

УДК 621.74

Самарай В.П., Авдокушин В.П., Дорошенко С.П. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КРАЕВЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ ИМИТАЦИОННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ УПЛОТНЕНИЯ ФОРМ И СТЕРЖНЕЙ.

НТУУ “Киев. политехн. ин-т”

При разработке технологии изготовления литейных форм необходимо оценивать влияние размеров и сложности конфигурации моделей и стержней на качество уплотнения формовочного материала с целью обеспечения заданной степени уплотнения смеси в трудноуплотняемых и труднодоступных местах (карманы, узкие полости, граничащие с оснасткой слои смеси, поверхностные слои и слои, удаленные от источника нагружения).

До настоящего времени не исследованы закономерности распределения сдвиговых напряжений по сечению формы (стержня), связанных с силами внутреннего и внешнего трения при уплотнении, и отсутствуют методики их моделирования при расчетах и выборе режимов уплотнения и свойств смесей, что необходимо для полноценной реализации методики 2- и 3-мерного имитационного моделирования уплотнения форм и стержней [1, 2].

Процедура имитационного моделирования уплотнения литейных форм и стержней предусматривает в соответствии с принципом декомпозиции условное разделение объема уплотняемого формовочного материала на элементарные ячейки обычно кубической или призматической формы и последующий расчет их деформации и взаимного относительного перемещения под действием внешних уплотняющих сил [3, 4]. Каждый элементарный объем формовочного материала при этом рассматривается как реологическое тело, деформация которого описывается соответствующим реологическим уравнением с определенными параметрами (вязкость, предельное напряжение сдвига, упругость). С целью учета влияния взаимодействия каждого элементарного объема с соседними элементами или поверхностями оснастки необходимо проанализировать сдвиговые напряжения, возникающие по контактирующим поверхностям элементарных ячеек и обуславливающие краевые эффекты, проявляющиеся как градиенты напряжений и соответственно деформации, вид которых неизвестен, а экспериментальное определение практически невозможно или вызывает значительные трудности.

По характеру контактирующих поверхностей, очевидно, следует рассматривать два вида взаимодействия:

- между жесткой поверхностью оснастки и формовочным материалом, когда на контактирующей поверхности элементарной ячейки возникают силы внешнего трения;
- на сопряженных поверхностях соседних элементарных объемов формовочного материала, т.е. его внутреннее трение.

Как известно, силы трения материалов зависят от нормальных давлений на контактирующие поверхности и оцениваются эффективным коэффициентом трения.

Вероятно нельзя считать, что сила трения возникает только у граничных элементов, а внутренние перемещаются и уплотняются абсолютно синхронно и одинаково, не испытывая трения между собой. Такое явление возможно только в начале процесса уплотнения, когда значения боковых давлений еще слишком малы, и такой подход может использоваться только для расчета насыпной плотности.

Решение задачи оценки краевых эффектов при имитационном моделировании уплотнения форм можно выполнить, исходя из следующих допущений. Возможны два крайних случая:

1. Полагаем, что тормозятся только граничные элементы о стенки оснастки, при этом принимается, что их сдвиговое напряжение и сила трения максимальны среди других элементов в сечении и в состоянии покоя соответствуют текущим значениям уплотняющих сил, при чем максимально предельному напряжению сдвига, а в состоянии движения — несколько



меньше его. Принимается также допущение, что не только срединные, а и все промежуточные элементы движутся и уплотняются одинаково и синхронно, это означает, что не только по срединной плоскости, которая находится между срединными элементами, а и по всем плоскостям, за исключением граничных, силы трения отсутствуют. Соответственно для этого случая эпюра будет представлять собой ступенчатую зависимость сдвиговых напряжений и сил трения на сопряженных поверхностях между крайними (граничными) и следующими за ними внутренними элементарными объемами, т. е. их величины скачкообразно изменяются от некоторого значения до нулевого.

2. Считаем, что силы трения не проявляются только на сопряженных поверхностях элементов, расположенных в центре уплотняемой зоны, которые деформируются и перемещаются синхронно. Таким образом, возле стенок сдвиговое напряжение и сила трения принимаются максимальными аналогично первому случаю. При этом между промежуточными элементами значения силы трения изменяются прямо пропорционально их положению между стенкой и срединной плоскостью или линией (уменьшаются по направлению от стенок оснастки к формовочной смеси для статических методов уплотнения, а для динамических методов уплотнения зависимости имеют гораздо более сложный характер в связи с влиянием вибрации либо встряхивания на внешнее и внутреннее трение с учетом пространственной зависимости явления затухания волн, передаваемых от боковых стенок оснастки). Соответственно для этого случая эпюра будет представлять собой дискретно-линейные зависимости сдвиговых напряжений и сил трения сопряженных поверхностей элементарных объемов в зависимости от расстояния до стенок оснастки и до срединных плоскостей (линий).

Очевидно, что реальная картина распределения сил трения будет находиться между двумя этими крайними случаями и зависеть от реологических свойств смеси, степени и параметров уплотнения. В общем случае расчет может быть проведен следующим образом.

