

Конструктивно-технологические аспекты изготовления приводных деталей машин из полимерных композитов

Д.т.н., проф. О.И. Пилипенко. Черниговский государственный технологический университет

Abstract: *The factors influencing quality received on automatic molding machines by molding under pressure from polymeric composites of sprockets of chain drives, gears and to that of similar parts are considered.*

Features of designing of the specified polymeric machine parts and compression molds are discussed with the account of technology factors and properties of materials for manufacture as parts and compression molds.

Key words: *sprockets, polymeric composites, technology factors, compression molds, designing and manufacture*

Материалоёмкость готового изделия – конечного продукта многостадийного процесса его производства – включает в себя прошлый труд, воплощённый в используемых материалах. Чем меньше материала требуется для изготовления конкретной детали, тем более совершенны её конструкция и технология производства.

Уменьшить материалоёмкость изделий можно, повысив качество проектирования путём оптимизации их параметров, в частности, веса конструкций. Этой же цели служит применение новых технологических процессов с высоким коэффициентом использования материалов, объёмным формообразованием деталей за одну технологическую операцию, позволяющем получать не только готовые детали без какой-либо последующей обработки, но и интегрированные детали, заменяющие собой несколько деталей традиционного изготовления, основанного на последовательной обработке поверхностей резанием. Этому же способствует повышение качественных и функциональных характеристик исходного сырья, более полное его использование, включая переработку отходов основного производства.

Создание конструкции с минимальными затратами материалов и труда требует последовательного оптимизирующего подхода во время всего процесса проектирования, изготовления и эксплуатации. Целью является применение такой технологии, которая гарантирует высокую степень использования материала и тем самым положительно влияет на стоимость изделия.

Качество получаемых на литьевых машинах (термопластавтоматах) деталей зависит от следующих основных факторов:

- конструкции самой детали (геометрия, поперечные сечения, толщина стенок, рёбра жёсткости, площадь поверхности, поднутрения);
- конструкции литьевой формы (материал формы, система охлаждения, жёсткость элементов, шероховатость поверхности формующей полости, механизм извлечения детали, литниковая система, литейные уклоны);
- материала, перерабатываемого в деталь (физико-механические характеристики, вязкость, влажность, термодинамические свойства, характеристики трения);
- технологического режима переработки материала (давление впрыска, время выдержки под давлением, температура расплава, температура формы, время охлаждения, время цикла).

При конструировании деталей машин из полимерных композитов обязателен учёт технологических факторов, так как до настоящего времени мы не располагаем стройной теорией сопротивления этих материалов разного рода напряжениям. Качество детали во многом зависит от материала, из которого она отлита. Однако, наши представления о свойствах материалов основываются на испытаниях стандартных образцов (лопаток, брусков, дисков), технология литья которых, а также конструкция оборудования и оснастки, не регламентированы. Поэтому, как поведёт себя материал в конкретной детали на основании показателей, приводимых в справочной литературе и касающихся стандартных образцов, судить нельзя [1].

Для обеспечения жёсткости и предотвращения коробления в конструкции детали предусматриваются рёбра жёсткости. Причём следует отметить, что рёбра жёсткости во многих случаях необходимы не только при эксплуатации, чтобы противостоять деформации, но и при извлечении детали из формы. Кроме того, рёбра жёсткости используются конструкторами для управления процессом заполнения оформляющей полости и принудительной ориентации расплава в необходимом направлении. Например, при отливке звёздочек, зубчатых колёс или шкивов соответственно цепных, зубчатых и зубчато-ремённых передач рёбра жёсткости в радиальном направлении необходимы не только для обеспечения прочности деталей и уменьшения толщины отливки, но и для ускоренного направления потока расплава с целью качественного формирования зубчатого венца, причём с обеих сторон диска, иначе такая деталь будет иметь дефекты зубьев и склонность к короблению.

На рис. 1 приведены фотографии типоразмеров полимерных звёздочек, иллюстрирующие как сказанное выше, так и результаты исследования напряжённо-деформированного состояния звёздочек [2].

На качество деталей, сохранение ими своей геометрической формы и достижение необходимой размерной точности влияет толщина детали, особенно её разнотолщинность [1]. Разная скорость охлаждения

разнотолщинных стенок вызывает коробление и нарушение геометрии изделия, выражающееся в утолщениях, возникновении пузырей и утяжин. Размерная точность таких деталей невысока. Абсолютной равномерности и не требуется, нужно лишь обеспечить допустимую разностенность, создать условия для заполнения расплавом самых утончённых частей формы. Большое значение при этом имеет система взаимного центрирования оформляющих элементов формы, так как при нагрузке, создаваемой давлением впрыска, может происходить дополнительное смещение деталей формы за счёт зазоров в её центрирующей системе [3,4,5].



