

Новая литьевая форма для измерения усилий и энергии извлечения изделий

Микроструктурированные полимерные изделия, изготавливаемые по технологии литья под давлением, находят все более широкое практическое применение, особенно, в медицинском секторе и в медико-биологической промышленности. При изготовлении таких прецизионных изделий приходится учитывать разнообразные специфические требования, начиная от полного заполнения микроканалов и заканчивая процессом извлечения из формы, который во многих случаях определяет принципиальную возможность производства бездефектных изделий. Протекание процесса извлечения изделий из формы определяется сложным взаимодействием ряда важных факторов, включая вид полимерного материала, характер оформляющей поверхности гнезда литьевой формы, геометрию изделия, а также параметры технологического процесса. В данной статье описана новая литьевая форма, специально разработанная для исследования и количественной оценки влияния перечисленных выше факторов на усилия и энергию извлечения изделий и представлены наиболее важные результаты измерений.

Т. Люцишин, д-р, К. Хольцер, д-р, Горный университет г. Леобена (Австрия)

Введение

В последние годы сильно выросло значение полимерных изделий с микроструктурированной поверхностью [1, 2]. Высокое отношение площади поверхности к объему подобных структур, а также уменьшенная площадь, занимаемая микроканалами или микроиглами, открывают многочисленные интересные возможности для практического применения. Микроструктурированные полимерные изделия часто используются в медицине или биологии, например, при изготовлении «лабораторий на чипе» (Lab-on-a-Chip) или «аналитических систем для микроанализа» (Micro-Total-Analytical-Systems) [1–3].

Как следует из приведенных названий, с помощью таких устройств можно проводить сложные биоанализы на маленьком чипе величиной с кредитную карточку и тем самым заменить целую лабораторию, что является важным преимуществом, так как позволяет успешно использовать подобные приборы даже в регионах с низким уровнем медицинского обеспечения, например, в развивающихся странах. Технология литья под давлением является наиболее предпочтительным способом производства таких сложных устройств, так как позволяет сделать их экономичными и широко доступными. Малые допуски на размеры изделий (прежде всего, на их микроструктурированные участки) в совокупности со строгими законодательными требованиями в отношении разрешенных для производства медицинского оборудования полимеров и, как следствие, ограниченный выбор исходных материалов

создают значительные трудности для изготовления подобных изделий в рамках традиционного процесса литья под давлением.

Среди прочих функциональных возможностей, которые могут быть обеспечены микроструктурированными поверхностями, следует отметить эффект самоочистки (эффект лотоса) [4] и антибликовый эффект, важный для оптических изделий [5].

1. Конструкция формы для проведения испытаний

Необходимым условием изготовления высокоточных литьевых изделий с микро- и наноструктурированными поверхностями является, конечно, полное заполнение гнезд литьевой формы. В этой части технологического процесса необходимо соблюдение ряда важных требований, что отражено в целой серии работ [6–10]. Зачастую при этом – как и при «обычном» литье под давлением – упускают из виду тот факт, что для получения качественного изделия недостаточно обеспечить оптимальное заполнение гнезда литьевой формы; изделие еще необходимо извлечь из формы без повреждений. Иногда случается так, что весь процесс литья под давлением протекает оптимальным образом, и «только» операция извлечения из формы – нет, что может приводить к браковке изделий.

В некоторых «драматических» случаях изделие после открывания литьевой формы оказывается не на той ее части и не может быть надежно извлечено, что для стабильного серийного производства продукции просто неприемлемо. В худшем случае структури-



рованная вставка литевой формы разрушается или успешно заполненные микроструктуры во время извлечения из формы деформируются или даже отрываются, что приводит к утрате функциональных свойств изделия. Процесс извлечения изделий из формы может быть оптимизирован с помощью ряда влияющих на него факторов, таких как вид исходного полимерного материала, геометрические параметры структуры или расположение элементов структуры, а также параметры технологического процесса. Более подробно роль отдельных влияющих факторов освещена в ряде работ [11–15], однако до сих пор не было проведено широкомасштабного исследования всех этих аспектов в максимально приближенных к реальности условиях.

