



Список литературы

1. Оболенцев Ф. Д. Точность и качество поверхности отливок. - М.: Машгиз, 1962. - 152 с.
2. Точность отливок / Под ред. Б. Б. Гуляева. - М.: Машиностроение, 1960. - 205 с.
3. Яценко Л. Л. Точность отливок и эффективность литейного производства. - Л.: Машгиз, 1981. - 278 с.
4. Вейник А. И. Термодинамика литейной формы. - М.: Машиностроение, 1968. - 336 с.
5. Вейник А. И. Тепловые основы теории литья. - М.: Машгиз, 1953. - 384 с.
6. Вейник А. И. Техническая термодинамика и основы теплопередачи. - М.: Машиностроение, 1964. - 268 с.
7. Дубинин Н. П., Беликов О. А., Вязов А. Ф. и др. Кокильное литье: Справочное пособие. - М.: Машиностроение. - 1967. - 459 с.
8. Машков А. К. К проблеме кокиля. - Омск: Зап.-сиб. изд-во, 1975. - 108 с.
9. Айзенкольб Ф. Порошковая металлургия. - М.: Металлургиздат, 1959. - 518 с.
10. Карножицкий В. Н. Контактный теплообмен в процессах литья. - Киев: Наук. думка, 1978. - 300 с.
11. Васильев Ф. А. Автоматизация процесса подготовки моделей для быстрого прототипирования // Литейн. пр-во. - 2004. - № 4. - С. 24-25.
12. Васильев Ф. А. Толщина слоя как параметр процесса лазерной стереолитографии // Там же. - 1999. - № 7. - С. 14-16.
13. Васильев В. А., Васильев Н. В. Сравнительный анализ методов быстрого послойного прототипирования // Литейщик России. - 2004. - № 10. - С. 34-40.
14. Васильев В. А., Васильев Н. В. Сравнительный анализ методов быстрого послойного прототипирования // Там же. - 2005. - № 8. - С. 34-39.
15. Тринева Т. Л. Rapid Prototyping (RP). Технологии получения твердотельных 3-D CAD моделей // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - 2004. - № 6 (12). - С. 37-40.

Поступила 11.02.2009

УДК 621.744.362

П. В. Русаков

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВИБРОФОРМОВОЧНЫХ МАШИН С ПЕРЕМЕННОЙ ПРИСОЕДИНЯЕМОЙ МАССОЙ

Рассмотрена модель и разработано устройство для вибрационной формовки с двухконтурной системой регулирования параметров вибрации. Построение реологической модели вибрационного уплотнения сыпучей среды проведено с учетом эффекта динамического перехода двухмассной механической схемы (форма - рабочий орган) к схеме с одной консолидированной массой. Экспериментально обоснован ввод в систему управления функциональных корректирующих звеньев, учитывающих степень и физико-химическую природу загрязнения песка продуктами разложения моделей и его независимым увлажнением. Предложен практический способ управления вибрационной формовкой с циклично линейным заданием частоты вибрации в условиях направленной синхронизации вибровозбудителей рабочего органа.

Розроблено вібраційний стенд для формовки сипких сумішей з двоконтурною системою регулювання параметрів вібрації. Побудова реологічної моделі стенду проведена з урахуванням ефекту динамічного переходу двомасної схеми (форма - робочий орган) до схеми з об'єднаною масою. Експериментально обґрунтовано введення в систему елементів для корекції параметрів вібрації що, враховують ступінь і фізико-хімічну природу змін складу

сипких сумішей. Розроблено практичний спосіб управління вібраційним формуванням з циклічно лінійним заданням частоти вібрації за умов направленої синхронізації збудників вібрації робочого органу.

Device for the compaction by vibration with the double circuit control system of vibration parameters is offered. At the construction of rheological model the principle proceed from two associate masses to one associate mass are applied. An input is experimentally grounded in control the system functional correctings links, taking into account the degree of contamination of sand. The practical method of management the mold consolidation with the cyclic linear task of frequency in the conditions of the directed synchronization of oscillators of the working organ is developed.