Рис. 1. Полимерные звёздочки для цепных передач

Проектирование литьевых форм тесно переплетается с проектированием полимерных деталей, поэтому конструктор литьевых форм либо должен глубоко вникать в функциональное назначение деталей и активно влиять на разработку их конструкции, либо совмещать эти функции в одном лице. Опыт показывает, что в этом случае удаётся избежать многих ошибок и найти новые направления в проектировании изделий. Как правило, каждая форма является индивидуальной конструкцией, включающей в себя большой объём оригинальных чертежей, что удлиняет сроки проектирования.

Снижение трудоёмкости и сокращение сроков проектирования достигается автоматизацией конструкторских работ [4,6], а также нормализацией и унификацией деталей форм. Компьютеризация расчётов и изготовления чертежей существенно повышает производительность труда конструктора. При проведении в жизнь планов нормализации и унификации форм задача конструктора сводится к проектированию формообразующих деталей и доработке остальных элементов форм.

Конструкции форм разнообразны, как разнообразны изделия, для производства которых они предназначены. Любая форма представляет собой сочетание известных узлов и деталей с узлами и деталями специального назначения. Выполнение охлаждающей системы для каждой пресс-формы значительно повышает стоимость оснастки. Поэтому, если нет препятствий, проектируют универсальный охлаждающий блок, обеспечивающий работоспособность сменных пакетов, включающих формующую и выталкивающую системы.

Поскольку расплав движется по линии наименьшего сопротивления, то в случае конструирования формы для изготовления деталей передач зацеплением необходимо предусмотреть радиальные канавки в оформляющей полости формы для формирования рёбер жёсткости. Эти канавки, кроме того, являются наиболее проходимыми участками для расплава, т.е. при одном и том же давлении становится возможным ускоренное перемещение по ним расплава с целью доставки его в наиболее удалённые (и ответственные – зубья звёздочек, зубчатых колёс) места детали одновременно с расплавом, заполняющим участки полости формы без канавок до

ближних точек детали. Кроме улучшения условий заполнения формы, канавки для формирования рёбер ориентируют расплав в заданном направлении, создавая как бы продолжение зуба в радиальном направлении и повышая тем самым сопротивление ударным и изгибающим нагрузкам. При технологической проработке конструкции детали из полимерного композиционного материала конструктор заранее должен определить место впуска расплава и направления основных его потоков.

По вопросам расчёта исполнительных размеров оформляющих элементов деталей литьевых форм и особенно по определению величин расчётных усадок из полимерных композиционных материалов всё ещё нет полной ясности. Усадка является одним из основных факторов, определяющих технологические допуски формируемых изделий, а само понятие «усадка» в ГОСТах 15947-70 и 15948-76, предназначенных для расчёта исполнительных размеров оформляющих элементов деталей форм, трактуется как уменьшение размеров стандартных образцов из полимерных материалов (лопатка, брусок, диск) по сравнению с соответствующими размерами формирующих элементов деталей литьевых форм. Однако, отождествлять усадку стандартного образца с усадкой реального полимерного изделия ввиду значительного отличия условий их изготовления нецелесообразно.

Среди большого количества факторов, влияющих на величину усадочной деформации, решающее влияние принадлежит толщине стенок изделия, длине пути течения расплава по оформляющей полости, сечению литника, расположению места впуска расплава, проценту наполнителя в полимерном композиционном материале, характеру усадки. Для разнотолщинных изделий (например, звёздочек) усадку необходимо рассчитывать отдельно для каждого сечения, предусматривая для утолщённых мест повышенную усадку. Колебания напряжения в сети влияют на усадку, однако, для исключения этого влияния существуют терморегулирующие устройства, выравнивающие напряжение; попытки же отливать точные детали без этих приборов бесперспективны.

Для определения оптимальных размеров формообразующих матриц исходят из необходимого размера готовой детали. В табл.1 приведены задаваемые 10 параметров полимерной звёздочки, а в табл.2 — результаты расчёта параметров оформляющих профиль зубьев зубчатого венца звёздочки матриц.

