

УДК 669.245:621.762

## РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА ДЕТАЛЕЙ ПРЕСС-ФОРМЫ С СИСТЕМОЙ КОНФОРМНЫХ КАНАЛОВ ОХЛАЖДЕНИЯ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

© 2020 Р.Р. Кяримов, А.И. Хаймович, В.П. Курбатов, А.Э. Кошоев

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 10.03.2020

В статье приводятся результаты проектирования и изготовления пресс-формы с конформной системой охлаждения. В формообразующих деталях пресс-формы были выполнены оптимизированные методом конечных элементов в САЕ-системе конформные каналы охлаждения, обеспечивающие высокую интенсивность и равномерность охлаждения. Конструкция деталей пресс-формы была адаптирована под технологию изготовления методом селективного лазерного сплавления (СЛС) из порошка 40Х13 размером фракции 40 мкм. Для экономии порошкового материала и сокращения операционного времени в полой внутренней части пуансона была сформирована сетчатая (латисная) структура. Внешние поверхности выращенных деталей подвергались дальнейшей механической обработке.

**Ключевые слова:** пресс-форма, конструкция, селективное лазерное сплавление, конформные каналы охлаждения, моделирование.

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-2-32-39

### ВВЕДЕНИЕ

Пресс-форма – сложное устройство для получения изделий различной конфигурации из металлов, пластмасс, резины и других материалов под действием давления, создаваемого на литьевых машинах. Для экономии материальных и временных ресурсов на проектирование, освоение и изготовление пресс-форм, применяются новые технологические процессы как в заготовительном, так и в основном производстве. Конструкции пресс-форм отличаются числом формообразующих гнезд, расположением поверхностей разъема, способом охлаждения или нагрева, характером связи с рабочей машиной, способом извлечения изделия и рядом других признаков [1].

Пресс-формы оснащаются специальными охлаждающими каналами, которые зачастую имеют сложную конструкцию. Расположение и конструкция каналов должны обеспечивать интенсивное и равномерное охлаждение поверхности пуансонов по возможности без глухих карманов, в которых не будет нормальной циркуляции охлаждающей жидкости [2]. Выполнение в ме-

талле конструкции охлаждающих каналов, удовлетворяющих этим условиям традиционными способами, представляет трудность в силу существенных технологических ограничений.

В настоящее время широкое развитие получили технологии селективного лазерного сплавления (СЛС), позволяющие изготавливать заготовки сложной формы, которые невозможно получить традиционными технологиями. Технология СЛС позволяет изготавливать детали из металлических порошков нержавеющих сталей, инструментальных сталей, алюминиевых и титановых сплавов, жаропрочных сплавов на никель-хромовой, кобальт-хромовой основе. В настоящее время СЛС является уникальной технологией для изготовления объектов сложной геометрии, в том числе полых деталей с сетчатой структурой [3-5].

### 1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФОРМООБРАЗУЮЩИХ ДЕТАЛЕЙ ПРЕСС-ФОРМЫ ПОД ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

Пресс-форма с оптимизированной системой охлаждения используется при изготовлении пластиковых контейнеров объемом 150 мл из полипропилена марки PP4445S. К формообразующим деталям пресс-формы (рисунок 1) относятся матрица 3, пуансон 4 и плита съема 9 с кольцевой канавкой, оформляющей торцевой ободок контейнера. Матрица и пуансон снабжены каналами охлаждения, форма и расположение которых должны обеспечить скорость и

