

## ИНЖЕНЕРНЫЕ РАСЧЕТЫ ЛИТЬЯ ТЕРМОПЛАСТОВ ПОД ДАВЛЕНИЕМ В MOLDEX3D R13

**Ш**ирокое распространение систем инженерных расчетов для литья термопластичных материалов под давлением обусловлено сложностью этого технологического процесса, большим количеством факторов, влияющих на качество получаемых изделий, а также высокой стоимостью литьевых форм. Расчетная система Moldex3D, разрабатываемая тайваньской компанией CoreTech System, хотя и стартовала существенно позже своих конкурентов (первая версия появилась лишь в 1995 г.), сумела в последние годы не только выйти на уровень лидеров, но и обойти их по целому ряду функциональных возможностей.

Одной из особенностей продуктов Moldex3D является ориентация на 3D-моделирование, интуитивно более

понятное начинающим пользователям по сравнению с 2,5D-методами и предоставляющее большие возможности для совершенствования моделей технологического процесса. Разработчикам Moldex3D удалось преодолеть известные проблемы 3D-метода [1], обусловленные главным образом длительностью 3D-расчетов, с помощью метода конечных объемов и новаторских подходов для оптимизации сетки с учетом специфики поведения расплава полимерного материала при течении и охлаждении в условиях литья под давлением. Этому способствовало развитие технологии параллельных вычислений и повышение быстродействия общедоступных компьютеров.

Рассмотрим основные функциональные возможности продуктов версии Moldex3D R13 для моделирования литья

под давлением термопластичных материалов и специальных технологий литья, а также наиболее важные изменения [2] по сравнению с их предыдущей версией.

### Подготовка модели

К сильным сторонам продуктов Moldex3D относится технология быстрой подготовки 3D-сетки для модели литьевого изделия и формы в программном модуле *Designer*, которая облегчает освоение продукта начинающим пользователям. Предусмотрены возможности импорта модели из CAD-систем (с использованием форматов STEP, STL, IGES, Parasolid, NX, CATIA, Rhinoceros, Creo и пр.), а также быстрого построения моделей холодноканальной, горячеканальной или комбинированной литниковой системы и системы охлаждения

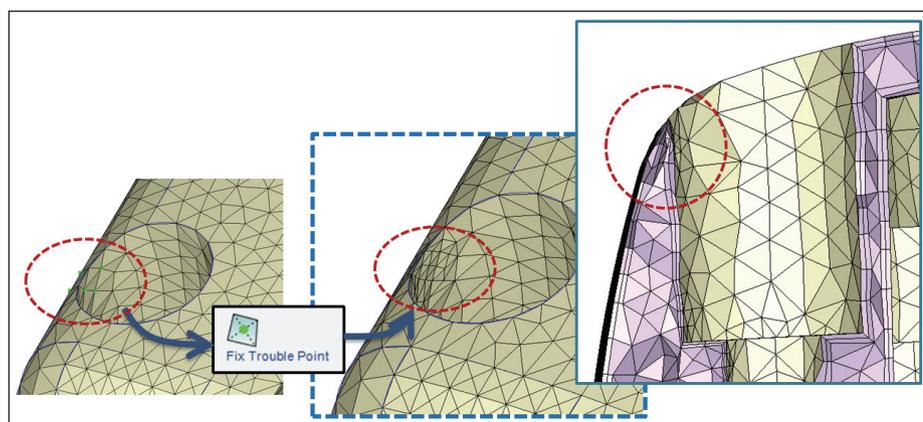


Рис. 1. Автоматическое улучшение сетки в проблемной области

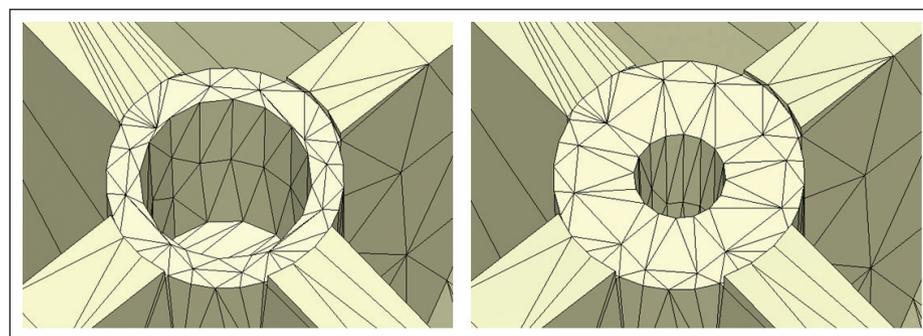


Рис. 2. Изменения толщины участка модели

литьевой формы на основе запатентованной методики с применением твердотельных примитивов.