Расчёт параметров профиля зубьев звёздочек и их оформляющих матриц

Таблица 1. Параметры звёздочки гост 592-75

Наименование	Параметры
1: Число зубьев звёздочки	$z = 15.000$
2: Шаг цепи	$t = 12.700$
3: Диаметр элемента зацепления цепей	$dR = 8.510$
4: Ширина пластины	$h = 11.800$
5: Расстояние между внутренними пластинами	$b = 7.750$
6: Ширина зубчатого венца	$b_2 = 6.800$
7: Длина ступицы	$LC = 17.000$
8: Диаметр ступицы	$DC = 40.000$
9: Диаметр отверстия под вал	$DB = 25.000$
10: Процент усадки	$u \% = 0.700$
Хотите изменить параметры (да→0 нет→1) ? 1	

Для определения оптимальных размеров формообразующих матриц исходят из необходимого размера готовой детали. Разность между размерами формообразующей полости пресс-формы при комнатной температуре и размерами готовой детали, изготовленной литьём под давлением в этой пресс-форме и охлаждённой до комнатной температуры при 50 % относительной влажности окружающего воздуха, называют технологической усадкой (рабочей усадкой, усадкой переработки полимерного материала в изделие). Эта усадка состоит из заданной величины и её рассеивания вокруг этой величины в качестве поля допуска. Технологическая усадка представляет собой уменьшение объёма расплава вследствие охлаждения и образования внутренней структуры материала детали. Таким образом, на технологическую усадку и стабильность размеров получаемых деталей можно воздействовать параметрами переработки. Основными параметрами, влияющими на изменение удельного объёма полимерных материалов ($\text{см}^3/\text{г}$), являются давление и температура переработки. Для некоторых полимерных материалов можно найти [7] диаграммы, построенные на основании дилатомет-

рических и пьезометрических изменений, по которым можно определить изменение удельного объёма V по давлению P и температуре переработки T . Однако, эти данные точны только для образцов из полимерных материалов, а у полимерных деталей различные размеры усаживаются по-разному, так как, например, некоторые размеры усаживаются свободно, а усадка других стеснена, размеры, расположенные вдоль потока расплава, усаживаются меньше, чем расположенные поперёк его, и т.п.

ГОСТ 18616-80 устанавливает технологические усадки и их колебания для различных полимерных материалов. Технологический допуск T_m определяется пределами рассеяния размеров деталей при их изготовлении, а его величина определяется суммарной технологической погрешностью Δ_m , включающей погрешность, вызванную рассеянием усадки ΔS , неточностью формы и условиями предварительной подготовки к переработке полимерного материала [7]. Технологические допуски полимерных деталей с позиций стандартизации лучше всего выбирать по квалитетам (табл. 2.13 [8]) в зависимости от колебания усадки ΔS . Уточнение этих данных должно производиться с учётом опыта на основе экспериментальных данных по усадочной деформации детали.

Так как переработка полиамидов и композитов на их основе требует предварительной сушки материала до влажности 0,15...0,2 %, то сразу после переработки детали не содержат влаги и происходит длительное поглощение деталью влаги из окружающего воздуха. Этот процесс можно ускорить так называемым кондиционированием готовых деталей, т.е. помещением их в горячую (40...90°C) воду, чтобы содержание влаги в них было минимум 1 % (нормально 2,5...3 %), иначе они не будут обладать необходимой ударной вязкостью. Вообще же при эксплуатации в условиях колебания климатических параметров содержание влаги в деталях медленно следует за содержанием влаги в окружающей среде, так как полиамиды поглощают и отдают влагу довольно медленно.

Полимерные материалы изменяют свой объём под действием температуры значительно сильнее, чем металлы. Поэтому конструктор должен знать, в пределах каких температур будет работать литая деталь, с тем, чтобы предусмотреть соответствующие поля допусков. Для частично кристаллических полимерных материалов, к которым относятся полиамиды, наблюдается довольно большая разница между кривыми плавления и отверждения (в отличие от аморфных полимеров), зависящая от материала, толщины формуемой детали и температуры пресс-формы.

Температура поверхности пресс-формы влияет не только на технологическую усадку, но и на блеск поверхности готовой детали, а для частично кристаллических материалов типа полиамидов – на соотношение кристаллической и аморфной фаз. Из этих соображений пресс-форма должна иметь температуру при переработке полимерного материала в изделие от 50 до 120°C, особенно это относится к стеклонаполненным маркам полиамидов. При этом размеры пресс-формы, изготовленной при комнатной температуре, увеличиваются в результате теплового расширения.