Ключевые слова: машина для вибрационной формовки, реологическая модель, параметры вибрации.

Вопросы вибрационной формовки сыпучих песков изучались в работах [1-4] с целью определения оптимальных режимов колебаний литейных форм, обеспечивающих при известных ограничениях высокую степень объемного уплотнения моделей. Литературные данные свидетельствуют о существенных отличиях в методах выбора режимов вибрационного уплотнения, которые, в основном, сводятся к экспериментальному определению параметров частот, ускорений и амплитуд колебаний. Наиболее четко они выражены при анализе по значению критерия Fr^* . В дополнение к существующему неоднозначному пониманию оптимальности режимов вибрационной формовки сыпучих смесей усложняется осмысление процессов при комплексном воздействии на сыпучую среду. Так, к вертикальной вибрации добавляют горизонтальные круговые колебания [5] с расчетом улучшить наполняемость песком труднодоступных мест и внутренних каналов моделей.

Несомненно, все перечисленные подходы к технологии вибрационной формовки вызваны сложностью математического описания движения неоднородной сыпучей среды при постоянном изменении технологических свойств песка в замкнутых оборотных циклах формовки и литья. Вероятно, что эта неоднозначность в решении технологических задач и вызвала интерес у отдельных исследовательских групп к систематизации баз данных по свойствам формовочных смесей и модельно-опочной оснастки, включая подготовку технологических рекомендаций по режимам формовки. По мнению самих разработчиков, такой подход к выбору технологических параметров не будет вызывать математических трудностей [6].

Несмотря на такую универсальность подхода к решению проблемы, сама работа по созданию технологических баз также связана с большой трудоемкостью сбора данных и разработкой критериев оптимизации процесса вибрационной формовки. Что касается применения математических моделей, используемых в инженерных расчетах, то можно заметить, что они являются почти всегда или чисто феноменологическими, или искусственными, и это обуславливает их заведомо ограниченное применение [7-11].

Несомненно, новые подходы к разработке критериев оптимальных режимов вибрационного уплотнения сыпучих формовочных смесей сопряжены с поиском новых, научно обоснованных технических решений.

Трудность проведения исследований и оптимизации режимов динамического уплотнения в двухмассных асимметричных системах заключается в необходимости учета в математических моделях ряда переменных параметров. Необходимо контролировать массу загрузки, определять объем и высоту опоки, модельные коэффициенты гидродинамической сложности и шероховатости поверхности моделей, их размерное и массовое распределение в объеме формы. При этом нельзя не учитывать параметры, характеризующие динамику изменения реологических свойств сыпучей среды при возбуждении массы формовочной среды внешним переменным гармоническим возмущением.

Под действием вибрации происходит непрерывное изменение движения сыпучего материала и объемной плотности. Эти изменения наиболее заметны на открытой поверх-

*число Фруда

ности с амплитудами колебаний в диапазоне 0,3-2,5 мм, если Fg больше единицы. Сыпучая среда переходит в псевдожидкое состояние, которое характеризуется периодическим разрушением структуры уплотненного песка и разрыхлением в отдельных локальных областях модельного пространства. Для процесса вибрационной формовки сложных моделей с передачей колебаний через дно формы (рис. 1) целесообразно объединение нескольких режимов в одном цикле вибрационного воздействия.