Библиотека впускных литниковых каналов содержит широкий набор вариантов конструкций с 3D-течением для центрального, точечного, торцевого, веерного, накладного, туннельного и других впускных литниковых каналов. Модель горячеканальной литниковой системы может включать запирающиеся сопла, в том числе для технологии литья "с последовательным впуском" ("каскадного литья"), в которой запорные клапаны сопел открываются и закрываются в определенной последовательности. 3D-модель литниковой системы отражает практически все особенности реальной конструкции, например, ловушку холодной капли в центральном литниковом канале. В новой версии Moldex3D R13 модель отливки может содержать прибыль для всех моделируемых технологических процессов (прибыль относится к стандартным элементам конструкции при литье деталей оптического назначения).

Технология быстрого построения модели литьевой формы предусматривает автоматическое создание модели охлаждающих каналов с соединительными

шлангами, нагревательных элементов, вставок детали (извлекаются из формы при выталкивании отливки), вставок формы, металлических деталей горячего канала. Модели элементов системы нагрева и охлаждения, а также других деталей формы могут быть импортированы из CAD-систем.

К нововведениям версии Moldex3D R13 относится автоматическое построение в модуле *Cooling Channel Designer* так называемых конформных каналов охлаждения, расположенных эквидистантно от поверхности изделия, которая имеет сложную геометрию.

В режиме *eDesign* модуля *Designer* пользователь может выбрать один из пяти вариантов построения 3D-сетки, что позволяет оптимизировать модель в отношении точности и длительности расчетов для решения конкретной задачи.

Дальнейшее развитие в версии Moldex3D R13 получили методы улучшения и модификации построенной 3D-сетки, снижающие трудоемкость "доводки" модели. К полезным нововведениям относятся функции восстановления недостающих частей, устранения закруглений, "сшивания" сеток на контактирующих поверхностях, а также новый метод автоматического улучшения сетки в про-

блемной области (рис. 1). К уже имеющимся возможностям изменения пользователем толщины участков модели на готовой сетке добавлено изменение толщины бобышек (рис. 2).

В новой версии расширен функционал модуля *Designer* для подготовки комбинированных BLM-сеток, содержащих слои тонких призматических элементов в пристенной области литьевого канала, что позволяет точнее определять толщину застывшего поверхностного слоя и диссипативного тепловыделения при течении полимерного расплава, используя существенно меньшее количество элементов сетки. Одним из преимуществ метода конечных объемов являются расширенные возможности комбинирования различных типов элементов при моделировании процессов течения расплава [3].

Модуль *Mesh* позволяет управлять созданием 3D-сеток из тетраэдральных, гексаэдральных, пирамидальных, призматических и других элементов. Построение сетки в этом случае осуществляется с помощью *Rhinoceros* (соответствующая лицензия поставляется в составе лицензии на *Moldex3D*).

### Стадии заполнения, уплотнения и охлаждения в форме

Моделирование заполнения формы расплавом в модуле *Flow* может выполняться при постоянной объемной скорости впрыска или с использованием профиля скорости впрыска для различных условий переключения на режим управления давлением. Моделирование 3D-течения расплава в литниковой системе позволяет учесть неравномерное распределение температуры в литниковых каналах, связанное с явлением нестационарности течения (зависимостью температуры расплава от времени) и оказывающее очень большое влияние на качество изделий, получаемых в многогнездных холодноканальных и горячеканальных формах. В модели течения расплава учитывается его сжимаемость, диссипативное тепловыделение, влияние гравитации (последнее важно для изделий повышенной толщины) и других факторов. Имеется возможность моделирования кристаллизации полимера при охлаждении, включая ориентационную кристаллизацию.