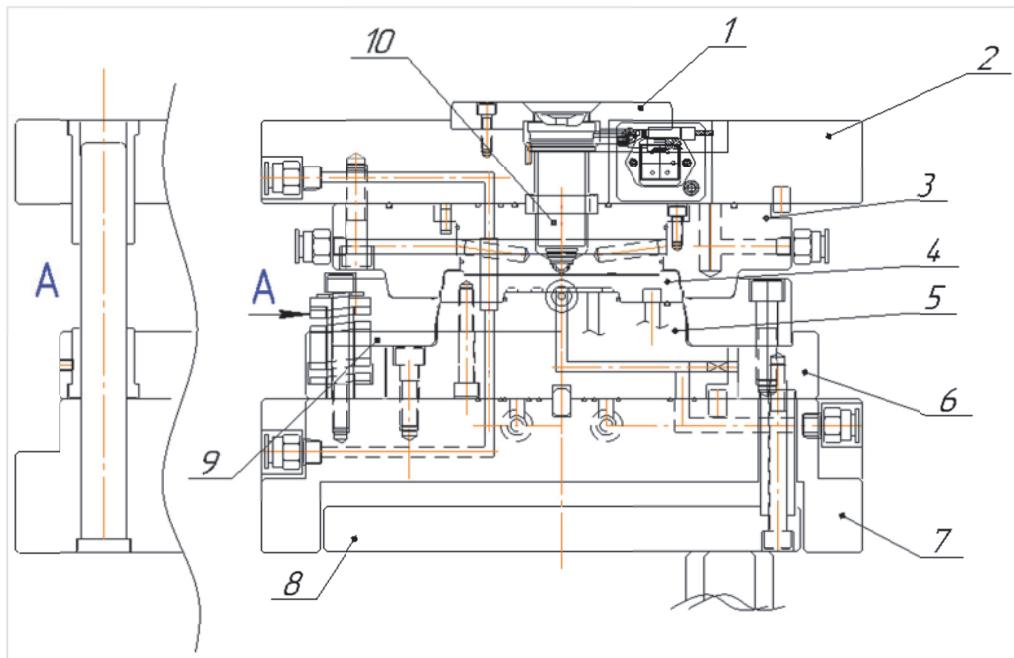
Кяримов Рустам Равильевич, аспирант.

E-mail: rustam9395@mail.ru

Хаймович Александр Исаакович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологий производства двигателей. E-mail: berill\_samara@bk.ru

Курбатов Валерий Павлович, кандидат технических наук, профессор кафедры технологий производства двигателей. E-mail: pdla@ssau.ru

Кошоев Аман Эркинович, магистр.  
E-mail: gaaooe@gmail.com



**Рис. 1.** Эскиз пресс-формы для изготовления пластиковых контейнеров

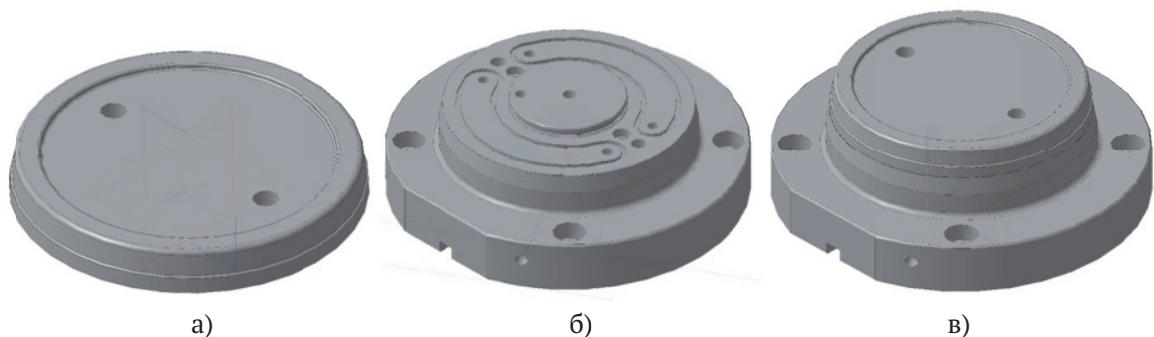
равномерность охлаждения. Интенсификация теплоотвода способствует сокращению времени цикла, а равномерность охлаждения – уменьшению короблению. Этот эффект может быть достигнут за счет применения конформной системы охлаждения, т.е. системы каналов охлаждения максимально приближенных к форме отливаемой детали [6]. Такие каналы можно получить только с использованием аддитивных технологий. Пуансон 4 закреплен на основании 5, по конической поверхности которого движется кольцевая плита съема 9 приводимая в движение через тяги плитой толкания 8. Основание 5 крепится через переходную плиту 6 на фланцевую плиту 7, которая монтируется на подвижной плате термопласт-автомата (ТПА). В свою очередь матрица крепится на фланцевой плате 2 устанавливаемой на неподвижной плате ТПА. Центрирование пресс-формы на ТПА осуществляется с помощью центрирующего кольца 1. Расплав полимера подается в формообразующую полость пресс-формы, образованную сомкнутыми матрицей 3 и пуансоном

4 через горячеканальную центральную втулку 10. После завершения заполнения пресс-формы расплавом полипропилена, происходит его затвердевание и кристаллизация при выдержке под давлением, и далее размыкание пресс-формы и съем отливки с пуансона 4 кольцевой плитой съема 9.