Чтобы проанализировать влияние перечисленных выше факторов на процесс извлечения изделий из литевой формы, на кафедре переработки полимерных материалов Горного университета г. Леобена была создана оснащенная средствами измерений литевая форма, в которой можно в реальных производственных условиях измерять усилие и путь извлечения изделия из формы с последующим пересчетом в количество затрачиваемой при этом энергии (рис. 1) [16]. В дальнейшем получаемый результат можно использовать в качестве количественного показателя для оценки поведения изделия при извлечении из формы. На сопловой стороне находится носитель структуры, зафиксированный с помощью рамки и соединенный с предварительно нагруженным силоизмерителем. Во

время извлечения из формы изделие удерживается за счет небольшого поднутрения на стороне выталкивателя. При открывании литевой формы в результате разделения этого изделия и носителя структуры силоизмеритель разгружается, что позволяет измерять усилие, прикладываемое в процессе извлечения изделия. Одновременно с этим с помощью расположенного в плоскости разъема формы датчика пути измеряется перемещение при извлечении изделия. В качестве результата измерений получают в итоге кривую зависимости усилия от перемещения открывающей-

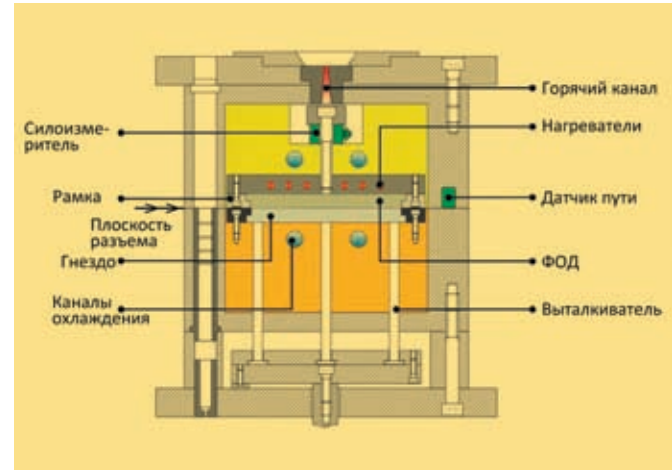


Рис. 1. Схема формы с устройством для измерения усилия извлечения изделия из формы: ФОД – формообразующая деталь-вставка с микроструктурированной поверхностью (все рисунки: авторы)

ся формы, на основании которой затем рассчитывается энергия извлечения изделия из формы. Особенно рассмотренной литевой формы является интегрированная в сопловую часть нагревательная система (схематично показана на рис.1), которая позволяет осуществлять вариотермическое термостатирование на стороне носителя структуры с целью улучшения процесса отделения микроструктуры и отслеживания влияния вариотермического протекания технологического процесса на извлечение изделия из формы.

Гнездо литевой формы в базовом исполнении имеет прямоугольную форму с габаритными размерами 75×25×1 мм, что соответствует обычному для медицинской техники формату предметного стекла. Эта базовая конфигурация может быть с помощью системы гибких вставок без осложнений заменена на сопоставимые по размерам гнезда иной геометрической формы.

Основным условием обеспечения воспроизводимых измерений и достаточно высокой разрешающей способности сигнала, соответствующего величине перемещения, является высокая точность движений литевой машины на начальной стадии процесса открывания литевой формы, которая может быть достигнута только благодаря относительно жесткой коленно-рычажной системе и высокой точности регулирования, характерной для полностью электрической литевой машины. По этой причине все эксперименты проводились на полностью электрической литевой машине модели Allrounder 470 A 1000-400 компании Arburg с усилием смыкания 1000 кН.

В базовом гнезде литевой формы использовались формообразующие детали-вставки (ФОД) с различными микроструктурами оформляющей поверхности, чтобы изучить влияние ориентации и расположения элементов структуры (вдоль или поперек направления течения расплава, вблизи или на удалении от впускного литника) на поведение изделия при его

извлечении из формы (рис. 2). Так называемые структуры Perflow (перпендикулярно направлению течения расплава) и Inflow (вдоль направления течения расплава) путем поворота вставки на 180° могли перемещаться в положение, близкое к местонахождению литника. Роль различных структур выполняли простые каналы с поперечным сечением прямоугольной формы. Еще одна структура, условно называемая Normal, имела продольно-поперечные каналы. Размеры поперечного сечения каналов и расстояние между соседними каналами составляли соответственно: для структуры типа Normal – 45×55 мкм и 300 мкм; для структур типов Perflow и Inflow – 100×50 мкм и 200 мкм.