Моделирование стадии заполнения формы может проводиться с учетом вытеснения воздуха потоком расплава. При этом рассчитывается остаточное давление воздуха при его запирации в

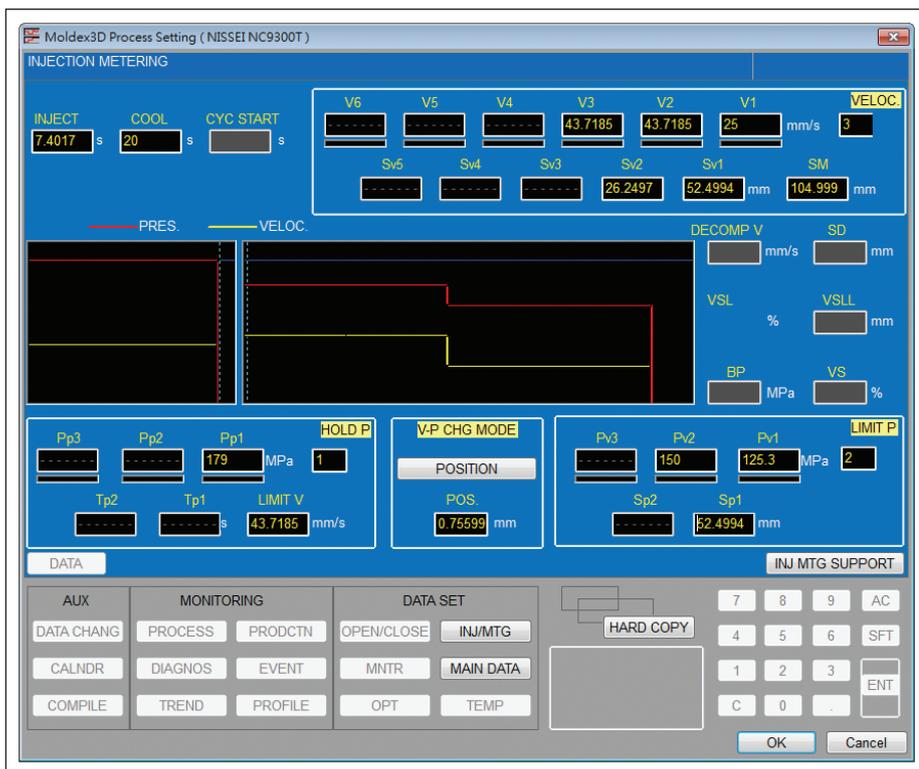


Рис. 3. Задание технологических условий моделирования процесса литья с использованием интерфейса системы управления литейной машины NISSEI NC9300T

оформляющей полости и температура полимерного материала, что позволяет оценить опасность эффекта дизеля (подгорания материала при быстром повышении давления воздуха в полости) и других проблем, вызванных ошибками в конструкции системы вентиляции формы.

Одной из интересных возможностей продуктов Moldex3D является способ задания технологических условий, при котором воспроизводится интерфейс системы управления литейной машины (рис. 3). В новой версии увеличено количество поддерживаемых систем управления.

В результате расчета стадии заполнения пользователь получает подробную информацию о характеристиках полимерного материала в литниковой системе и оформляющей полости, в том числе о распределении температуры и давления, напряжениях и скорости сдвига, линейной скорости течения, толщине застывшего пристенного слоя, времени охлаждения, вязкости, плотности, расположении линий спаива на поверхности изделия, температуре расплава при образовании спаев, а также о зависимости от времени давления, распорного усилия и пр. Среди новых результатов версии Moldex3D R13 – поверхности контакта потоков при образовании спаев (рис. 4),

позволяющие точнее определить места спаев и выявить случаи негативного влияния сетки на их прогнозирование.

Моделирование стадии заполнения предоставляет возможность предотвратить недолив, облой, возникновение подгаров и ряд других дефектов литейных изделий, обусловленных проблемами этой стадии процесса литья под давлением.