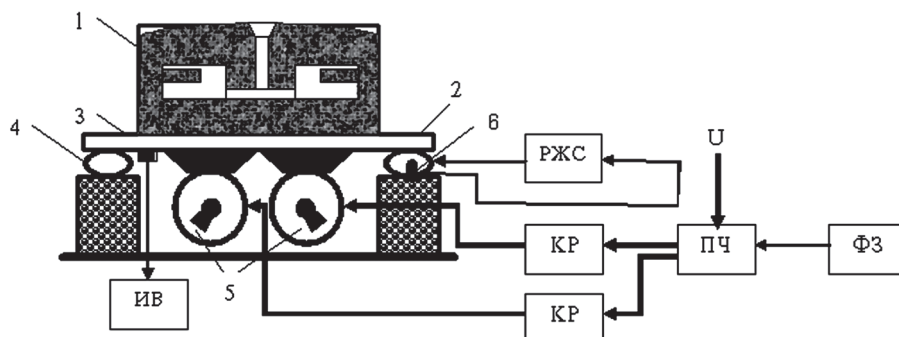


Рис. 1. Схема установки для вибрационной формовки сыпучих смесей: 1 - уплотняемая форма, 2 - вибростол, 3 - датчик виброускорения, 4 - упругий элемент, 5 - дебалансные вибровозбудители, 6 - силоизмерительный датчик; ИВ - измеритель ускорения вибрации, РЖС - регулятор жесткости вибростола, КР - коммутатор реверса мотора, ПЧ - преобразователь частоты, ФЗ - функциональный задатчик, U - входное напряжение питания

На первой стадии необходимо получить высокую скорость и амплитуду отрыва сыпучего материала в объеме вибрируемой формы для принудительного движения песка в полости и каналы моделей. Когда достигнуто объемное разрыхление песка и затекание в открытые пустоты модели, следующей стадией становится обработка формы в режиме вибрационного прессования. При уплотнении песка по схеме, показанной на рис. 1, необходимо поддерживать колебательный процесс с ускорением на открытой поверхности песка не выше ускорения свободного падения. На рис. 2 приведены экспериментальные кривые уплотнения песчаной формы объемом 0,5 м³ при использовании двух типов промышленных вибраторов ИВ с круговыми скоростями вращения n :

- верхняя кривая, $n = 3000$ об/мин;
- нижняя кривая, $n = 1500$ об/мин.

В обоих случаях обеспечиваются условия безотрывного движения частиц песка по высоте формы, но в случае применения колебаний с частотой, близкой к 50 Гц, достигается больший эффект уплотняющего воздействия на песок.

Полученные экспериментальные данные подтвердили, что уплотнение песков с содержанием влаги не более 4 % при отсутствии внешне наложенной статической силы начинается, как правило, при незначительных гармонических вибрациях с ускорением $> 0,04g$ (g - ускорение свободного падения).

Свежий прокаленный песок имеет хорошие показатели уплотняемости в интервале ускорений 0,2-0,95 g . При дополнительном внешнем давлении на смесь сверху или создании в песке газового разрежения, его уплотнение начинается только при некотором критическом

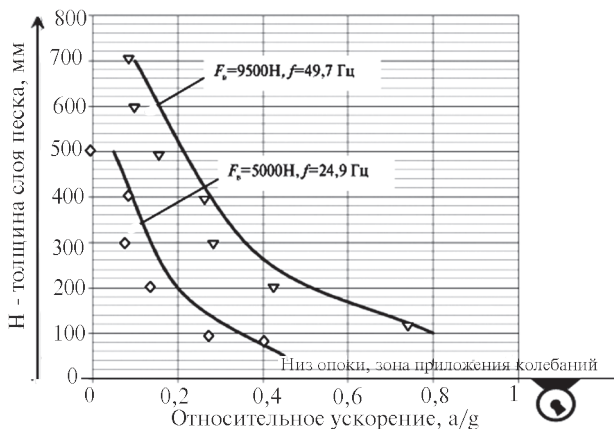


Рис. 2. Экспериментальные кривые затухания вибрационных колебаний в сухом песке при вибрационном уплотнении заполненной опоки с рабочим пространством 800x800x800 мм

Проблемы технологии формы

ускорении, равном $0,35-0,45 g$, с превышением которого процесс уплотнения развивается более интенсивно.