2. Результаты эксперимента и их обсуждение

2.1. Вид полимера, поверхность гнезда и геометрические характеристики структуры

С целью исследования влияния вида исходного полимера при проведении экспериментов использовали частично кристаллический полипропилен (PP), два часто применяющихся в медицине аморфных термопласта – циклоолефиновый полимер (COP) и полиметилметакрилат (PMMA), а также циклоолефиновый сополимер (COC), смешанный с термопластичным эластомером (TPE). В дополнение к этому оба вида COP и смесь COC/TPE использовались не только по отдельности, но и в виде смесей с различным содержанием компонентов для целенаправленного регулирования упругих свойств исходных материалов и отслеживания их влияния на поведение изделий при извлечении из формы. Для этого были выбраны смеси на основе COP, содержащие 10 и 40% масс. COC/TPE.

Для сопоставления влияния геометрических параметров структуры для каждого вида материала были определены стандартные параметры технологического процесса, которые оставались неизменными при изготовлении изделий с разными структурами. Среди прочего в ходе экспериментов было отмечено высокое качество воспроизведения структур. Этот результат был в дальнейшем подвергнут перепроверке с применением метода конфокальной микроскопии на приборе FRT MicroProf (производитель – компания Fries Research & Technology GmbH, Германия), с тем чтобы получить возможность целенаправленного сравнения энергии, затрачиваемой на извлечение изделий из формы.

Результаты исследования различных видов полимеров позволили оценить воздействие главных влияющих факторов на процесс извлечения изделия из формы – усадки, теплового расширения и сжатия, модуля упругости, зависящего от температуры, а также поверхностной энергии. Различия между используемыми полимерами не могли быть исследованы при одной-единственной стандартной комбинации параметров настройки, так как процесс извлечения изделий из формы в значительной степени зависит от условий технологического процесса. При сравнении PP с COP и PMMA было установлено, что энергия извлечения изделий из формы в большей степени зависит от модуля упругости и в меньшей степе-

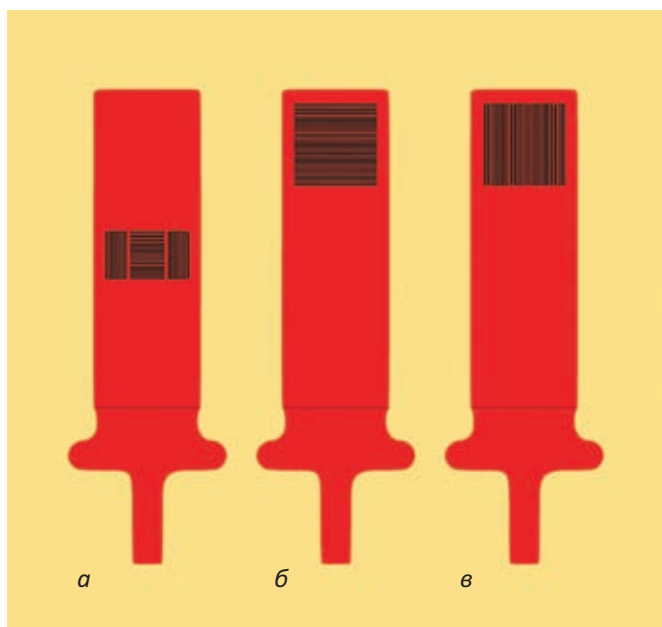


Рис. 2. Схематичное изображение различных микроструктур на поверхности литевых образцов: а – Normal; б – Perflow; в – Inflow (другие пояснения – в тексте)



ни – от особенностей усадки полимера. Несмотря на то что PP характеризуется более высокой усадкой (1,5–3 %), чем COP (0,1–0,3 %) или PMMA (0,2–0,6 %), значения энергии извлечения из формы для COP и PMMA оказались выше, чем в случае PP, по причине повышенной жесткости образцов из двух первых видов полимеров. Смеси с использованием TPE продемонстрировали противоположное поведение, так как эти материалы, особенно, при высоких тем-

пературах литевой формы проявляют склонность к прилипанию к стенкам ее гнезда.

