

УДК 621.744.362

П. В. Русаков, В. Д. Бабюк, Е. А. Жидков

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КОНТЕЙНЕРНОЙ ФОРМЫ В УСЛОВИЯХ ВИБРОФОРМОВКИ

Приведены результаты исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) контейнерной формы в условиях вибрационной формовки. Установлено, что в переходных режимах вибрационного нагружения амплитудные колебания НДС определяются конструктивной жесткостью литейных форм и коэффициентом запаса мощности виброформовочной машины. Исследованы случаи возбуждения резонансных явлений, вызывающих деформирование элементов формы, и проведен анализ НДС в нестационарных режимах вибронагружения. Определены основные причины, снижающие эффективность уплотнения форм, обусловленные переходными процессами, действием эффекта Зоммерфельда и критическим деформированием стенок контейнера.

Ключевые слова: контейнерная форма, напряженно-деформированное состояние, виброформовка, переходные режимы, резонансные колебания.

Наведено результати дослідження напружено-деформованого стану (НДС) контейнерної форми в умовах дії вібраційних сил. Встановлено, що в перехідних режимах вібраційного навантаження амплітудні коливання НДС визначаються конструктивною жорсткістю ливарних форм і коефіцієнтом запасу потужності вібраційної машини. Досліджено випадки збудження резонансних явищ, що викликають деформацію елементів форми, та проведено аналіз процесів формування НДС в нестационарних вібраційних режимах. Визначено основні причини, що знижують ефективність ущільнення форм, які обумовлені перехідними процесами, дією ефекту Зоммерфельда та критичною деформацією стінок контейнера.

Ключові слова: контейнерна форма, напружено-деформований стан, виброформовка, перехідні режими, резонансні коливання.

The article presents the results of a study of the formation of the stress-strain state of a sand mold under vibration. It was found that the transient vibration amplitude load fluctuations strains and stresses are determined by structural rigidity of molds and a safety factor of power vibration machine. Were analyzed cases of excitation of resonance, causing deformation of the form elements as well as an analysis of the formation of dynamic stresses in the transient mode of vibration have performed. In the process of conducting research have been established the main causes that reduce the effectiveness of compaction of sand molds. These reasons relate to the action of the Sommerfeld effect and the critical deformation of the walls of the flask.

Keywords: sand mold, the stress-strain state, vibroforming, transitional regimes, the resonant vibrations.

Рассматривая процессы вибрационной формовки, необходимо отметить, что вопросы, касающиеся переходных режимов вибрационного, газоимпульсного и вакуумного воздействий на форму и формирование НДС, остаются не до конца исследованными, хотя и являются весьма важными [1-4]. В частности, недостает экспериментальных исследований по влиянию вносимых в форму напряжений и деформаций на состояние технологических дефектов для их регламентации. Не решены вопросы обеспечения размерной стабилизации контейнерной формы при завершении технологического вмешательства и выхода из режимов вибрационной обработки. Указанные обстоятельства, в свою очередь, создают неопределенность в оценке показателей качества уплотнения формовочной среды.

Факторы, влияющие на качество формовки. В процессе формообразования число возникающих дефектов в форме зависит от качества управления процессом вибрационного воздействия. Достаточно отметить, что при сжатии формовочной массы на поверхности моделей протекают упругопластические деформации, вызывающие размерные изменения и коробление. С другой стороны, зарождение внутренних дефектов происходит в переходных колебательных режимах, в основном при вхождении вибрационной машины в зону рабочих частот и выходе из этой зоны. Вероятность их образования возрастает пропорционально времени нахождения формы в переходном режиме.

Проведенные экспериментальные исследования мезомеханики уплотнения песка в опоках, параметры которых приведены в табл. 1*, показали, что вибрация формы на пусковых частотах снижает эффективность уплотнения формовочной массы. В экспериментах установлено, что переходные колебательные режимы в зависимости от массы опоки и мощности вибровозбудителя занимают половину времени стационарного рабочего режима. Из приведенных данных на рис. 1 следует, что для форм второго типоразмера время остановки вибратора составляет 2,6 с. Это вызывает явление вторичного разуплотнения формовочной массы**.

Таблица 1. Технические характеристики экспериментальных опок-контейнеров

Вместимость сыпучей среды, м ³	Полная масса загрузки сыпучей среды, кг	Размер технологического пространства, мм		
		длина	ширина	высота
0,1	170	500	500	500
0,2	340	600	600	600
0,5	850	800	800	800
0,9	1500	1000	1000	1000

Кроме переходных колебательных режимов, оказывающих влияние на зарождение внутренних дефектов формы, дополнительным фактором является релаксация упругих напряжений в уплотненном массиве формовочной массы и связанное с ней явление внутриформенной флуктуации компрессионной плотности***. Релаксация напряжений будет наблюдаться даже при нахождении формы в режиме ожидания процесса заливки. В этот период также существует вероятность воздействия случайных силовых полей при транспортировке, кантовке, подъеме и опускании формы.