Лабораторные эксперименты по возбуждению вибраций в режиме монотонного подъема и опускания частоты колебаний в области до резонансных частот системы «вибровозбудитель-форма» подтвердили эффективность ранее сформированного алгоритма задания режимов с линейно-временным дрейфом частоты вибрации для получения более равномерного уплотнения смеси по объему формы. Проведенные опыты по формовке сложных термически удаляемых моделей в опоках с размерами $800 \times 800 \times 1000$ мм показали, что при пилообразном изменении частоты вибрации имеются следующие преимущества:

- переменная частота устраняет образование застойных зон с нулевыми амплитудными узлами колебаний песка;
- можно избежать явлений кластерного зависания смеси в окрестности модельных полостей и по угловым зонам стенок контейнера;
- максимальное уплотнение песка практически для всех форм применяемых моделей обеспечивалось при семикратном прохождении часто в диапазоне 16-47 Гц, при этом общее время цикла равнялось 8 с. Дальнейшее повышение количества циклов обработки не приводило к более заметному уменьшению объема песка в форме.

Последующие исследования были направлены на изучение изменений гравитационной текучести песков при изменении их степени загрязненности продуктами деструкции углеводородных моделей, а также на изменение содержания в них влаги. В опытах, проведенных по исследованию скорости гравитационного истечения кварцевых смесей из специальной воронки, было замечено, что остаточная влажность песка и угольная сажа на его поверхности изменяют показатели гравитационной текучести. Отметим, что остаточное содержание влаги уменьшает осыпаемость песка и таким образом повышает эрозионную стойкость форм при действии внешних нагрузок. При загрязнении смеси продуктами деструкции полистирола отмечено монотонное повышение подвижности песка, которое выходит на максимум после четырех циклов оборота смеси. В дальнейшем подвижность песка ухудшается со стабилизацией минимального значения после 18-20 циклов*. Экстремум на нижней кривой (рис. 3) можно объяснить притиркой и округлением частиц песка в начальных циклах формовки. Поэтому при назначении технологических режимов формовки вполне оправдано проводить коррекцию параметров вибрационного воздействия с учетом изменяющихся реологических свойств сыпучих смесей.

Современные вибрационные устройства позволяют задавать весьма сложные законы

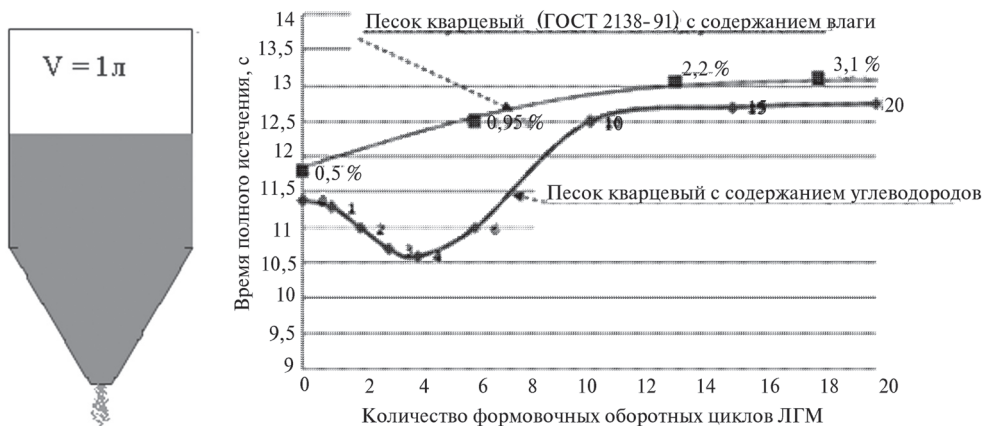


Рис. 3. Исследование истечения кварцевого песка через фильеру $\varnothing 8$ мм под действием гравитационной нагрузки

*Под циклом понимается полный оборот смеси, включая операции формовки, заливки и выбивки

движения рабочей платформы, обеспечивая параллельную работу двух или большего количества связанных инерционных вибровозбудителей. Целенаправленные лабораторные исследования в этом направлении были начаты с создания синхроимпульсных систем группового управления вибровозбудителями (рис. 4) от общего электрического генератора частоты [13,14].