В общем и целом вид полимера оказывает наиболее существенное влияние на процесс извлечения изделия из формы, а также на взаимодействие других факторов (литевой формы, геометрических характеристик структуры и параметров технологического процесса). Влияние полимеров – в виде усредненных значений из нескольких результатов – показано на рис. 3. При проведении этого анализа использовались различные структуры и виды поверхностей. Два результата были получены с применением структуры типа Normal (см. рис. 2): один с использованием никелевой вставки без покрытия, второй – с использованием такой же вставки с покрытием из нитрида титана (TiN). Кроме того, было проведено изучение конкретного случая комплексного структурирования выпускаемого в коммерческих масштабах медицинского изделия (условно – MedApp), изготавливаемого на никелевой поверхности без покрытия.

На основании анализа приведенных усредненных значений можно сделать ряд интересных выводов. Энергия извлечения изделия из формы зависит и от вида полимера, и от состояния поверхности литевой формы, и от геометрических характеристик структурированной поверхности изделия (плотности расположения и формы элементов структуры). Совершенно очевидно, что между этими влияющими фактора-

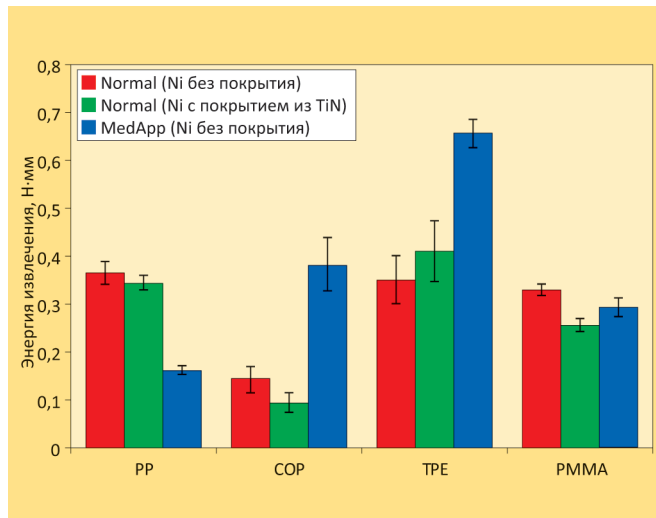


Рис. 3. Энергия извлечения из формы образцов в зависимости от вида используемого для их изготовления полимера и структуры поверхности ФОД (другие пояснения – в тексте)

ми существует сильное взаимодействие, так как влияние вида полимера не в одинаковой степени (вплоть до абсолютно противоположного) проявляется при разных видах материала ФОД и при разных структурах. Так, например, при использовании ФОД со структурой Normal и без покрытия изделие из COP извлекается легче всего, в то время как при использовании сложных структур медицинского назначения минимальных затрат энергии на извлечение из формы требуют изделия из PP.

2.2. Параметры технологического процесса

Среди параметров технологического процесса главным влияющим фактором является температура литевой формы, которая оказывает существенное воздействие на тепловое расширение и сжатие и на модуль упругости полимера. В ходе исследований путем варьирования температуры извлечения изделий из формы определили для аморфных полимеров и смесей COP с 10 и 40 масс.% TPE критические значения температуры извлечения изделий, соответствующие минимальной энергии извлечения этих изделий. В отличие от этих полимеров, частично кристаллический PP продемонстрировал совершенно иной характер поведения, который еще предстоит изучить более подробно. На рис. 4 показано влияние температуры извлечения изделий из формы и вариотермического процесса изготовления изделий на энергию извлечения этих изделий. Представленные данные подтверждают, что критическая температура извлечения изделий составляет 60 °С. В случае использования чистого COP при температурах извлечения изделий меньше критической не удастся извлечь изделия без повреждений, что можно объяснить повышенной жесткостью и хрупкостью материала. Добавление к COP 10 % эластомерного материала позволяет осуществлять извлечение изделий из формы при более низких температурах, но со значительно большими затратами энергии (рис. 4).