К изготавлению методом СЛС были предложены 2 сопрягаемые детали - пуансон 4 с габаритами  $\varnothing 137 \times 17,5$  мм и основание пуансона 5 с габаритными размерами  $\varnothing 198 \times 54,6$  мм.

Разработка 3D моделей деталей пресс-формы, а также их сборка была выполнена в программном продукте Siemens NX 8.5. На рисунке 2 представлен общий вид деталей 4 и 5 изготавливаемых методом СЛС.

С учетом возможностей технологии СЛС по точности на все поверхности деталей был добавлен припуск 0,5 мм для последующей механической обработки. Поверхности сопряжения и формообразующие поверхности деталей с жесткими допусками по 6-7 квалитету были изготовлены с припуском 1 мм.



**Рис. 2.** 3D-модели деталей пресс-формы:  
а – объемная модель пуансона; б – объемная модель основания пуансона; в – сборка

Изменению также подверглись каналы охлаждения – их сечения были выполнены каплевидной формы, чтобы избежать построения материала поддержки при изготовлении детали методом СЛС (рисунок 3 в). На торце пuhanсона 4 была добавлена технологическая прибыль в форме полуколец диаметром  $\varnothing 73$  мм, толщиной 5 мм и высотой 14 мм (рисунок 3 а) для крепления заготовки в патроне станка при токарной обработке формообразующих поверхностей.

На основание пuhanсона (деталь 5) по окружности диаметром  $\varnothing 198$  мм были добавлены технологические отверстия для возможности извлечения металлического порошка из внутренней полости и ячеистых структур после процесса сплавления.

Заготовки пuhanсона и основания пuhanсона были разработаны в программном продукте Siemens NX (рисунок 3, 5).

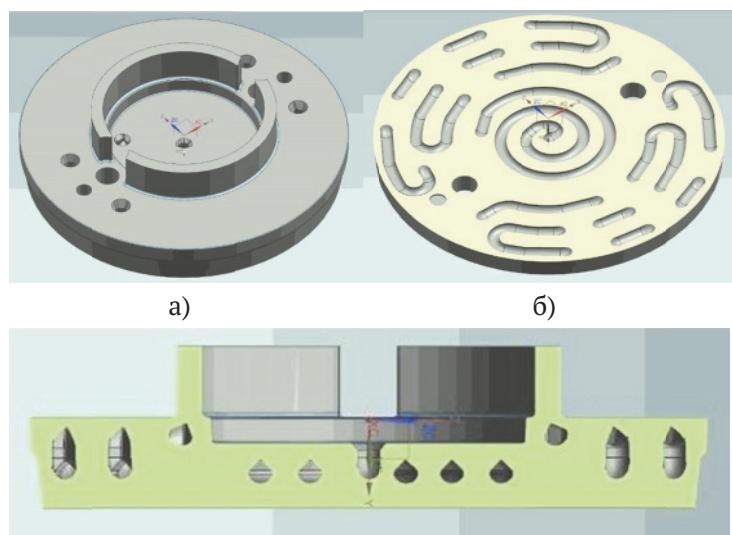
Для изготовления деталей с использованием технологии СЛС требуется объемная цифровая модель заготовки детали в формате STL. Это «мозаичный» формат, в котором для представления формы цифровой 3D модели используется последовательность треугольников (фасетов). Трехмерная геометрия описывается поверхно-

стями высокого порядка, а при триангуляции поверхность модели разбивается на маленькие треугольники. Каждый фасет описывается четырьмя наборами данных: координаты XYZ каждой из трех вершин и нормальный вектор, который описывает ориентацию фасета.

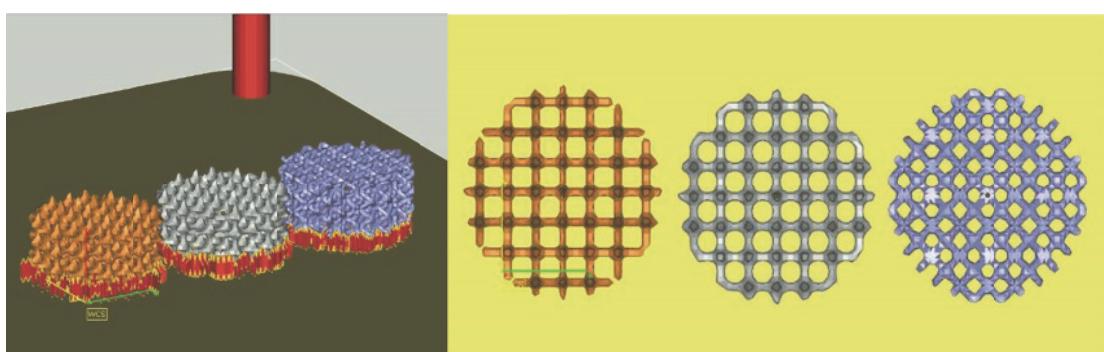
Технология СЛС дает возможность создавать решетчатые структуры разных форм и размеров (например, гексагоновые) или создавать ячеистую структуру, а снаружи – твердую оболочку. Традиционными методами металлообработки такую структуру изготовить невозможно.