Настоящие усовершенствования в конструкции вибрационных систем касаются расширения их технологических возможностей при обработке различных по массе форм (см. рис.1). С этой целью разработана двухконтурная система регулирования параметров и в нее введены упругие пневматические элементы, которые обеспечивают регулирование жесткости стола от специального регулятора РЖС. Оптимальное значение жесткости в системе «форма-вибровозбудитель» регулируют при каждой установке на рабочую платформу стола обрабатываемой формы с учетом реально внесенной дополнительной массы. Масса формы определяется силоизмерительным датчиком b непосредственно на платформе вибростола перед началом виброобработки. После расчета суммарной массы проводится перенастройка жесткости системы.

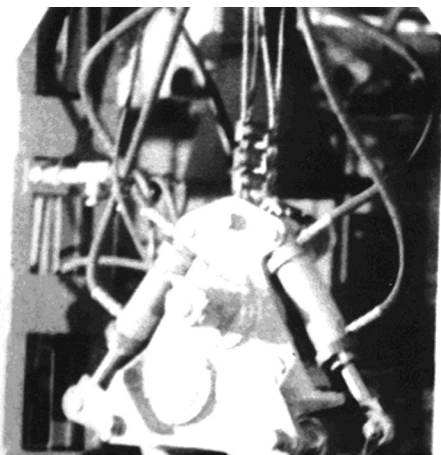


Рис. 4. Конструкция трехмоторного вибрационного рабочего органа с верхней упругой подвеской и гидравлическими зажимами для захвата опок

Стенды для формовки, построенные по двухконтурной схеме регулирования, в отличие от известных машин позволяют расширить диапазон обрабатываемых по массе форм и более гибко и точно установить необходимые параметры вибрации. Первый контур регулирования обеспечивает функционально пропорциональное задание частоты вибрации ω и возмущающей силы F_a как квадратичной функции $F_a = M_{ст} \omega^2$ по вынуждающей частоте колебаний рабочего органа. Контур включает три расчетных звена: форма \leftrightarrow вибровозбудитель \leftrightarrow частотно регулируемый электропривод. Второй контур системы создан для перенастройки жесткости системы с целью обработки форм с различной суммарной массой. Жесткость подвески вибровозбудителей корректируют сразу же после закрепления формы с вибровозбудителем и образования новой суммарной массы в рассматриваемой системе. Консолидированное параллельное управляющее воздействие на первый и второй контуры системы определяет закон движения формы.

При описании гармонических колебаний в системах (вибровозбудитель - песчаная форма) с вязким трением будем исходить из характеристики нелинейности и векторной направленности вынуждающей силы $F = 2F_a \cos \omega t$, а также соображений энергетического баланса в уравнении Лагранжа второго рода по представляемой координате уплотнения смеси x_i

$$\left. \begin{aligned} F_a &= M_{ст} \omega^2 \\ F &= F_a (e^{i\omega t} + e^{-i\omega t}) \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial x_i} &= Q_i \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $M_{ст}$ - статический момент вращающейся инерционной массы вибровозбудителя; ω - круговая частота вращения инерционной массы; Q_i - обобщенная сила, соответствующая координате x_i ; ($Q_i = F_i - \Phi_i$); F_i - внешняя сила, приложенная к форме по цепи координаты x_i ; Φ_i - сила активного сопротивления в цепи координаты x_i .

Системы при данном ограничении области исследований можно охарактеризовать следующими особенностями:

- многомерностью описания процесса вибрационной формовки;

Проблемы технологии формы

- различием по объему, размерам и массе форм, а также коэффициентам размерной сложности применяемых моделей;
- наличием ограничений по частотным и энергосиловым спектрам воздействия, вызванных конструктивными особенностями применяемого оборудования;
- разбросом реологических свойств формовочных смесей;
- неполнотой существующих моделей описания изменения реологических свойств в динамике и их количественных характеристиках.