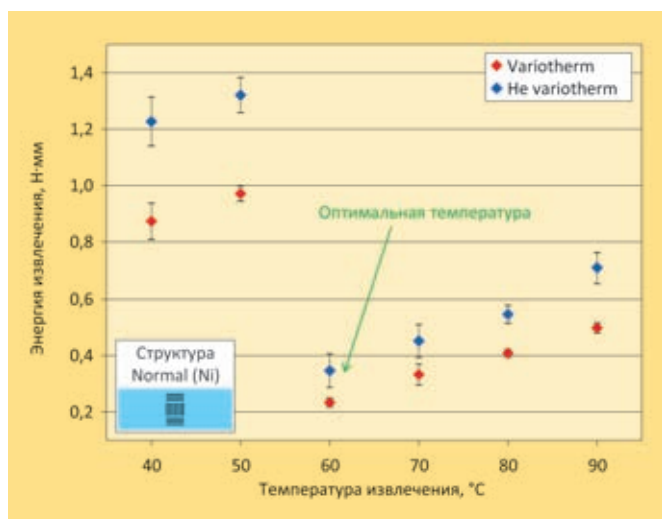


Рис. 4. Влияние температуры извлечения изделий из формы и вариотермического термостатирования (variotherm) на энергию извлечения из формы с никелевой ФОД образцов со структурой типа Normal, изготовленных из COP с добавлением 10% масс. TPE [17]

Аналогичные эффекты были обнаружены и в случае использования РММА, причем извлечение изделий из формы можно было осуществлять в более узком температурном диапазоне. При температурах ниже критической извлечение изделий оказалось вообще невозможным, так как необходимые усилия извлечения превосходили прочность РММА. Данные рис. 4 позволяют также проанализировать влияние вариотермического нагрева формы, который в пределах всего диапазона изменения температуры извлечения из формы предопределяет уменьшение энергии извлечения изделия. Этот эффект проявляется в разной степени при использовании отдельных видов полимерных материалов: в случае РММА применение вариотермического нагрева приводит к разрушению изделия и, следовательно, исключает возможность успешного извлечения из формы.

2.3. Расположение элементов структуры

В следующей серии опытов было исследовано влияние типа структуры, включая ориентацию ее элементов относительно направления течения расплава, а также вблизи от литника и на удалении от него. В качестве примера на рис. 5 представлены результаты, характеризующие влияние ориентации и расположения элементов структуры для двух видов полимеров – COP и PP. В качестве ФОД в этом случае использовалась никелевая вставка без покрытия. Из рис. 5 видно, что для обоих видов материалов расположение структуры на удалении от литника и перпендикулярно направлению движения потока расплава (Perflow) предопределяет максимальную энергию извлечения, что было подтверждено и другими исследованиями. В случае COP наблюдался нетипичный характер поведения изделия при извлечении из формы: для структур, ориентированных в направлении движения потока расплава, энергия извлечения оказалась неожиданно высокой. Причиной этого могло стать неравномерное отделение изделия (эф-

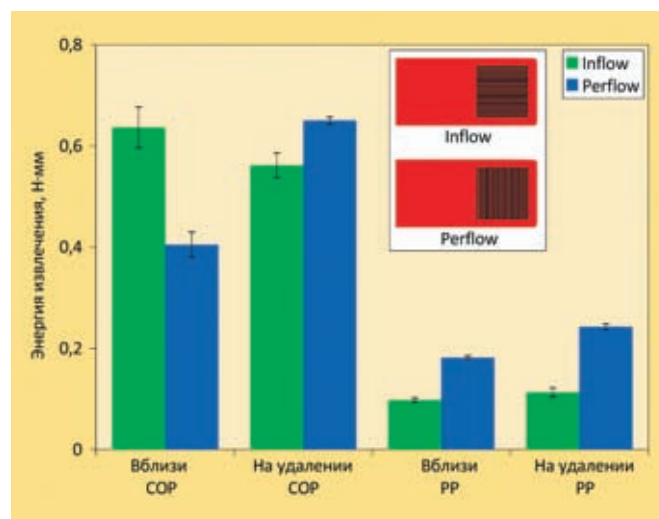


Рис. 5. Влияние ориентации элементов структуры (Inflow и Perflow), а также их расположения (вблизи и на удалении от впускного литника) на энергию извлечения из формы образцов, изготовленных из COP и PP [16]

фект «шелушения»), который проявляется именно при ориентации элементов структуры в направлении течения расплава.

Заключение и выводы

В данной статье была представлена новая литевая форма, оснащенная специальными устройствами, с помощью которых можно в реальных условиях производственного процесса выполнять измерения энергии извлечения из формы микроструктурированных изделий, причем результаты этих измерений могут служить количественной эталонной характеристикой извлекаемости изделий. В работе были использованы разнообразные структурированные изделия с различными геометрическими характеристиками и различным расположением элементов структуры. Благодаря модульной конструкции новой формы с помощью соответствующих ФОД могут без осложнений создаваться структуры с новыми геометрическими характеристиками.