Для отработки технологии создания ячеистых структур были изготовлены цилиндрические образцы диаметром 35 мм и высотой 16,5 мм методом СЛС. Моделирование ячеистой структуры было выполнено в программном продукте NX. Для отработки технологии было смоделировано три варианта конструкций образцов (рисунок 4):

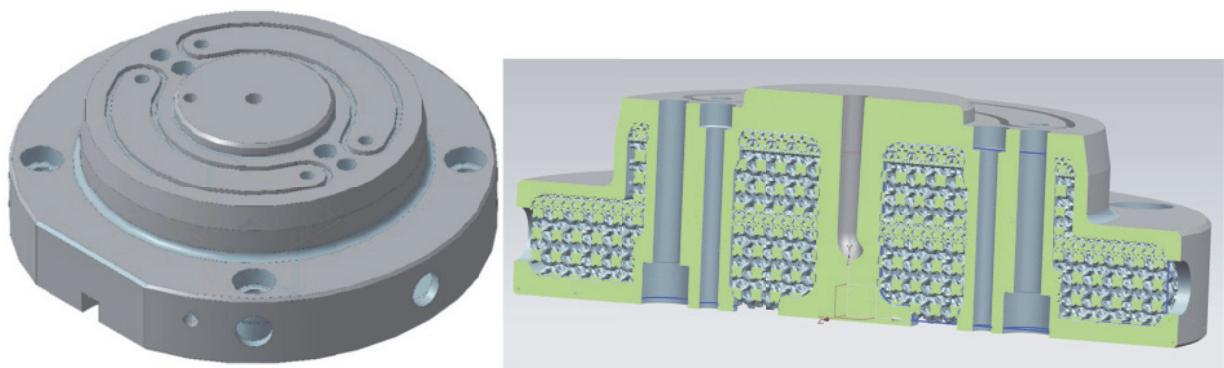
1. Октаэдральный тип ячейки, размеры блока – 5 x 5 x 5 мм, диаметр стержня – 1,5 мм.
2. Октаэдральный тип ячейки, размеры блока – 5 x 5 x 5 мм, диаметр стержня – 1,5 мм.
3. Квадродиаметральный тип ячейки, размеры блока – 5 x 5 x 5 мм, диаметр стержня – 1,5 мм.



**Рис. 3.** Объемная модель (а) заготовки пuhanсона, продольное (б) и поперечное (в) сечения модели пuhanсона



**Рис. 4.** Конструкция ячеистых структур



**Рис. 5.** Объемная модель основания пуансона для технологии СЛС

Для снижения металлоемкости пресс-формы, а также для сокращения времени изготовления детали внутренняя часть основания пуансона (деталь 5) была смоделирована с использованием сетчатой структуры (рисунок 5) октаэдрального типа ячейки, размерами блока – 5 × 5 × 5 мм, диаметром стержня – 1,5 мм. Толщина стенки наружного контура пуансона составила 2 мм.

На основе разработанных цифровых моделей деталей пресс-формы производилась оптимизация геометрии конформной системы охлаждения пуансона 4 с применением CAE-системы Moldex 3D.

## 2. СИМУЛЯЦИЯ ПРОЦЕССА ИНЖЕКЦИОННОГО ЛИТЬЯ В САЕ-СИСТЕМЕ

Сетка конечных элементов (КЭ) была сгенерирована в Moldex 3D designer- специальном конструкторе КЭ для моделирования процессов инжекционного литья.

