

## Моделирование заполнения расплавом пресс-форм литья под давлением

Одна из главных особенностей изготовления отливок при литье под давлением – кратковременность заполнения рабочей полости пресс-формы расплавом, что является одной из причин образования, во многих случаях недопустимой, сосредоточенной газоусадочной пористости в отливках.

Традиционно такие дефекты исключают путем обеспечения равномерности толщины стенок отливки, выбором места подвода расплава, расположением и объемом промывников, конструкцией вентиляционной системы и другими технологическими приемами. При разработке технологии изготовления простых по геометрии отливок оптимальные параметры обычно достигаются уже на этапе проектирования использованием справочной и другой технической литературы. При решении этой задачи для сложных по геометрии отливок часто приходится прибегать к значительному объему работ по отладке технологического процесса, что во многих случаях требует доработки пресс-форм.

С целью сокращения операций по отладке технологических процессов в настоящее время все шире используются пакеты прикладных программ группы САЕ, которые позволяют моделировать процессы, происходящие в литейной форме во время ее заполнения расплавом, и последующие этапы формирования отливки.

На кафедре «Литейные технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана для расчета параметров литниковой, промывниковой и вентиляционной систем используется пакет прикладных программ Flow-3D. Описание пакета можно найти в работе [1], в данной статье отметим только

те его возможности, которые важны именно при литье под давлением: учет торможения потока расплава газом, находящимся в форме; учет замешивания газа в расплав; моделирование свободной поверхности расплава, что важно при турбулентном и дисперсном заполнении пресс-формы; расчет кавитации.

Прежде чем приступить к моделированию процессов, происходящих при формировании отливок со сложной конфигурацией, необходимо убедиться в том, что выбранный пакет программ адекватно описывает процесс литья под давлением. Для этого провели ряд расчетов и сравнили результаты с экспериментальными данными.

В работе [2] приведены экспериментальные данные о заполнении расплавом простых полостей формы. В работах Л. Фроммера, как отмечено в работе [2], характер заполнения зависит от отношения площадей поперечных сечений питателя и отливки. Однако в работе [2] также отмечено, что такая связь не учитывает объемных перемещений потока в полости формы, и предлагается заполнение характеризовать отношением толщины питателя  $\delta_{\text{пит}}$  к толщине отливки  $\delta_{\text{отл}}$ . В зависимости от скорости расплава и отношения  $\delta_{\text{пит}}/\delta_{\text{отл}}$  предлагаются три вида заполнения формы после удара струи о преграду: ламинарное, турбулентное и дисперсное.

Для моделирования, как и в работе [2], была выбрана отливка в форме плиты габаритами  $L=0,085$ ,  $B=0,04$  и  $\delta_{\text{отл}}=0,01$  м. Вид отливки и ее чертеж показаны на рис.1.

Расположение отливки в форме вертикальное.

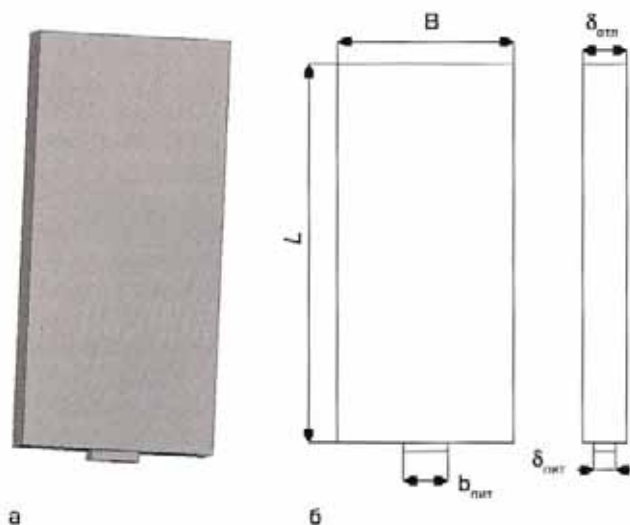


Рис. 1. Вид отливки (а) и ее чертеж (б)

Расплав подводится снизу через прямоугольный питатель, который расположен симметрично относительно нижнего торца отливки.

В расчетах  $\delta_{пит}$  составляла 0,0025 м и 0,005 м, тогда  $\delta_{пит}/\delta_{отл} = 0,25$  и 0,5. В расчетах также изменяли ширину питателя  $b_{пит}$ , что позволяло оценить влияние площади впуска на характер заполнения расплавом полости формы.