Расчет стадий уплотнения и охлаждения отливки в форме выполняется в модуле *Pack* для заданных профиля давления выдержки и времени выдержки на охлаждение. Основным результатом расчета стадии уплотнения является распределение объемной усадки полимерного материала, что позволяет выявить и устранить проблемы, связанные с недоуплотнением (утяжины, внутренние усадочные полости и др.), переуплотнением (залипание отливки в форме и пр.) и неравномерным уплотнением (коробление, дефекты текстуры, неравномерный блеск и др.).

### Нагрев и охлаждение литейной формы

Расчет тепловых процессов в литейной форме при ее нагреве и охлаждении может выполняться для стационарного и нестационарного вариантов. При стационарном расчете в модуле *Cool* моделируется процесс теплопереноса между

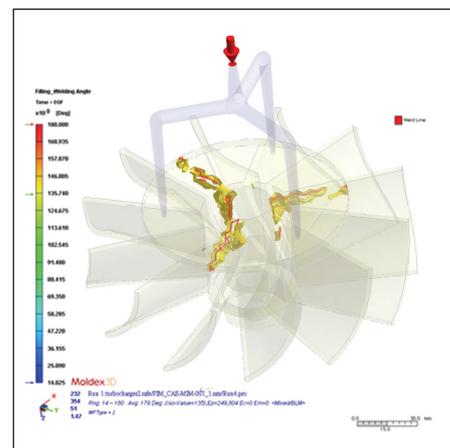


Рис. 4. Поверхности контакта потоков при образовании спаев и прогнозируемые линии спаива

отливкой и формой с учетом конструкции системы охлаждения, материалов формы, свойств хладагента, метода управления температурой формы и других факторов, влияющих на процесс отвода тепла от отливки, но расчет выполняется для средней температуры в литейном цикле. Такой расчет позволяет учесть влияние неравномерности охлаждения на поведение полимерного материала в литейной форме, оптимизировать конструкцию охлаждающих каналов и технологический режим охлаждения и я

(расход и температуру хладагента и пр.) для обеспечения эффективного и равномерного охлаждения отливки и сокращения цикла литья. На основе расчета могут быть определены требования к термостату формы. В новой версии расширены возможности задания режима управления температурой нагревателей, а также добавлен расчет предварительного нагрева литейной формы при "плавном пуске" процесса.

Нестационарный расчет охлаждения литейной формы в модуле *Transient Cool* позволяет учесть изменения температуры формы в литейном цикле. Этот модуль также предусматривает расчет при нагреве и охлаждении формы в каждом цикле литья (литье под давлением с вариотермическим термостатированием) для различных способов нагрева.

На практике нередко применяются системы охлаждения литейных форм, включающие охлаждающие каналы сложной геометрии, например, различные турбулизаторы, широкие каналы, а также каналы произвольной формы, подходящие для "конформного" охлаждения (при котором геометрия охлажда-

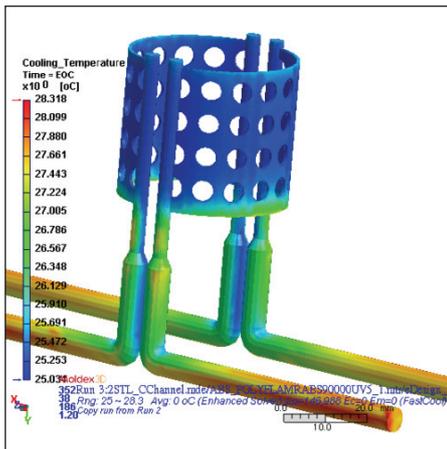


Рис. 5. Температура поверхности охлаждающих каналов при сложном 3D-течении в системе охлаждения пуансона

ющих каналов повторяет геометрию оформляющей полости). Расчет систем охлаждения такого рода можно выполнить с помощью модуля *3D Coolant CFD*, в котором моделируется 3D-течение хладагента (рис. 5), что позволяет выявить застойные зоны, а также области неэффективного охлаждения и обеспечить равномерность охлаждения литейного изделия. В версии *Moldex3D R13* могут быть заданы несколько мест входа и выхода хладагента.