*Опоки устанавливались на виброплощадку с вибратором ИВ-98Н

**Первичное разуплотнение формовочной массы наблюдается при пуске вибромашин

***Компрессионная плотность – масса единицы объема зернистого материала, уплотненного в измерительной емкости (в объем входят внутренние поры частиц и промежуточное пространство между ними), которая определяется методами измерения насыпной плотности, но в состоянии объемного сжатия

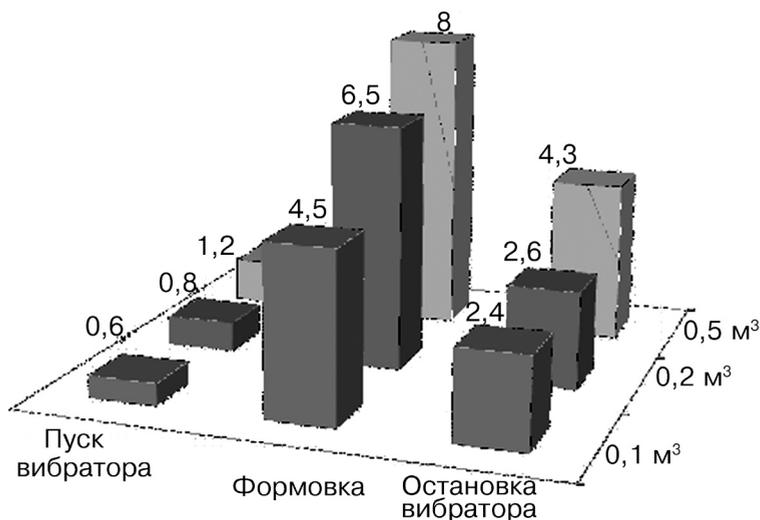


Рис. 1. Технологические фазы воздействия вибрации (с) в общем цикле вибрационной формовки для трех объемных типоразмеров контейнерных форм

Отдельные причины, приводящие к возникновению внутренних дефектов, связаны с несовершенством применяемых технических устройств возбуждения вибраций. Хорошо известно, что при пуске асинхронных двигателей максимальная потребляемая мощность требуется на этапе разгона электрической машины. Следовательно, когда вибросистема с двумя или большим числом степеней свободы имеет недостаточную мощность вибровозбудителя, то в переходном режиме проявляется действие эффекта Зоммерфельда [5, 6]. Он вызывает снижение скорости ротора при разгоне, в области резонансных частот и, как следствие, раскачку моделей, установленных в опоке-контейнере. Наибольшее проявление эффекта наблюдается на частотах вращения, близких к собственным колебаниям вибрируемой формы. Максимальная вероятность разуплотнения формовочной среды возникает при вибрационной обработке габаритных литейных форм, у которых существует проблема захвата вибровозбудителем собственной частоты формы и возбуждения в стенках контейнера критического уровня динамических напряжений. Таким образом, процесс вибрационной формовки требует дополнительной защиты от действия эффекта Зоммерфельда, в особенности, когда для виброуплотнения применяют тяжелые дебалансные массы.

Статистика брака свидетельствует, что нежесткие конструкции опок-контейнеров нередко на стадии формовки создают условия возникновения литейных дефектов. В качестве одной из причин можно отметить неточно определяемый уровень нагрузок, действующих на контейнер от формовочной массы и внутриформенного газового разрежения. Именно эти воздействующие силы оказываются основными параметрами, по которым рассчитывают несущую способность и жесткость контейнера в целом. При этом динамические нагрузки в расчетах не учитывают.

Техническая экспертиза виброформовочных систем. Проведенные наблюдения и анализ применяемых машин показали, что полосу зоммерфельдовских частот наиболее устойчиво проходят управляемые литейно-технологические системы (ВЛТС) с трехконтурным регулированием частоты вибрации, вынуждающей силы и жесткости подвески рабочего органа [7-9]. В интегрированных схемных решениях ВЛТС предусмотрены функциональное регулирование разгона и торможения роторов для преодоления резонансных явлений и программирование алгоритмов формирования технологических режимов работы вибрационного оборудования. В работах [10-11]

показаны конструктивные особенности ВЛТС, где, наряду с техническим описанием, анализируются физические процессы и режимы работы установок, обусловленные оптимизацией параметров колебаний рабочего органа в зарезонансной зоне. Однако необходимо отметить, что в литейном производстве достаточно широко продолжают применять дебалансные вибромашины с дискретным регулированием параметров вибрации. Естественно, что в таких системах режим виброформовки управляет повторными включениями и выключениями электродвигателей, поэтому в каждом цикле имеется промежуток времени, в течение которого происходит снижение частоты вибрации и возникает вероятность его зависания в зоне резонансных частот. Экспериментальные исследования переходных колебательных процессов в системах «вибровозбудитель-литейная форма» показали на имеющуюся прямую взаимосвязь скорости прохождения резонансных частот от установленной мощности двигателя в период разгона вибросистем с технологической нагрузкой. Теоретические расчеты наибольшей потребляемой мощности были подтверждены экспериментальными данными, снятыми в период пуска вибромашин. Было доказано, что для качественного разгона дебалансного ротора необходимо на 25-40 % завышать установленную мощность электродвигателей.