Начальным условием являлась скорость расплава на входе в питатель  $\vartheta_{пит}$ , которая менялась в диапазоне от 1 до 100 м/с.

На рис. 2 приведены наиболее типичные резуль-

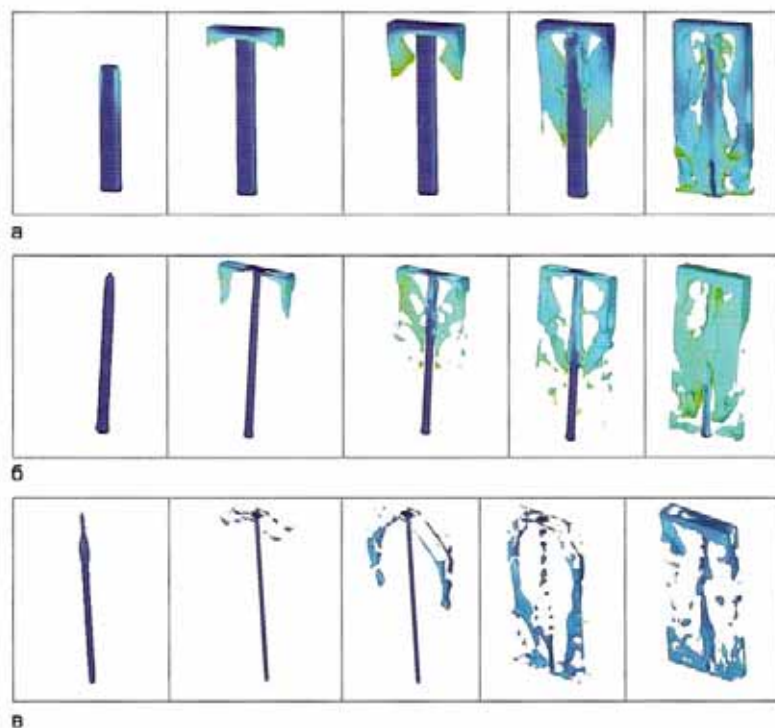


Рис. 2. Результаты расчетов характера заполнения при  $\vartheta_{пит} = 30$  м/с, где а -  $\delta_{пит}/\delta_{отл} = 0,5$ ;  $b_{пит} = 0,01$  м; б -  $\delta_{пит}/\delta_{отл} = 0,25$ ;  $b_{пит} = 0,005$  м; в -  $\delta_{пит}/\delta_{отл} = 0,25$ ;  $b_{пит} = 0,0025$  м

таты расчетов, показаны пять отдельных кадров заполнения расплавом пластины при различных значениях  $\delta_{пит}$  и  $b_{пит}$ .

Расчетные данные подтверждают выводы работы [2] о влиянии на характер заполнения отношения  $\delta_{пит}/\delta_{отл}$ . На рис. 2, а, после удара струи о стенку формы образовался гидравлический подпор и турбулентное заполнение. На рис.2, б, после удара о стенку формы струя расплава при движении вниз распадается на отдельные струи, что свидетельствует о дисперсном заполнении.

Сравнивая данные рис.2, б и 2, в, можно сделать вывод о том, что и утверждение Л. Фроммера имеет место. На характер заполнения влияет и отношение площадей поперечных сечений питателя и отливки ( $F_{пит}$  и  $F_{отл}$ ).

**Вывод:** характер движения расплава при неизменных теплофизических параметрах системы «форма-отливка» зависит от скорости впуска, отношения  $\delta_{пит}/\delta_{отл}$  и отношения  $F_{пит}/F_{отл}$ .

Рассмотрим еще одно утверждение работы [2], где приведены данные о том, что при впуске струи с постоянной скоростью из прямого питателя расширение струи невозможно, то есть струя сохраняет постоянство конфигурации и направления.

Однако в работе [3], со ссылкой на других авторов, говорится о том, что дисперсное заполнение формы начинается уже при выходе струи из питателя при определенных скоростях потока. Критические скорости впуска при переходе от разбрызгивающегося потока к распыливающемуся для алюминиевых и магниевых сплавов лежат в пределах от 17,5 до 30 м/с, а для цинковых – от 13 до 22 м/с.

Таким образом, есть 2 точки зрения на характер движения расплава на выходе из питателя. В работе [2] тоже описывается разрушение струи на выходе из питателя, но для этого должны быть возмущающие факторы, среди которых: переменная скорость прессования и давление во время впуска; взаимодействие сил инерции и поверхностного натяжения; противодавление газов в полости формы; особенности конструкции литниковой системы; кавитация.