Алгоритм построения сетки КЭ для симуляции процесса отливки состоит из следующих этапов:

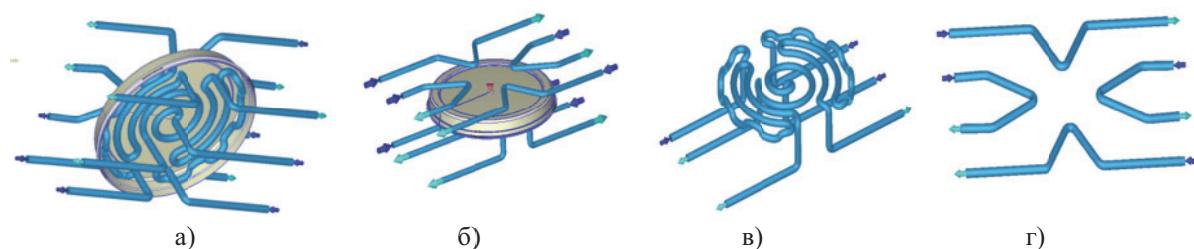
- импорт геометрии детали в конструктор Moldex 3D designer,
- создание литниковой системы подачи расплава в формообразующие полости,
- проектирование модели системы охлаждения,
- создание сетки конечных элементов,
- экспорт сетки в модуль расчета,

Помимо автоматической генерации сетки КЭ и инструментов ручного проектирования режим BLM конструктора Moldex 3D designer до-

полнительно предоставляет инструменты для оптимизации качества сетки КЭ.

Моделирование каналов охлаждения производилось путем экспорта средней линии сечения – направляющей каналов в формате iges из CAD-модели пресс-формы и формирования кинематической поверхности каналов образующей в форме окружности диаметром 6 мм. Проходное сечение каналов было выбрано равным площади сечения реальных каналов, которые имеют каплевидную форму. Предварительно средняя линия аппроксимировалась контуром, состоящим из дуг окружностей радиусом не менее 5 мм и отрезков прямых. На рисунке 6 а, б представлены расположение каналов охлаждения относительно отливки. Также по отдельности показаны каналы полученные методом СЛС в пуансоне (рисунок 6 в) и в матрице (рисунок 6 г).

Объемная сетка конечных элементов генерируется автоматически. Препроцессор автоматически выделяет дефектные области - если есть дефектные области, которые на сетке отмечены зеленым маркером. Дефекты триангуляционной фасетной сетки, влияющие на качество, определяются по четырем параметрам – aspectratio (отношение наименьшей к наибольшей стороне ячейки), skewness (асимметрия ячейки), orthogonality (ортогональность) и smoothness (гладкость сопряжения соседних ячеек). Локальные области вокруг дефектных фасетных ячеек удалялись вручную. После чего в полуавтоматическом режиме эти локальные области затягивались сеткой элементов, удовлетворяющих параметрам качества.



**Рис. 6.** Каналы охлаждения расчетной модели пресс-формы:  
а и б – расположение каналов относительно отливок, в – каналы в пуансоне, г – каналы в матрице

Сетка КЭ элементов для численной модели в формате файла с расширением mfe далее передается в расчетный модуль Moldex 3D.

В расчетном модуле последовательно выполняются следующие шаги:

- загрузка сетки конечных элементов,
- выбор материала и определение его реологических свойств,
- выбор термопласт-автомата и назначение режимов инжекционного литья,
- верификация данных и проведение расчета,
- анализ полученных результатов.

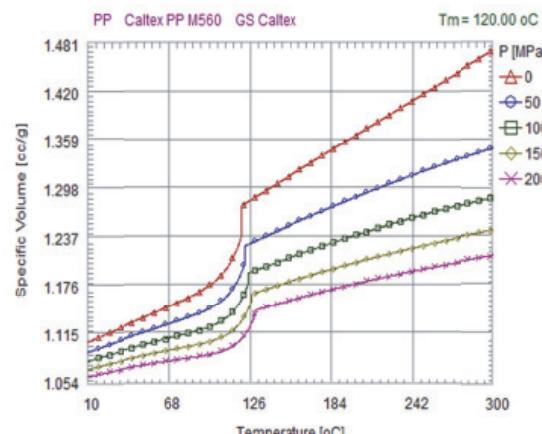
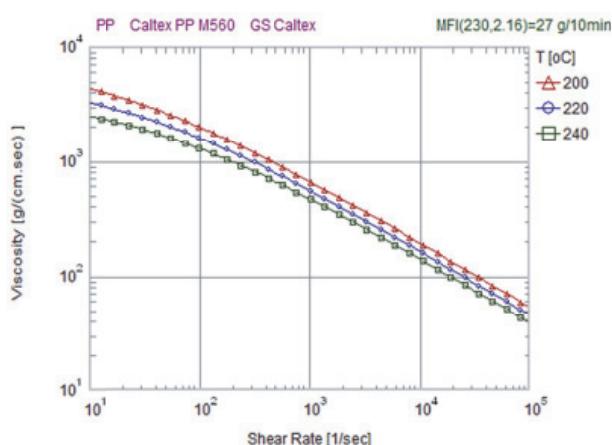
На рисунке 7 приведены литейные реологические свойства аналога из базы данных Moldex 3D, используемые для численного расчета и симуляции процесса.

