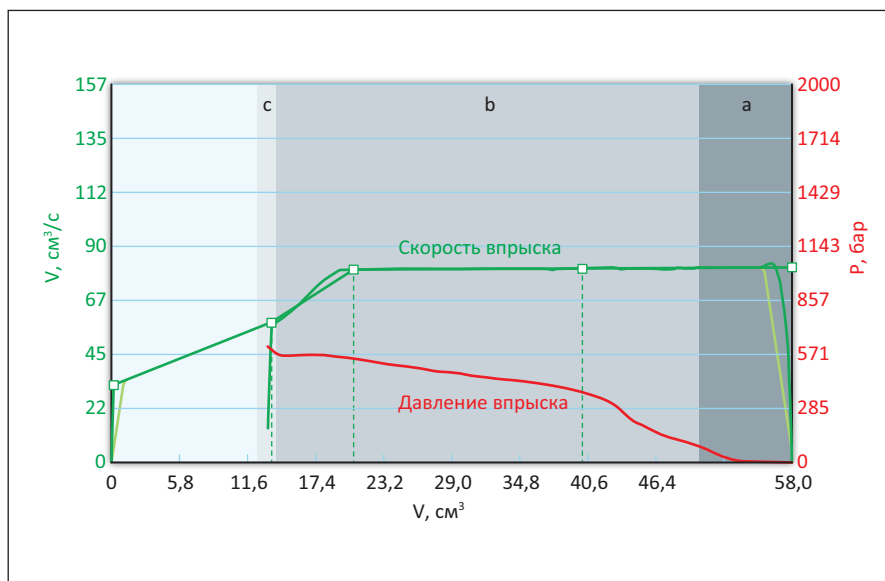


Рис. 5. Вывод графиков изменения фактических данных позволяет без осложнений проверить, соответствует ли режим работы привода узла впрыска настроенной скорости впрыска (другие пояснения см. в тексте практических рекомендаций № 2): *v* – скорость впрыска; *V* – объем впрыскиваемого расплава; *P* – давление впрыска

факторы и в какой степени изменятся в будущем и как они повлияют на качество изготавливаемых изделий и воспроизводимость технологического процесса.

Решение этой проблемы представляет интеллектуальная вспомогательная система управления технологическим процессом iQ weight control, разработанная компанией

ENGEL: управляющий модуль создает контур регулирования, который учитывает известные параметры стадий впрыска и подпитки. В случае изменения возмущающих факторов параметры впрыска, момент переключения и давление подпитки корректируются в режиме реального времени, т. е. при выполнении текущего цикла ли-

тья под давлением. Благодаря этому масса впрыска остается неизменной [2]. Соответствующий пакет программного обеспечения является составной частью программы inject 4.0, с помощью которой компания ENGEL открывает своим клиентам возможности для создания «умного» предприятия.

Если при кратковременных испытаниях была установлена недостаточная воспроизводимость технологического процесса, то описанное программное обеспечение может обеспечить моментальное улучшение получаемых результатов. Если же кратковременные испытания, напротив, показали очень хорошую воспроизводимость, то в первое время после начала использования программного продукта дополнительное улучшение может и не проводиться. Однако система iQ weight control непрерывно контролирует воспроизводимость объема впрыска и осуществляет надежную корректировку процесса в случае появления каких-либо изменений. Таким образом, эта система является гарантией того, что и в дальнейшем технологический процесс будет протекать стабильно. Основное преимущество такой гарантии – система не ожидает появления сообщений о нарушениях процесса для того, чтобы включиться в работу. Она активно выполняет свои функции еще до того, как появится брак.

## Литература

1. <https://de.wikipedia.org/wiki/Prozessfahigkeitsindex>, aufgerufen am 02.05.2016.
2. Pillwein G., Giessauf J., Steinbichler G. Einfaches Umschalten auf konstante Qualitaet // Kunststoffe 102 (2012) 9. S. 31–35.

Перевод А. П. Сергеевкова

## How Repeatable Is Repeatability

J. Giebauf, C. Maier

*Repeatability means the ability to produce parts that have identical properties to one another. As with other manufacturing processes, this capability is very important in injection moulding because it has a crucial influence on the efficiency. It is therefore often necessary to assess production systems or their components in advance according to whether they ensure a repeatable process. But how?* ■

## Надежные партнеры



## Надежный коллектив



## Надежное обеспечение



## Надежная поддержка

# ENGEL: **10 лет в России**

Австрийское качество, оперативный сервис

В 2016 году дочерняя компания ENGEL Austria GmbH – **ООО «ЭНГЕЛЬ»** – празднует свой **10-летний юбилей**. За это время нашим клиентам вместе с нами удалось реализовать множество интересных проектов в разных отраслях. Достижения ENGEL в России на сегодняшний день:

- более **1000** поставленных новых литьевых машин, среди которых:
  - более **800** бесколонных литьевых машин ENGEL victory;
  - более **150** больших двухплитных литьевых машин ENGEL duo;
  - более **50** полностью электрических литьевых машин различных серий;
- более **300** поставленных роботов различных серий.

Мы выражаем глубокую благодарность и признательность нашим заказчикам и надеемся на плодотворное многолетнее сотрудничество!