Влияние тепловых процессов в металлических деталях горячеканальной литниковой системы на равномерность температуры расплава может быть рассмотрено при расчете с использованием модуля *Advanced Hot Runner*. Этот модуль позволяет оптимизировать конструкцию и мощность нагревателей сопел и распределителя и оценить эффективность регулирования температуры на входе в оформляющую полость. В новой версии

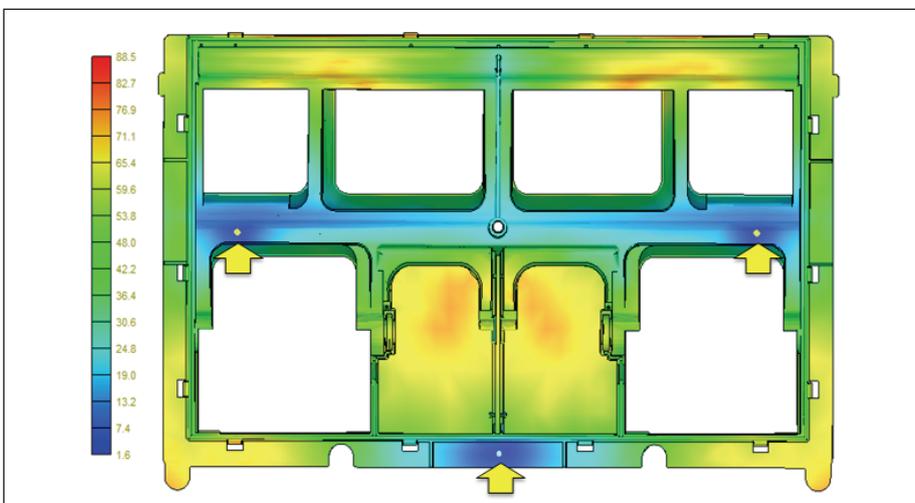


Рис. 6. Результат автоматического выбора мест впуска

добавлена возможность быстрого получения распределения температуры в отдельных металлических компонентах горячеканальной литниковой системы.

### Усадка, коробление и остаточные напряжения

В модуле *Warp* выполняется 3D-расчет напряженно-деформированного состояния отливки в закрытой форме и после ее извлечения из формы. Характеристиками этого напряженно-деформированного состояния являются технологическая усадка (уменьшение линейных размеров), коробление (отклонение формы изделия) и остаточные напряжения, которые подразделяются на термические напряжения и напряжения, определяемые течением расплава при определении формы. При расчете учитываются деформации отливки в форме, включая коробление в форме в пределах зазора, возникающего из-за усадки в направлении толщины, и процесс релаксации напряжений в полимерном материале. Определение причин коробления производится на основе результатов расчета компонентов коробления, вызванного различными факторами, такими как неравномерность объемной усадки, охлаждения отливки или ориентации волокнистого наполнителя. В версии *Moldex3D R13* можно определить параметры корректировки размеров литейной полости в направлении координатных осей для устранения размерного брака, вызванного неравномерностью усадочных процессов.

Большое влияние на усадочное поведение литейных изделий и стабильность размеров при хранении и эксплуатации оказывают вязкоупругие свойства тер-

мопласта, что может быть учтено в модуле *Viscoelasticity* на основе различных линейных и нелинейных моделей вязкоупругости.

### Учет деформаций деталей литейной формы

Неравномерность распределения давления расплава в оформляющей полости на стадии заполнения является причиной деформаций деталей формы и может оказывать негативное влияние на качество получаемых изделий при литье под давлением.

Модуль *Multi-Component Molding* позволяет не только выполнить моделирование деформаций знаков и пуансонов под действием градиента давления расплава, но и учесть влияние этих деформаций на течение расплава.

Более широкие возможности для моделирования деформаций литейной формы предоставляет модуль *Stress*. В версии *Moldex3D R13* этот модуль включает расчет деформаций и напряженного состояния формообразующих деталей под действием давления расплава на стадии заполнения, а также тепловой нагрузки при охлаждении отливки.

### Автоматическая оптимизация

В модуле *Designer* версии *Moldex3D R13* добавлен метод оценки оптимального расположения впусков на основе учета отношения длины затекания расплава к толщине (рис. 6), при этом некоторые места впуска могут быть предварительно заданы пользователем.