Результаты симуляции процесса инжекционного литья крышки представлены на рисунках 8 - 11. Распределение температуры отливки после впрыска относительно равномерное в окружном направлении (колебания в пределах 10 – 15 град.) и наблюдается постепенное охлаждение от 235 град. в центре до 150 град. на периферии в радиальном направлении при

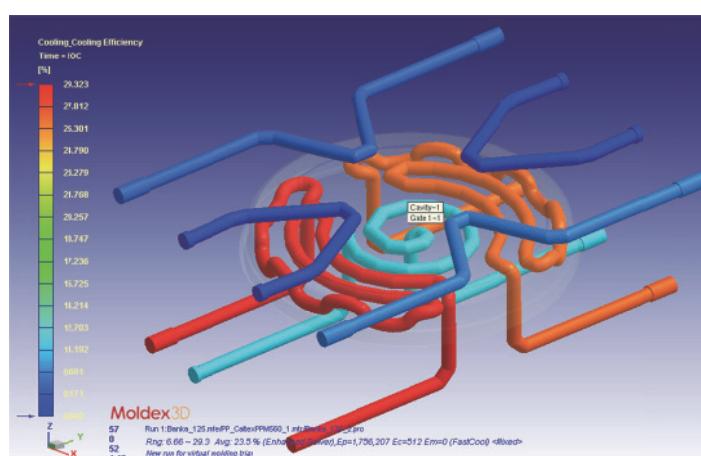
температуре замерзания расплава 110 град., что свидетельствует о хорошем расчетном тепловом режиме инжекции и параметрах цикла.

Эффективность конформной системы охлаждения (в условных баллах) приведена на рисунке 8. Видно, что конформные каналы охлаждения пуансона (зигзагообразные спирали) пуансона на 20 балов эффективнее прямых каналов матрицы, выполненных традиционным способом сверления и более чем на 12 балов эффективнее центрального спирального канала пуансона. Эффективность системы охлаждения лучше всего анализировать по величине коробления – рисунок 9, в сравнении с размерами номинальной модели. Наиболее наглядно видны дефекты традиционной системы охлаждения (матрица) при анализе неплоскостиности центральной части крышки (рисунок 10). Максимальная неплоскость – в пределах 0,7 мм наблюдается в местах, где каналы охлаждения максимально удалены от поверхности отливки (рисунок 8 и рисунок 10).

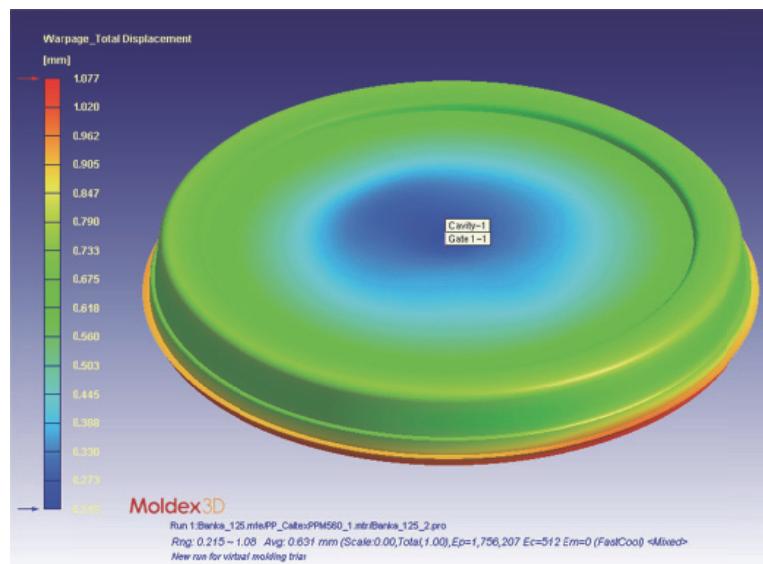
На рисунке 12 представлены заготовки деталей пресс-формы (пуансона и основания пуансона) изготовленные методом СЛС.