Имея рассчитанные поля вертикальных и боковых напряжений [1, 2] и приняв за начальные условия первый вариант распределения сил трения (стартовый для насыпной плотности), производится перерасчет значений поля сил трения методом конечных разностей (МКР) за заданное количество итераций, т.е. задав сначала граничным элементам максимальное трение, равное усилию уплотнения, а всем остальным — нулевое значение. Новые значения для текущего t -го момента времени согласно МКР получаются усреднением значений сил трения соседних элементов в предыдущий момент времени ($t-1$):

$$F_{\text{tr}(i,t)} = (F_{\text{tr}(i-1),(t-1)} + F_{\text{tr}(i+1),(t-1)}) / 2 ,$$

где $F_{\text{tr}(i,t)}$ — сила трения элемента в текущий момент времени,
 $F_{\text{tr}(i-1),(t-1)}$ — сила трения левого элемента в предыдущий момент времени,
 $F_{\text{tr}(i+1),(t-1)}$ — сила трения правого элемента в предыдущий момент времени.

Соответственно для этого общего случая моделирования при “промежуточном” (“комбинированном”) распределении эпюра будет представлять собой дискретно-нелинейные зависимости сдвиговых напряжений и сил трения сопряженных поверхностей элементарных объемов в зависимости от расстояния до стенок оснастки и до срединных линий.

С увеличением количества итераций МКР ступенчатый график, соответствующий первой гипотезе, будет неуклонно преобразовываться в нелинейный и асимптотически приближаться к линейному (вторая гипотеза). Таким образом, можно смоделировать и повторить экспериментально полученные значения полей сдвиговых напряжений, сил трения и плотностей для любой формовочной смеси и в любой момент уплотнения.

Очевидно, что чем больше степень уплотнения формы или стержня, тем большим количеством итераций МКР будет адекватно описываться характер распределения значений сил трения и тем ближе соответствующий график по форме будет к линейному, а картина распределения будет ближе ко второй гипотезе.

Предложенная методика дополняет методику моделирования [1, 2].

В разработанной программе трехмерного имитационного моделирования уплотнения форм и стержней реализованы все три описанных варианта (схемы) распределения сдвиговых



напряжений и сил трения в форме (стержне), что дает возможность всестороннего исследования и анализа происходящих процессов.

Использование трех вариантов расчета распределения сдвиговых напряжений и сил трения позволяет адекватно описать поведение формовочной смеси с произвольными реологическими свойствами на протяжении всего процесса уплотнения во всех возможных диапазонах степени и параметров уплотнения.

При необходимости погрешность между предложенными принципами расчета распределения сил трения в имитационной модели и экспериментальными результатами можно устранить, подобрав количество итераций МКР при подборе модели распределения, которое асимптотически будет приближаться к искомому случаю (зависимости); а также подбором поправочных коэффициентов (в качестве последних можно использовать эффективные параметры, значения которых полностью определяются “сверткой” информации о характере процессов (зависимости от плотности) на выше- или нижележащем уровне).

Описанные принципы моделирования и расчета зависимости распределения сдвиговых напряжений и сил трения по сечению формы обеспечивают получение приближенных данных о них между элементарными объемами формовочной смеси при уплотнении форм и стержней. Однако их применение позволяет свести к минимуму влияние субъективных факторов при прогнозировании величин сдвиговых напряжений и сил трения, а также создает удобства при моделировании и оптимизации параметров уплотнения.

Приведенные принципы и методика позволяют оценить и обосновать принимаемые упрощения. Допустимость таких приемов подтверждается успешными расчетами, однако их правомерность и границы применимости могут быть непосредственно установлены качественным и количественным сопоставлением описанных моделей схематизации, в основу которых положены различные способы системного описания принципов и процессов распределения сдвиговых напряжений и сил трения с результатами реальных экспериментов.

Использование представленного системного подхода при эффективной декомпозиции реальных процессов в литейной форме при моделировании и проектировании с последующим применением системы имитационных, реологических, численных, геометрических, информационных и регрессионных моделей приобретает особую значимость для поэтапного решения задач анализа и синтеза литейной технологии.

Возможность численного или аналитико-алгоритмического (имитационного) моделирования распределения сил трения и сдвиговых напряжений в процессе уплотнения формы (стержня) с помощью ЭВМ, отражающая системный характер взаимосвязанных явлений, открывает принципиальный путь решения проблемы системного анализа условий образования многообразных дефектов форм и стержней [5].

Литература

1. Авдокушин В.П. Реологическое моделирование уплотнения форм и стержней вибрацией / Авдокушин В.П., Самарай В.П. // Процессы литья. — 2002. — № 4. — С. 65 — 70
2. Самарай В.П. Трехмерное моделирование уплотнения литейных форм и стержней вибрацией / Самарай В.П., Авдокушин В.П., Дорошенко С.П. // Литейное пр-во на рубеже столетий: Тез. докл. — К.: Ред. журнала “Процессы литья” при участии МП “Информлить”, 2003. — С. 143 — 144
3. Маликов В.Т. Вычислительные методы и применение ЭВМ: Учеб.пособие / Маликов В.Т., Кветный Р.Н. — К.: Вища шк., 1989. — С. 115
4. Кузьменко В.Н. Решение на ЭВМ задач пластического деформирования: Справэ / Кузьменко В.Н., Балакин В.Ф. — К.: Техника, 1990. — С. 73
5. Самарай В.П. Компьютерное прогнозирование и диагностика дефектов отливок на основе моделирования уплотнения формы. / Самарай В.П., Авдокушин В.П., Дорошенко С.П., Мазнюк В.М. // Литейное пр-во. — 2004. — № 9.