Модуль *Expert* содержит различные методы решения оптимизационных задач, которые могут применяться для выбора положения впусков, оптимизации конструкции изделия и литниковой системы формы, профилей скорости впуска и давления выдержки. Этот модуль включает также комплекс методов оптимизации при использовании планирования эксперимента с возможностью широкого выбора контролируемых факторов, выходных характеристик и планов эксперимента.

### Разрушение и ориентация наполнителя

С помощью модуля *Fiber* можно учесть влияние разрушения и ориентации волокнистого наполнителя под действием условий переработки полимерного материала на качество литейных изделий. Конечная длина волокна (например, стеклянного или углеродного) в литевом изделии относится к числу важней-

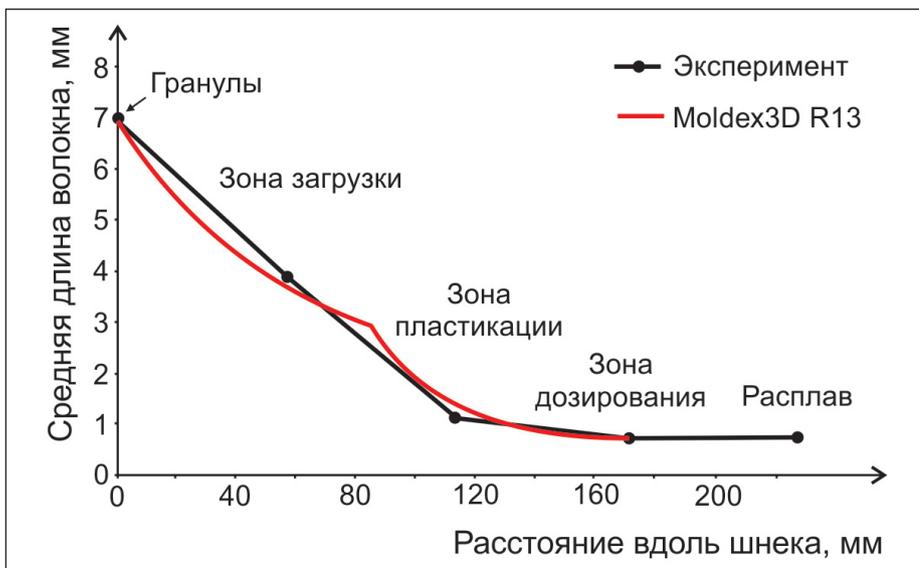


Рис. 7. Сравнение экспериментальных данных и результатов моделирования разрушения волокна в зонах шнека под действием факторов стадии пластикации при переработке полипропилена, содержащего 40% длинного стекловолокна

ших факторов, определяющих его механические свойства и поведение при усадке или механическом нагружении. Модуль *Fiber* позволяет спрогнозировать разрушение волокнистого наполнителя в литевой форме на стадии заполнения под действием течения расплава. Одним из наиболее интересных нововведений в Moldex3D R13 является моделирование разрушения длинного и короткого волокна в материальном цилиндре литевой машины на стадии пластикации для заданных геометрических параметров шнека и скорости вращения при пластикации (рис. 7). Возможность такого расчета важна для корректного прогнозирования усадки, коробления и остаточных напряжений (рис. 8), поскольку наибо-

лее интенсивное разрушение частиц волокна происходит именно на стадии пластикации.

Модуль *Fiber* включает расчет ориентации длинного и короткого волокнистого наполнителя, а также частиц наполнителя в виде пластинок (слюды, чешушки алюминия и пр.) в оформляющей полости на стадиях заполнения и уплотнения. Пользователь может оценить неравномерность концентрации наполнителя в отливке из-за явления миграции его частиц при течении расплава. Модуль *Fiber* также позволяет спрогнозировать на основе различных микромеханических моделей анизотропные свойства композита, например, продольный и поперечный модули упругости и пр.