Толщина стенок формуемой детали является определяющей для нахождения усадки третьей величиной наряду с выдержкой под давлением и поверхностной температурой пресс-формы. По этим трём главным параметрам можно определить среднюю температуру отверждения T_o , а по ней – рабочую усадку в процентах как линейное продольное укорочение до достижения нормальной температуры.

На усадку литых деталей оказывает влияние вид и строение литника вследствие ориентации частиц массы расплава во время заполнения им полости формы. У стеклонаполненных полимерных материалов это влияние проявляется наиболее сильно ввиду дополнительной ориентации волокон. У полиамидов, как

Таблица 2. Результаты расчёта

Наименование	Результат расчёта
число зубьев звёздочки	15.000
Шаг цепи	12.700
Диаметр элемента зацепления цепей	8.510
Ширина шпунтового венца	6.800
Длина ступицы	17.119
Диаметр ступицы	40.280
Диаметр отверстия под вал	25.175
Диаметр делительной окружности звёздочки	61.511
Диаметр окружности впадин	51.564
Диаметр окружности выступов	65.665
Толщина матрицы	5.100
Ширина фаски	0.856
Смещение центров дуг впадин	0.384
Радиус впадин зубьев	3.965
Диаметр фаски	59.691
Диаметр венца	44.720
Угол заострения зуба	32.000

ненаполненных, так и наполненных стекловолокном, усадка в направлении потока меньше, чем в поперечном направлении (рис.2). По этой причине для отливки звёздочек цепных передач лучше всего подходит центральный кольцевой литник при одногнёздной пресс-форме. При изменении направления потока расплава ориентация волокон смешанная, и в этом случае рабочая усадка выше (прямая «б»). Если выдержка под давлением в пресс-форме уменьшилась из-за тонких точечных или туннельных литников, то значения усадки находятся в пределах области «в». При удалении от литника или поперечной ориентации волокон у стеклонеполненных полиамидов могут появляться значения усадки, достигающие таковых для ненаполненных полиамидов (прямая «г»).

На рис.3 показана зависимость толщины поверхностного слоя стенок деталей (1...5 мм) от технологических параметров: T_p – температуры расплава, T_ϕ – температуры формы, V – скорости впрыска, P – давления впрыска.

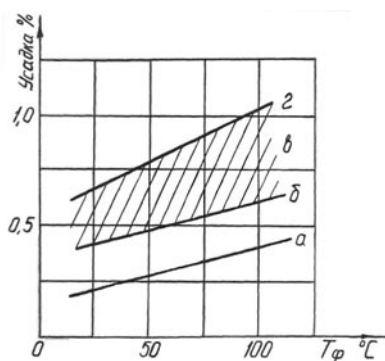


Рис. 2. Усадка стеклонаполненных полиамидов в функции температуры формы

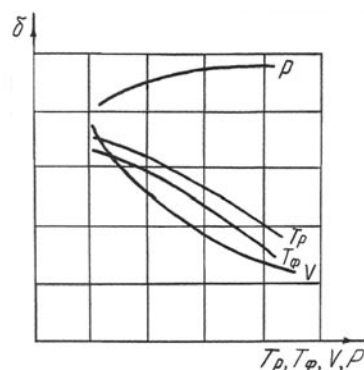


Рис.3. Толщина поверхностного слоя детали в функции параметров переработки

Чем больше скорость течения расплава, тем больше ориентирован материал на фронте потока и тем большая ориентация наблюдается в наружной зоне поверхностей оболочки изделия. Это очень важно, так как практически все механические нагрузки воспринимаются поверхностным слоем детали, он же противостоит износу, коррозии, тепловым воздействиям. Толщина поверхностного слоя зависит от температуры расплава, температуры формы и времени её заполнения (скорости течения расплава).

С помощью приведённых диаграмм можно найти причины слишком большой разности усадок на готовых деталях и предпринять меры к получению оптимальных параметров переработки. Конструктору пресс-форм для литья под давлением эти диаграммы дают возможность получить более точные значения усадки в зависимости от параметров переработки.