Для выяснения возможных причин разрушения струи на выходе из питателя была проведена серия вычислительных экспериментов.

### 1. Переменная скорость прессования

В расчетах задавали переменную скорость на входе в питатель. Габариты отливки  $L=0,045$ ,  $B=0,04$  и  $\delta_{отл} = 0,01$  м. Питатель размерами  $\delta_{пит} = 0,0025$  м и  $b_{пит} = 0,0025$  м. Результаты моделирования показаны на рис.3.

Из рис.3 видно, что свободная струя после выхода из питателя теряет постоянство конфигурации и начинает разрушаться. Таким образом, переменная скорость прессования может разрушить струю расплава после ее выхода из питателя.

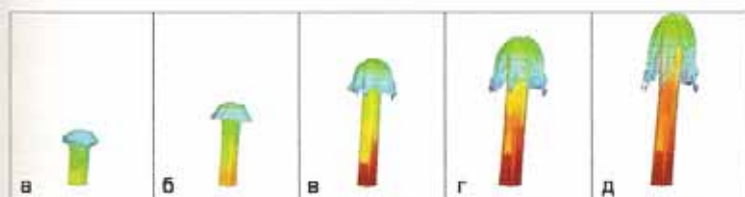


Рис. 3. а-д. Результаты моделирования характера движения расплава при переменной скорости на входе в питатель

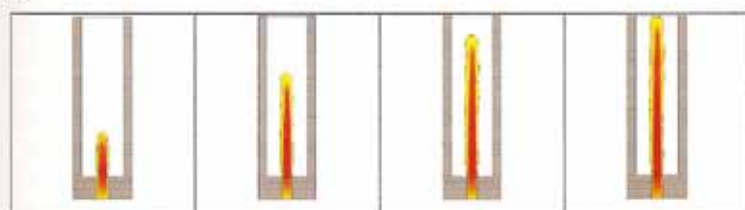
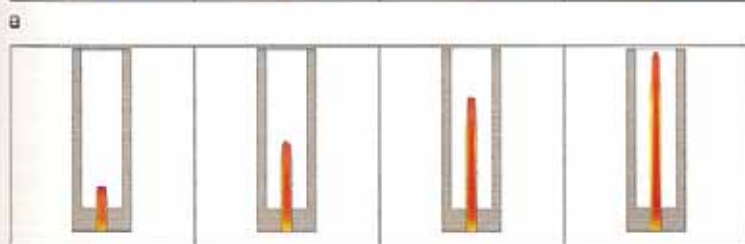
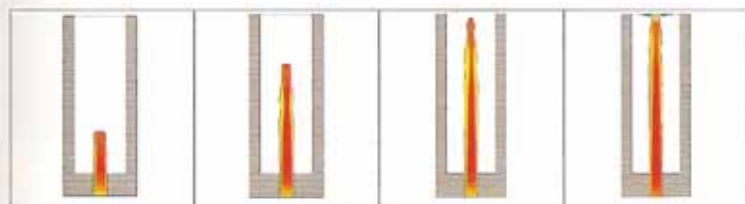


Рис. 4. Результаты моделирования формы струи при переменной скорости на входе в питатель и поверхностном натяжении: а -  $\theta_{пит} = 5$  м/с; б -  $\theta_{пит} = 10$  м/с; в -  $\theta_{пит} = 5$  м/с и  $\sigma = 0,85$  Дж/м<sup>2</sup>



Рис. 5. Влияние на форму струи противодействия газа при различных скоростях на входе в питатель: а -  $\theta_{пит} = 30$  м/с; б -  $\theta_{пит} = 5$  м/с

таты расчетов показаны на рис.4.

Сравнив рис.4, а и б, можно сделать вывод о том, что сила тяжести оказывает влияние на форму свободной струи, и чем меньше скорость, тем сильнее искажение профиля струи. В этих расчетах влияние поверхностного натяжения на характер течения не учитывалось.

Рис.4, а, в показывают, что поверхностное натяжение также влияет на форму струи.

### 3. Противодействие газов в полости формы

Габариты отливки  $L = 0,085$ ,  $B = 0,04$  и  $\delta_{отп} = 0,01$  м. Питатель размерами  $\delta_{пит} = 0,0025$  м и  $b_{пит} = 0,0025$  м. В расчетах использовали модель «газового пузыря», то есть полость отливки заполнена газом. При впуске расплава в полость формы газ сжимается и препятствует свободному движению струи. В расчетах меняли значение  $\theta_{пит}$ . Результаты приведены на рис.5.