### Оптические характеристики

В модуле *Optics* можно спрогнозировать оптические характеристики литевых изделий, такие как показатель преломления, двойное лучепреломление, и составить интерференционную картину для заданной длины волны источника света. Полученные результаты могут быть экспортированы в программный продукт CODEV и использованы в дальнейшем для расчета оптических систем.

### Термообработка и поведение литевого изделия при эксплуатации

Технологический процесс термообработки, применяемый с целью снижения остаточных напряжений и повышения стабильности размеров литевых изделий, позволяет смоделировать модуль *Stress*. В версии Moldex3D R13 такие расчеты могут выполняться для одного или нескольких циклов термообработки.

3D-расчет поведения литевого изделия при эксплуатации с учетом остаточных напряжений может производиться с помощью этого же модуля для различных условий нагружения.

### Специальные технологии литья

В версии Moldex3D R13 расширены возможности моделирования специальных технологий литья.

Модуль *Multi-Component Molding* применяется для моделирования литья под давлением с металлическими, полимерными и другими закладными элементами. В этом модуле также можно выполнить расчет двухкомпонентного и двухцветного литья под давлением при последовательном впрыске компонентов в одном литевом цикле. Одновремен-

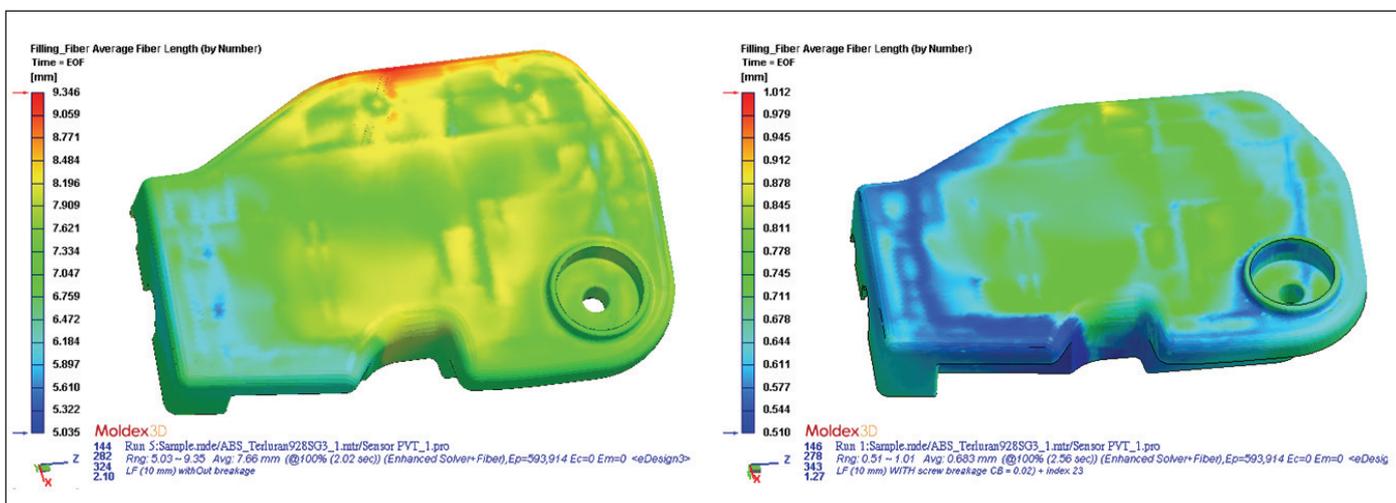


Рис. 8. Результаты расчета среднечисловой длины стекловолокна без учета (а) и с учетом (б) его разрушения при пластикации (в обоих случаях учитывается разрушение волокна в литниковой системе и оформляющей полости)



Рис. 9. Вывод информации о ходе расчета на экран мобильного телефона

ная подача компонентов через различные места впуска моделируется с помощью модуля *Bi-Injection*. Модуль *Co-Injection* предназначен для моделирования сэндвич-литья.

Расчеты литья с газом в модуле *Gas-Assisted Injection* включают моделирование растекания полимерного расплава на стадии заполнения, движения газа в расплаве, вытеснения газом расплава в незаполненные части оформляющей полости или в прибыль (соответственно в технологии с неполным впрыском или с прибылью), а также уплотнения газом полимерного материала. При расчете литья с водой в модуле *Water-Assisted Injection* моделируется течение расплава полимерного материала на стадии заполнения, движение воды в полимерном расплаве, уплотнение полимерного расплава давлением воды.