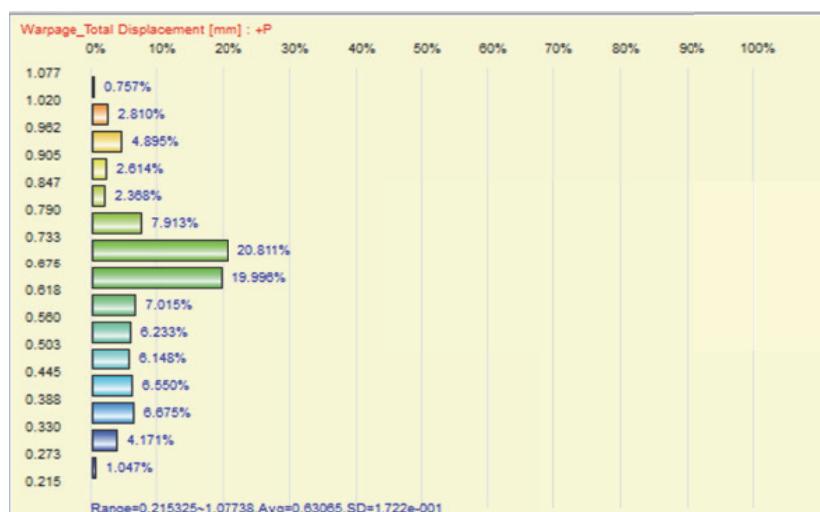
**Рис. 7.** Реологические свойства полипропилен для виртуального моделирования инжекционного литья



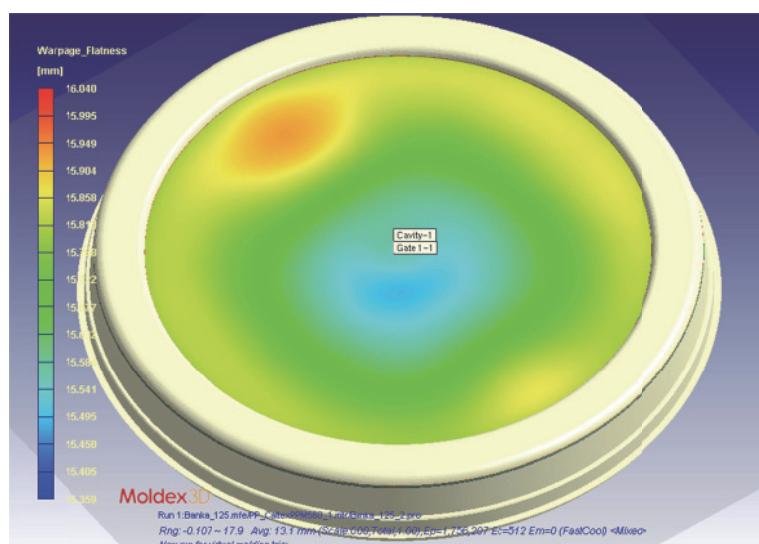
**Рис. 8.** Сравнительная эффективность каналов конформной системы охлаждения



**Рис. 9.** Результатирующее коробление (показывает длину вектора полного перемещения (учитываются все эффекты) после того, как деталь выталкивается из пресс-формы и охлаждается до комнатной температуры) – значения приведены относительно системы координат модели



**Рис. 10.** Гистограмма величин результирующего коробления

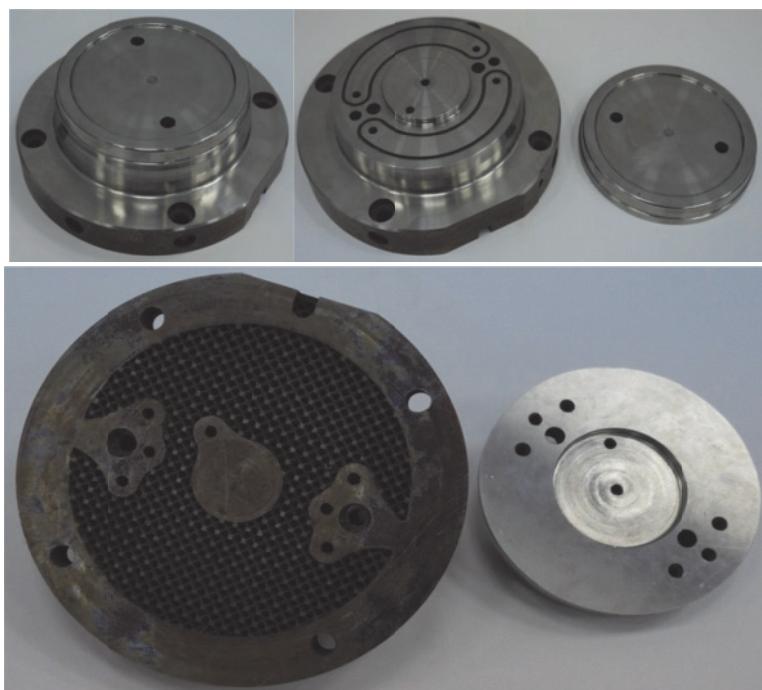


**Рис. 11.** Расчетная плоскостность отливки – расстояние между узлами деформированной сетки КЭ до заданной пользователем контрольной плоскости