Следует отметить еще одну особенность поведения системы форма ↔ вибровозбудитель ↔ частотно регулируемый электропривод: если в начальной стадии уплотнения смеси система описывается двухмассной механической моделью, то в конце процесса обработки она преобразовывается в схему с одной рассматриваемой массой.

В ряде случаев, когда масса формы значительно меньше массы рабочего органа, можно исключить из рассмотрения взаимодействие вибровозбудителя с формой и принять к рассмотрению две не связанные системы:

- форма с сыпучим материалом ↔ виброплатформа;
- виброплатформа ↔ вибровозбудитель ↔ привод.

Вначале целесообразно изучить поведение формовочной смеси в вибрирующей форме и найти законы движения виброплатформы при наилучшем протекании процесса вибрационного уплотнения, например, для моделей гидравлической арматуры это качество заполнения стержневых каналов и характеристики дилатансии смеси. После этого на втором этапе необходимо провести расчет параметров вибровозбудителей, полученных по известным ранее критериям качества. Наибольшие трудности возникают при решении задач первого этапа, так как необходимо правильно построить модель сложных в реологическом отношении сыпучих формовочных смесей.

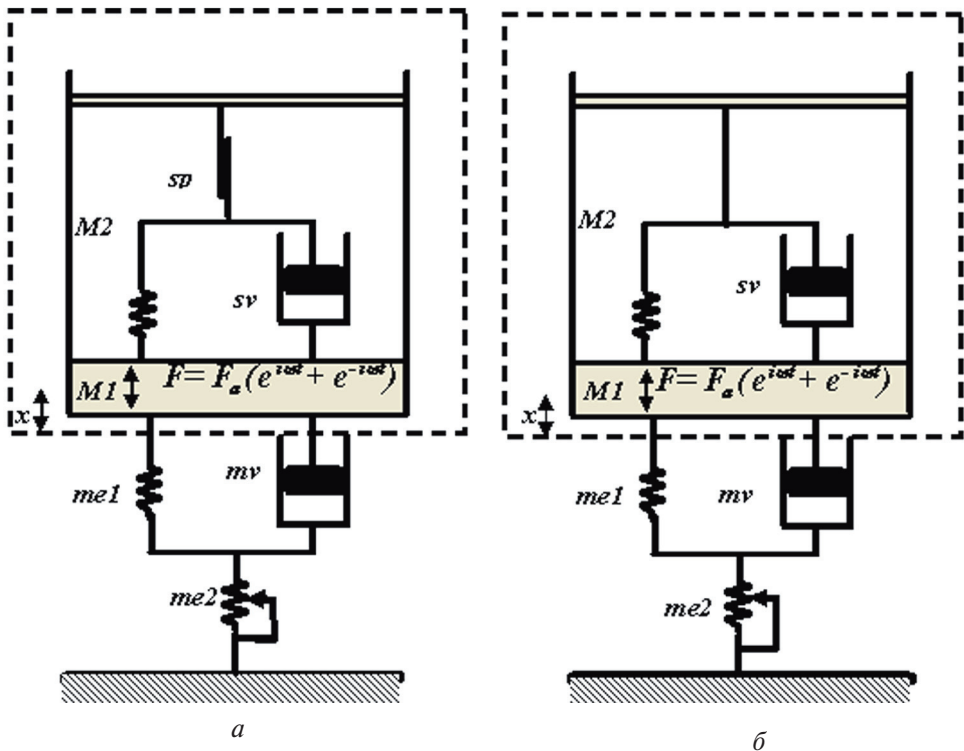


Рис. 5. Реологическая модель процесса формовки при возбуждении вынужденных вертикальных гармонических колебаний формы: *a* - модель двухмассной системы, *б* - одномассная модель; *M1* - масса виброплатформы, *M2* - присоединенная масса формы, *M* - суммарная расчетная масса, $M = M1 + M2$; *x* - амплитуда вертикальных колебаний на поверхности формы, *mv* - вязкий элемент подвески виброплатформы, *se*, *sv*, *sp* - упругий, вязкий и пластичный элементы соответственно в сплошной среде тела формы, *me1* - упругие элементы подвески виброплатформы