Требования к точности размеров деталей регламентируются допусками. Функциональный допуск T_f состоит из конструкторского допуска T_k и эксплуатационного T_ϕ , т.е. $T_f = T_k + T_\phi$. Конструкторский допуск устанавливается документацией на деталь и выбирается по квалитетам ГОСТ 25316-88 [8]. Эксплуатационный допуск служит для сохранения требуемой точности размеров в течение срока службы детали. Конструкторские допуски и посадки гладких соединений деталей из полимерных материалов нормируются ГОСТ 25349-88. Там же даны предельные отклонения валов и отверстий деталей из полимерных материалов, рекомендуемые посадки в соединениях полимерных деталей с полимерными или металлическими деталями.

При выборе посадки в соединениях полимерных деталей с металлическими для последних рекомендуется назначать поле допусков по ГОСТ 25347-88: для валов – h7...h12; для отверстий – H7...H12. Числовые значения допусков и основных отклонений, правила образования полей допусков и посадок принимаются в соответствии с ГОСТ 25346-88.

В состав технологической оснастки для изготовления звёздочек и шестерен в качестве формирующих зубчатый венец деталей входят матрицы. Точность и шероховатость поверхности их во многом определяет работоспособность получаемых литых деталей. При несоблюдении допусков на размеры, указанных на чертежах матриц, возможно получение полимерных деталей с превышающими норму осевыми и радиальными биениями, а также с большим разбросом шага зубьев звёздочек и шестерен. Всё это может привести к большим динамическим нагрузкам при работе таких деталей в цепном контуре, что крайне нежелательно [2]. Поэтому способ изготовления матриц является решающим фактором при изготовлении пресс-форм. Наиболее распространённый способ изготовления матриц – фрезерование с последующей шлифовкой не может обеспечить

достаточной точности, поэтому необходимо применение более прогрессивных технологий. Одной из них является электроэрозионная обработка металлов.

При изготовлении матриц этим способом используются предварительные операции – фрезерование и термическая обработка. Фрезерование производят с небольшими припусками. Используя эту предварительную операцию, получаем выигрыш во времени, так как по производительности на простых операциях электроэрозионная технология уступает фрезерованию. Оставшийся припуск снимают на черновом режиме с большой энергией импульса, а по мере уменьшения припуска переходят на более мягкие режимы. Для осуществления нужной шероховатости поверхности окончательную обработку производят на чистовых высокочастотных режимах с малой энергией импульса и при этом исключается необходимость ручной слесарной доводки. На рис.4 показан пример вырезки формообразующей зубья звёздочки матрицы проволочным электродом на электроэрозионном станке с числовым программным управлением. При этом большая величина зазора в сравнении с диаметром проволоки (0,2мм) на рис.4 объясняется высвобождением упругих деформаций. Обработка предварительно термически обработанных заготовок исключает брак, который может возникнуть из-за искажения профиля в результате тепловых деформаций при термообработке.

Изготовление матриц для звёздочек, шестерен и подобных деталей может осуществляться на электроэрозионных станках с числовым программным управлением типов 4531Ф3, 4532Ф3, 4732Ф3, Agiecut, которые производят вырезку проволочным электродом деталей матриц по предварительно введённым в программу параметрам.



Рис.4. Вырезка матрицы и отлитая звёздочка

Другим прогрессивным методом получения матриц пресс-форм сложной конфигурации является плазменное напыление на модель рабочего слоя толщиной 1...3 мм с последующим оформлением опорной части заливкой другими металлами («корковый» метод). В результате трудоёмкость изготовления оснастки снижается в 3...10 раз, а рабочая поверхность матрицы не требует финишной обработки, так как чистота поверхности соответствует чистоте поверхности модели. Среднее время изготовления рабочего слоя 5...30 минут, твёрдость его достигает 72HRC.

Износ деталей матричной группы происходит из-за наличия стекловолна в материале. Чтобы уменьшить его влияние, детали матричной группы хромируются с толщиной покрытия 18 мкм и полируются для придания требуемой шероховатости поверхности.

Для упрощения конструкции, а также для осуществления унификации пресс-формы целесообразно применение универсального охлаждающего блока для сменных пакетов (пресс-форм). Блок включает в себя направляющие, плиты крепления к термопластавтомату и крепления пресс-формы, систему её охлаждения. Такая конструкция пресс-формы «блок-сменный пакет» предполагает более высокую технологичность изготовления и универсальность, которая выражается в возможности использования других сменных пакетов (для других аналогичных деталей) в этом же блоке. При необходимости изготовления звёздочек или шестерен с металлической ступицей (для передачи больших моментов) в одной и той же пресс-форме в её конструкцию вводится пружина для мгновенного возврата трубчатого выталкивателя в исходное положение при раскрытой пресс-форме. Это позволяет освободить знак пресс-формы для размещения на нём армирующего элемента (металлической ступицы) до закрытия пресс-формы.