**Рис. 12.** Заготовки деталей пресс-формы:

а – заготовка пuhanсона с конформной системой охлаждения, б – заготовка основания пuhanсона пресс-формы



**Рис. 13.** Готовые детали пресс-формы: пuhanсон и основание пuhanсона

После изготовления методом СЛС заготовок формообразующей и пuhanсона пресс-формы, они были подвергнуты механической обработке (рисунок 13), с целью их доведения до готового состояния деталей со снятием заложенного припуска на поверхностях.

## ВЫВОДЫ

Произведена апробация технологии проектирования и изготовления формообразующих деталей пресс-форм с применением технологии селективного лазерного сплавления. Топологию конформных каналов охлаждения в пuhanсоне удалось оптимизировать с применением численного анализа методом конечных элементов в CAE-системе Moldex 3D. Разработка 3D-моделей деталей пресс-формы производилась с учетом адаптации конструкции под технологию изготовления методом СЛС. В частности была сфор-

мирована сетчатая структура в полости пuhanсона и добавлены припуски под дальнейшую механическую обработку точением.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Georg Menges, Walther Mikaeli, Pauly Morei.* Как создать литьевые формы [Текст]: Георг Менгес, Вальтер Микаэли, Пауль Мореи, перевод с английского 3-го издания под редакцией В.Г. Дувидзона, Э.Л. Калинчева СПб.: Профессия, 2007. 611 с.
2. Справочный материал [электронный ресурс]. – URL: [http://3d.globatek.ru/3d-printers/press\\_forms/](http://3d.globatek.ru/3d-printers/press_forms/) (дата обращения 10.02.2020).
3. Владимиров В.М., Высоцкий К.В. Справочник молодого слесаря по штампам и пресс-формам. – М.: Высш. Школа, 1979. – 248 с.
4. Справочный материал [электронный ресурс]. – URL: <http://sprav-constr.ru/html/tom1/pages/chapter3/ckm35.html> (дата обращения 10.02.2020).
5. Kamran Saeidi. Stainless steels fabricated by laser melting / Doctoral thesis 2016, Department of

- Materials and Environmental Chemistry, Arrhenius Laboratory, Stockholm University
6. Хаймович А.И., Галкина Н.В. Оценка качества литья изделий из полимерных материалов на эта-
- пе конструкторско-технологической подготовки производства // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2019. Т. 21. № 1 (87). С. 91-97.

**DEVELOPMENT OF THE SCHEME FOR EXPERIMENTAL SAMPLE  
OF MOLDING FORM WITH CONFORMAL COOLING CHANNELS SYSTEM  
FOR SELECTIVE LASER MELTING TECHNOLOGY**

© 2020 R.R. Kyarimov, A.I. Khaimovich, V.P. Kurbatov, A.E. Koshoev

Samara National Research University named after academician S.P. Korolyov

This article represents the results of designing and manufacturing a molding form with conformal cooling system. In the forming parts of molding form, conformal cooling channels optimized by the finite element method in the CAE system were implemented, providing high intensity and cooling uniformity. Construction of molding form parts was adapted to the manufacturing technology of selective laser melting (SLM) by 40X13 powder with a grain size of 40 microns. To save powder material and reduce operating time, a cellular (lattice) structure was formed in the hollow interior of the force plunger. The outer surfaces of the fabricated parts were subjected to further machining.

*Keywords:* molding form, construction, selective laser melting, conformal cooling channels, modeling.

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-2-32-39

---

Rustam Kyarimov, Graduate Student.

E-mail: rustam9395@mail.ru

Alexander Khaimovich, Doctor of Technics, Professor.

E-mail: berill\_samara@bk.ru

Valery Kurbatov, Candidate of Technics, Professor.

E-mail: pdla@ssau.ru

Aman Koshoev, Master. E-mail: gaaooe@gmail.com