Представление сыпучей формовочной смеси как эффективной сплошной среды дает наиболее детальное описание ее механического поведения во всем диапазоне внешних нагрузок и граничных условий. Система уравнений сплошной среды включает следующие уравнения: сохранения импульса (уравнение движения); непрерывности; энергетического баланса; реологическое. При этом формально вид первых трех уравнений одинаков для любой сплошной среды.

Построим модель открытой механической диссипативной системы (рис. 5), состоящей из контейнера с вязко-пластичной средой и генератора вибраций, между которыми в процессе возбуждения вынужденных гармонических колебаний происходит обмен энергией при действии периодической возмущающей силы F

$$M\ddot{x} + r\dot{x} = cx = F, \quad (2)$$

где M - приведенная масса; c - жесткость; r - коэффициент вязкого сопротивления.

Если принять в уравнении (2) $E_k = M\dot{x}^2/2$; $E_p = cx^2/2$; $W = r\dot{x}^2/2$, то уравнение энергетического баланса можно представить в виде баланса мощностей

$$d/dt (E_k + E_p) = -2W + F\dot{x}, \quad (3)$$

где $2W$ - рассеяние энергии за единицу времени.

Учтем в уравнении (3) диссипацию энергии U_s , связанную с нелинейно-вязким движением песка и изменением его внутренней энергии

$$\text{Здесь} \quad d/dt (E_k + E_p + U_s) = -2W + F\dot{x}. \quad (4)$$

$$2E_k = M\dot{x}^2; \quad 2E_p = c_m x_m^2 + c_s x_{se}^2; \quad 2U_s = k_s x_i^2; \quad 2W = b\dot{x}_i^2 + r\dot{x}^2, \quad (5)$$

где $x = x_m + x_{se} + x_i$; x_m - упругая деформация подвески виброплатформы; x_{se} - упругая деформация опои с песком; x_i - неупругая (вязкая) деформация в объеме опои; c_m - жесткость подвески виброплатформы; c_s - жесткость формы; k_s - изменяемый коэффициент жесткости системы; b - изменяемый коэффициент вязкого сопротивления уплотняемой среды.

Уравнение (4) вместе с определенными величинами энергии (5) соответствует реологической модели (рис. 5, а), в которой форма (уплотняемое тело) состоит из трех базовых элементов: sv , sp - соответственно вязкий и пластичный элементы, характеризующие ползучесть металла; se - упругий элемент, характеризующий упругую деформацию песчаной массы при взаимодействии со стенками формы и упругой поверхностью модели;

При рассмотрении двухмассной модели значения отдельно взятых масс следующие:

$M1$ - масса рабочего органа, которая включает массу вибровозбудителей вместе с массой платформы стола;

$M2$ - масса установленной на платформу формы, включая модель и формовочную смесь.

В режиме перехода к одномассной схеме (рис. 5, б) массы $M1$ и $M2$ консолидируются в суммарную массу M , а элемент sp исключается.

Параметры элементов упругой подвески определили в следующей последовательности: $me1$ - постоянный упругий элемент; $me2$ - переменный, регулируемый упругий элемент; mv - вязкий элемент.

Полная амплитуда перемещения среды $x = x_y + x_p$,

где x_y - упругая деформация, происходящая в сплошном теле; x_p - пластическая сдвиговая деформация песка.