Из рис.5 видно, что противодействие газа существенно влияет на форму струи. После впуска в струе возникают сначала синусоидальные колебания, а затем и разрушение струи на отдельные капли. Чем меньше скорость, тем раньше происходит разрушение струи.

### 4. Особенности конструкции литниковой системы

На рис.6 показан вид отливки и ее чертеж.

Габариты отливки  $L = 0,085$  м,  $B = 0,02$  м и  $\delta_{отп} = 0,01$  м. Питатель размерами  $\delta_{пит} = 0,0025$  м и  $b_{пит} = 0,0025$  м. Питатель состоит из двух каналов, в расчетах меняли длину питателя  $l_{пит}$ , что влияет на характер

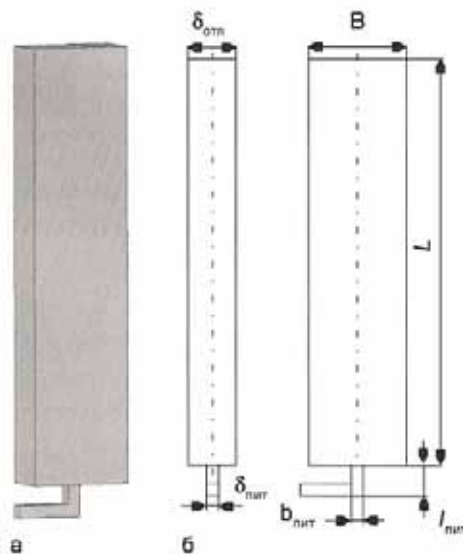
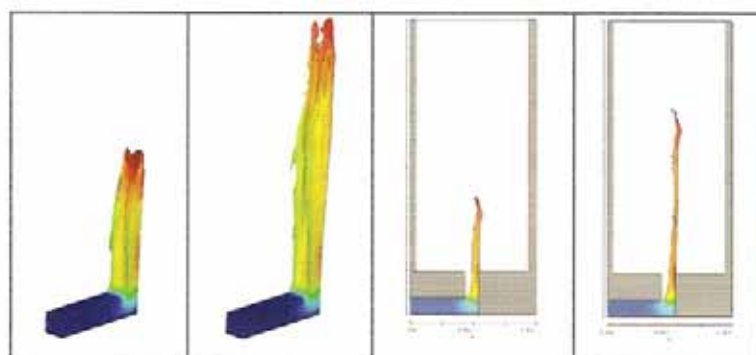


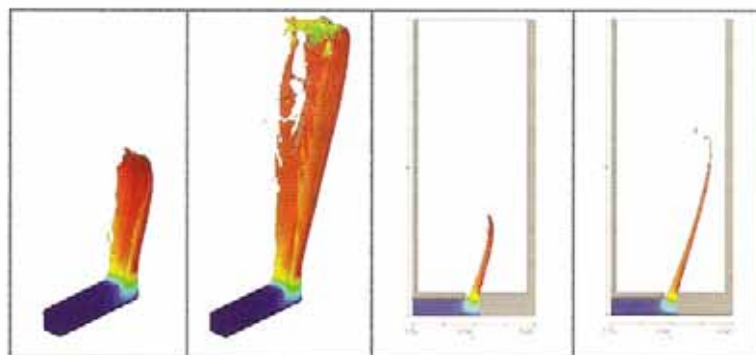
Рис. 6. Вид отливки 2 (а) и ее чертеж (б)

### 2. Силы инерции и поверхностного натяжения

В расчетах задана сила тяжести. Меняли значение коэффициента поверхностного натяжения  $\sigma$  и скорость на выходе из питателя  $\theta_{пит}$ . Габариты отливки и питателя не менялись. Резуль-



а



б

Рис. 7. Влияние длины питателя на движение струи металла на выходе из питателя: а -  $l_{пит} = 0,0065$  м; б -  $l_{пит} = 0,0035$  м

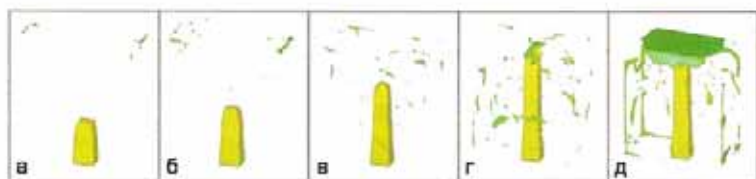


Рис. 8. а-д. Влияние резкого падения давления в литниковой системе на форму струи расплава на выходе из питателя