С помощью разработанной литевой формы были проведены исследования поведения литевых изделий в процессе их извлечения из формы. При этом на основании системного подхода было изучено влияние на процесс извлечения из формы четырех наиболее важных групп факторов – вида полимера, особенностей микроструктуры, собственно литевой формы и режима процесса литья под давлением. Эти факторы характеризуются среди прочего наличием сложного взаимного влияния, что помешало выявить четкие тенденции. Тем не менее удалось сделать несколько сформулированных ниже важных выводов.

Вид полимера оказывает наиболее важное влияние на качество извлекаемого изделия из формы. Некоторые свойства полимеров – например, модуль упругости, тепловое расширение, фрикционные свойства и адгезия – напрямую определяют извлекаемость изготовленных из них изделий.

Ориентация элементов структуры относительно направления течения расплава и их расположение по отношению к впускному литнику также оказывают существенное влияние. Как правило, ориентация элементов структуры перпендикулярно направлению движения расплава предопределяет более высокую энергию извлечения, чем ориентация в направлении течения расплава. Расположение структурированной поверхности вблизи от литника является с точки зрения извлечения из формы более предпочтительным, однако влияние этого фактора следует рассматривать во взаимосвязи с особенностями усадки изделия или полимера.

В результате взаимодействия литевой формы или покрытия ФОД с полимерными материалами разных видов некоторые параметры их взаимодействия (адгезия, фрикционные свойства) могут весьма существенно изменяться вплоть до того, что при отсутствии покрытия некоторые изделия вообще не извлекаются из формы. От вида полимера также в значительной степени зависит тот факт, какое именно влияние (позитивное или негативное) оказывает покрытие ФОД на процесс извлечения изделия.

Температура литевой формы и температура извлекаемого изделия также оказывают существенное влияние на его извлечение. Указанные температуры влияют на зависящие от них свойства полимеров (например, модуль упругости, адгезию, фрикционные свойства), которые, в свою очередь, существенным образом отражаются на извлекаемости изделий. Применение вариотермического термостатирования формы приводит к изменению характера влияния рассматриваемых факторов.

Проведенные исследования со всей отчетливостью показали, что по причине сложных взаимосвязей и взаимодействия влияющих факторов каждая конкретная комбинация таких факторов, как вид полимера, микроструктура поверхности изделия, литевая форма и технологический процесс, должна рассматриваться индивидуально; пока еще очень редко представляется возможным выявление общих закономерностей влияния этих факторов на процесс извлечения изделий из формы. В этой связи еще большее значение приобретает возможность получения предварительной информации об извлекаемости из формы запланированных к производству изделий с помощью измерительно-технических методов, не требующих значительных расходов.

Описанная в разд. 1 литевая форма позволяет количественно охарактеризовать общие взаимосвязи между различными факторами, влияющими на процесс извлечения литевых изделий из формы. Основными задачами практического применения рассмотренной измерительной системы являются среди прочего целенаправленное изменение свойств полимеров в направлении улучшения извлекаемости изготовленных из них изделий из литевых форм, исследование влияния добавок на процесс извлечения изделий, разработка антиадгезионных покрытий, улучшение декоративного оформления изделий, а также оптимизация поверхностных микро- и наноструктур.

Список литературных источников приведен на сайте <http://www.polymerbranch.com/> в конце размещенной на нем данной статьи. – Прим. ред.

Перевод А. П. Сергеевкова

New Tool for the Measurement of Demoulding Forces and Energy

T. Lucyshyn, C. Holzer

Micro-structured polymer parts, which are produced by injection moulding, find more and more applications, especially in medical engineering and the life sciences. During the production of these precision parts, several challenges have to be overcome, from the complete filling of the micro-channels to the demoulding process, which in many cases determines whether a component can be produced without defects or not. The demoulding step is influenced by a complex interaction between the important influencing factors polymer, mould (surface), structure geometry and position as well as process conditions. In this contribution a new instrumented mould is presented, which enables the systematic investigation of these influencing factors under real process conditions as well as a quantitative evaluation. Furthermore, significant selected measurement results related to the mentioned influencing parameters are presented. ■

Lucyshyn T., Holzer C. Neues Werkzeug fuer die Messung der Entformungskraefte // GAK. – 2017. – Nr. 11. – S. 704–708.