Элемент sp отражает тот факт, что не всякое напряжение вызывает ползучесть сыпучей смеси, находящейся в покоем состоянии. Если приложить к объекту напряжение меньше некоторой величины σ_m , то ползучесть будет отсутствовать. Поэтому если $\sigma > \sigma_m$, то элемент sp создает в рассматриваемой схеме постоянное напряжение, а превышение действующего напряжения величины σ_m вызывает ползучесть и уплотнение песчаных

кластеров. Когда $\sigma > \sigma_m$ в элементе sp возникает точно такое же уравновешивающее напряжение σ и ползучесть отсутствует. Таким образом, он действует аналогично силе трения скольжения.

Выводы

- Предложенные в работе принципы моделирования и расчета виброформовочных машин с переменной присоединяемой массой являются основой создания самонастраивающихся систем с логической адаптацией в технологическом цикле литейного производства.
- Раскрыты особенности построения вибрационных устройств для процессов формовки с двухконтурной системой регулирования параметров вибрации.
- Построение реологической модели вибрационного уплотнения сыпучей среды выполнено с учетом эффекта динамического перехода двухмассной механической схемы (форма-рабочий орган) к схеме с одной консолидированной массой.
- Экспериментально обоснован ввод в систему управления функциональных корректирующих звеньев, учитывающих степень и физико-химическую природу загрязнения песка продуктами разложения моделей и его независимым увлажнением.
- Предложен практический способ управления вибрационной формовкой с циклично линейным заданием частоты вибрации в условиях направленной синхронизации вибровозбудителей рабочего органа.



Список литературы

1. *Вербицкий В. И.* Анализ эффективности встряхивающих формовочных машин путем имитационного моделирования // Литейн. пр-во. - 1985. - № 11. - С. 26-28.
2. *Авдокушин В. П., Самарай В. П.* Реологическое моделирование уплотнения литейных форм и стержней вибрацией // Процессы литья. - 2002. - № 4. - С. 65-70.
3. *Баранов В. И.* Роль вибрации в технологии ЛГМ. Международная конференция по литью по газифицируемым моделям: Тез. докл. (19-21 сент. 2007 г.). - С.-Петербург, 2007. - С. 42-45.
4. *Авдокушин В. П.* Выбор оптимальных режимов виброуплотнения форм при литье по газифицируемым моделям // Литейн. пр-во. - 2001. - № 4. - С. 38-40.
5. *Шуляк В. С.* Литье по газифицируемым моделям. - С.-Петербург: НПО «Профессионал», 2007. - 408 с.
6. *Самарай В. П., Авдокушин В. П., Дорошенко С. П. и др.* Предпроцессорная подготовка имитационного моделирования уплотнения литейных форм и стержней // Процессы литья. - 2003. - № 2. - С. 62-72.
7. *Олемской А. И., Ющенко О. В.* Феноменологическая теория перехода сыпучей среды в текучее состояние // Журн. техн. физики. - 2003. - Т. 73, вып. 10. - С. 13-17.
8. *Шклеин Н. С.* О реологических факторах управления качеством литейной формы // Литейн. пр-во. - 2004. - № 6. - С. 13-16.
9. *Вербицкий В. И., Горбачев К. А., Коньшев А. В.* Реологические исследования формовочной смеси // Там же. - 2004. - № 6. - С. 13-16.
10. *Коротченко А. Ю., Коньшев А. В., Вербицкий В. И.* Реологическая модель динамического уплотнения формовочной смеси // Там же. - 1989. - № 8. - С. 25-27.
11. *Вялов С. С.* Реологические основы механики грунтов. - М.: Высш. шк, 1978. - 447 с.
12. А. с. 1513174 СССР, МКИ F 03 G 3/00. Вибровозбудитель инерционного движителя / П. В. Русаков. - Оpubл. 07.10.89, Бюл. № 37.
13. А. с. 1165489 СССР, МКИ В 06 В 1/16. Вибровозбудитель / В. Г. Горенко, П. В. Русаков, Л. И. Бондаренко, В. П. Горшунов. - Оpubл. 07.07.85, Бюл. № 25.

Поступила 12.09.2008