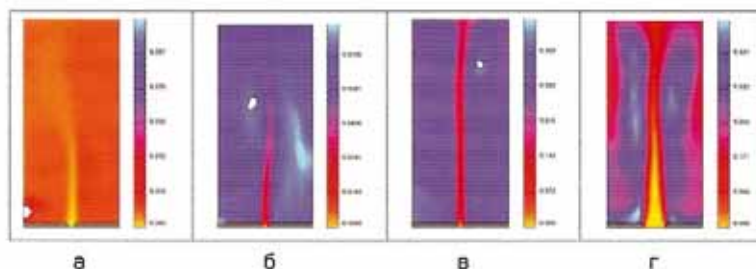


Рис. 9. Влияние скорости впуска на количество газовых включений, где а -  $\vartheta_{пит} = 5$  м/с; б -  $\vartheta_{пит} = 15$  м/с; в -  $\vartheta_{пит} = 50$  м/с; г -  $\vartheta_{пит} = 100$  м/с

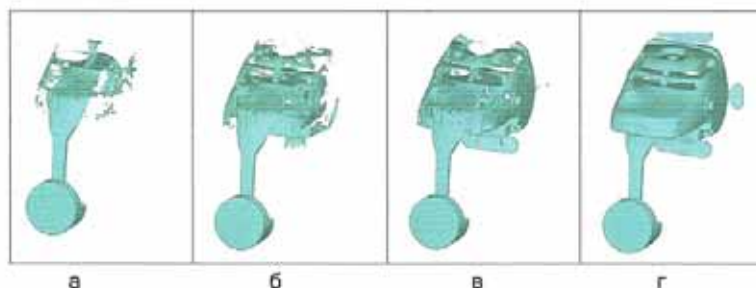


Рис. 10. Моделирование процесса заполнения расплавом пресс-формы при литье под давлением

движения струи – установившийся или нет при выходе из питателя. Скорость  $\vartheta_{пит} = 20$  м/с. Результаты расчетов показаны на рис. 7.

При уменьшении длины питателя движение струи на выходе из питателя становится неустановившимся и струя разрушается.

### 5. Кавитация

По мнению автора работы [2], разрыв впускной струи возможен также из-за резкого падения давления в литниковой системе, приводящего к кавитации. Для моделирования была выбрана расширяющаяся литниковая система. Габариты отливки  $L = 0,04$ ,  $B = 0,02$  и  $\delta_{лит} = 0,01$  м. Результаты расчетов показаны на рис.8.

На рис. 8 хорошо видно, как из основного потока вырываются отдельные струйки расплава и ударяются о стенки формы.

### Выводы

1. Расчеты подтвердили утверждение автора работы [2] о возможных причинах разрушения потока расплава на выходе из питателя.

2. Дисперсное заполнение формы уже при выходе струи из питателя [3] возможно лишь при наличии возмущающих факторов.

В заключение рассмотрим проблему замешивания газов в движущийся расплав. Известно, что чем меньше скорость впуска, тем крупнее газовые включения в расплаве (конечно, если не обеспечить требуемый газоотвод). Когда к отливке предъявляется требование по герметичности, то рекомендуют дисперсное заполнение расплавом полости формы. В этом случае газовые включения очень малы и не так сильно влияют на служебные свойства отливки.

Провели серию вычислительных экспериментов, в которых задано, что вентиляция формы отсутствует. Тогда весь газ, находящийся в форме, должен попасть в расплав. В расчетах меняли скорость впуска  $\vartheta_{пит}$ . Результаты расчетов представлены на рис.9.

Результаты моделирования соответствуют практике. С увеличением скорости впуска все больше газов замешивается в расплав, а размер газовых включений уменьшается.

### Заключение

Пакет прикладных программ Flow-3D адекватно описывает основные процессы при литье под давлением и в настоящее время широко используется специалистами кафедры «Литейные технологии» при разработке техпроцессов изготовления отливок литьем под давлением, в кокиль, под низким давлением и др.

В качестве примера на рис. 10 показан

процесс моделирования заполнения расплавом пресс-формы при литье под давлением.

### Список литературы

1. **Вольнов И.Н.** Системы автоматизированного моделирования литейных процессов – состояние, проблемы, перспективы // Литейщик России. – 2007. – №6.

2. **Белопухов А.К.** Технологические режимы литья под давлением. – М.: Машиностроение, 1985. – 272 с.

3. **Ноговицин Б. Ф.** Основы расчета и проектирования машин для литья под давлением. Иркутск: Иркут. ун-т, 1987. – 128 с.