Сложная конфигурация звёздочки или шестерни диктует форму деталей матричной группы. Расчленение

формирующей полости на три детали диктуется условиями выталкивания отливки, технологичности изготовления матриц. Все детали матричной группы (матрицы, знак, литниковая втулка, выталкиватель) имеют хромированные и полированные поверхности, соприкасающиеся с полимерным материалом. Чтобы исключить облой, матрицы выполнены из термообработанных сталей, применение которых даёт возможность изгибаться матрице без остаточных деформаций, что позволяет добиваться максимальной площади контакта деталей матричной группы.

Особенностью деталей передач зацеплением является то, что они работают в условиях постоянных ударов и трения. Это предъявляет повышенные требования к шероховатости поверхностей деталей. Поэтому шероховатость формообразующей поверхности формы должна быть, как правило, не ниже 0,1. Кроме того, детали пресс-форм, обеспечивающие наиболее ответственные размеры отливки, т.е. матрицы и знаки, должны иметь твёрдость не ниже 50HRC. Для этих деталей применяют легированные стали (марок 5ХНМ, 40Х и др.) или высококачественные углеродистые (У8А и т.п.) с последующим гальваническим покрытием слоем хрома толщиной 9...18 мкм. Это влияет не только на качество формуемых поверхностей, но и на стойкость пресс-форм, составляющую в среднем 150...300 тыс. смыканий. Так как детали передач зацеплением имеют такую специфику, что для их получения необходимо применение разъёмной матрицы, то требуется повышенная точность при сборке пресс-форм. Поэтому для получения изделия с размером, к примеру, по 12-му качеству, точность изготовления деталей пресс-форм должна быть не ниже 7-го, а в отдельных случаях 6-го и даже 5-го качества.

Наряду с определением принципиальной конструкции пресс-формы и её реологического, термического и механического исполнения можно оптимизировать проектирование полимерной детали в отношении условий её изготовления, т.е. технологических условий. В результате отливки опытной партии полимерных деталей отрабатываются режимы литья и появляются данные для управления технологическими параметрами изготовления полимерной детали (давление впрыска материала, температуры переработки по зонам, время выдержки под давлением, внутреннее давление в пресс-форме, температура формы, температура расплава, скорость вращения шнека, время цикла). Использование таких технологических параметров как носителей информации, приспособленной к возможности ввода в управление термопластавтоматом, создаёт возможности для компьютеризованного производства полимерных деталей машин литьём под давлением из полимерных композитов.

Возможность получения высоких технико-экономических показателей и достижения высокого уровня производительности машин и труда в последнее время обеспечивает применение автоматических роторно-конвейерных линий. При комплексной автоматизации производства роторно-конвейерные линии объединяют в единый технологический комплекс автоматическими межлинейными транспортными системами. Цех-автомат, состоящий из технологических комплексов, управляется автоматизированной системой производства на базе быстродействующей ЭВМ.

Литература

1. Видгоф Н.Б. Основы конструирования литьевых форм для термопластов. Маш-строение. М., 1979, 27с.
2. Pilipenko Oleg. Synthesis of Chain Drives Based on Dynamic Methods, New Materials and Technologies. Machine Design. Novi Sad, 2007, p.307-314.
3. Технологическая оснастка для переработки термопластов. Отраслевой каталог. М., ЦНИИТЭстроймаш, 1983, 384с.
4. Bangert H., Menges G. Systematic design of injection molds and use of computers/ Polym. Eng. Rev., 1981, 1, N2, p.133-168.
5. Басов Н.И., Брагинский В.А., Казанков Ю.В. Расчёт и конструирование формирующего инструмента для изготовления изделий из полимерных материалов. Химия. М., 1991, 350с.
6. Глушков О.И., Касилович И.П., Рубин О.И. Автоматизация проектирования пресс-форм. Наука і техніка. Минск, 1990, 174с.
7. BASF. Technische Information. Kunststoffe. Spritzgießen Spritzgubtechnik 2.1.1. Einflüsse auf die Maßgenauigkeit von Spritzgubteilen. 81896/757/. April, 1979, 8 s.
8. Точные пластмассовые детали и технология их получения /Старжинский В.Е. и др./. Наука і техніка. Минск, 1992, 308с.