Расчет инжекционно-компрессионного формования (литья с подпрессовкой) с возможностью подпрессовки на стадиях заполнения, уплотнения и охлаждения в форме может быть выполнен с помощью модуля *Injection Compression*.

Расчет литья с микровспениванием выполняется в модуле *MuCell* для технологического процесса, разработанного компанией Trexel. Моделирование включает расчеты стадий заполнения, уплотнения и охлаждения в форме для разных вариантов технологии, в том числе при увеличении объема полости после ее заполнения расплавом (core-back) с помощью подвижного знака или пуансона.

Расчет литья под давлением высоконаполненных композиций на основе металлических и керамических порошков с органическим или полимерным связую-

щим (технологии Metal Injection Molding и Ceramic Injection Molding) выполняется в модуле *Powder Injection Molding*. Моделирование технологического процесса производится с учетом скольжения расплава относительно стенки и миграции частиц наполнителя при течении расплава (последнее позволяет спрогнозировать неравномерность распределения наполнителя в отливке под действием факторов переработки).

### Базы данных

База данных Moldex3D R13 содержит более 7000 марок полимерных материалов. Эти продукты включают также базы данных по характеристикам литьевых машин, хладагентам и материалам литьевых форм. Пользователь может создавать и редактировать свои базы данных.

« Разработчикам Moldex3D удалось преодолеть известные проблемы 3D-метода, обусловленные главным образом длительностью 3D-расчетов, с помощью метода конечных объемов и новаторских подходов для оптимизации сетки с учетом специфики поведения расплава полимерного материала при течении и охлаждении в условиях литья под давлением

### Интеграция и обмен данными с системами CAD и системами инженерных расчетов

Модуль *eDesignSYNC* включает полностью интегрированные пре-/постпроцессоры для CAD-систем NX, SolidWorks и Creo. С помощью этого модуля можно подготовить и запустить расчеты, а также просмотреть результаты непосредственно в системе CAD.

Экспорт результатов расчета в системы ABAQUS, ANSYS, LS-DYNA, MSC Marc, MSC Nastran, NX Nastran, NE Nastran и Radioss обеспечивается модулем *FEA Interface*. В версии Moldex3D R13 расширен перечень экспортируемых результатов, а также появились

новые возможности "наложения" результатов на сетку, учитывающие ее особенности в конкретной системе инженерных расчетов.

Модуль *Micromechanics Interface* позволяет экспортировать результаты расчета для композитов (в модуле *Fiber*), а также характеристик пористой структуры (в модуле *MuCell*) в продукты Digimat компании e-Xstream Engineering и Converse компании PART Engineering.

### Параллельные вычисления и управление расчетами

Технология параллельных вычислений, реализованная в продуктах Moldex3D R13, позволяет значительно сократить время, необходимое для расчета. В новой версии повышена скорость вычислений и улучшена система управления расчетами, а также добавлена возможность вывода информации о ходе расчетов в браузер персонального компьютера или устройства мобильной связи (рис. 9).

Авторы выражают благодарность компании CoreTech System за предоставленную информацию и иллюстрации.

### Литература

1. Барвинский И., Барвинская И. Компьютерный анализ литья: Подходы и модели // Пластикс, 2009. № 3. — С. 50-54; № 4. — С. 63-66.
2. Moldex3D R13.0 release note. CoreTech System Co., Ltd., 2014. — 64 p.
3. Kennedy P.K., Zheng R. Flow analysis of injection molds. 2 nd edition. Hanser, 2013. — 350 p.

Игорь Барвинский,  
главный специалист отдела САПР  
и инженерного анализа  
ЗАО "CuSoft"  
Тел.: (495) 913-2222  
E-mail: ibarvinsky@csoft.ru

Александр Пирогов,  
ассистент кафедры технологии  
приборостроения  
Университет ИТМО  
Тел.: (812) 233-5898  
E-mail: avpir@mail.ru