Улучшение управляемости процессом формовки и повышение КПД можно достичь путем применения многоприводных вибросистем, которые обеспечивают гармонические колебания литейной формы и регулирование угла фазного сдвига между вращающимися роторами [8-10]. Установки представляют собой инерционные ВЛТС с взаимной связью электрических и механических параметров приводных машин.

К совершенствованию методов локализации вредного воздействия резонансных колебаний в переходных и установившихся режимах возбуждения вибраций относятся работы по апробации новых вибросистем воздействия на форму поляризованной вибрацией [11]. Указанные технические решения обеспечивают избирательное и направленное (с плавающим вектором направленности) воздействие на литейную форму для достижения необходимого уровня компрессионной плотности формовочной массы.

Постановка задачи. С увеличением плотности формомассы возрастает прочность формы и уменьшается количество литейных дефектов. Компрессионная плотность кварцевой песчаной смеси, обуславливающая точность и чистоту поверхности отливки, находится в пределах $(1,6-1,8) \times 10^3$ кг/м³, а исходная насыпная плотность песка в литейной форме составляет $(1,1-1,2) \times 10^3$ кг/м³. Отметим, что качество уплотнения дисперсной среды в форме определяют не только оптимальные режимы стационарного процесса виброформовки, но и резонансные колебательные процессы при вводе вибромашин в технологический режим обработки и выводе из него. Следовательно, постановка задачи исследований вызвана необходимостью изучения процесса формирования НДС в переходных режимах вибрационной обработки, связанных с пуском и отключением виброформовочных машин, а также изучением резонансных явлений, вызывающих критический уровень деформаций элементов формы, выявление и распознавание источников и причин появления резонансных колебаний.

Экспериментальные исследования. Основная группа вибромашин, применяемых на формовочных участках, выполнена с нижним расположением рабочего органа*. Вибрационное воздействие осуществляют через нижнюю виброплощадку, на которую устанавливают литейную форму (рис. 2). Применительно к данной схеме обработки проводили исследования переходных процессов формирования НДС

*В рассматриваемом случае рабочим органом является инерционный вибровозбудитель центростремительного типа

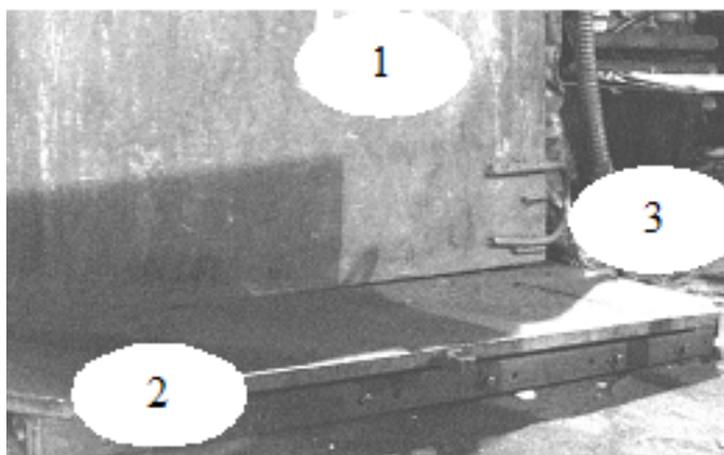


Рис. 2. Вибрационная обработка контейнерной формы на виброплощадке: 1 – опока-контейнер; 2 – виброплощадка; 3 – гибкий аспирационный трубопровод

в контейнерных формах (характеристики опок-контейнеров приведены в табл. 1). Корпуса контейнеров изготовлены из стального листа толщиной 3 мм с внутренним размещением аспирационных трубопроводов и герметичного разгрузочного люка для высыпания песка (рис. 3). Основной целью проводимых исследований являлось изучение динамики НДС литейной формы* в условиях виброформовки. Полученные экспериментальные данные НДС контейнера позволяют выявить реальный запас прочности и установить области потери устойчивости формы под действием вибрационных сил.

Наряду с исследованием переходных процессов проводили энергочастотную идентификацию процесса виброформовки и анализ косвенных критериев оценки текущего состояния формы. Для этого параллельно с измерением НДС осуществляли временную запись энергочастотных кривых процесса виброн нагружения. Регистрация энергочастотных кривых преследовала следующие цели:

- получить энергочастотный образ процесса виброформовки, по которому в последующем можно установить собственные резонансные частоты системы «вибромашина-литейная форма» и провести интегральную оценку характеристик жесткости литейных форм;
- выявить для данной системы область рабочих частот, при которых интенсивно протекает внутриформенная релаксация упругих деформаций в массиве формовочной смеси;
- определить кривую релаксации упругих напряжений в стационарном режиме работы вибромашин и таким образом оценить эффективность процесса виброформовки.

Синхронно, с регистрацией энергочастотных кривых, также осуществляли запись амплитуд перемещений стенок контейнера. Резистивные датчики наклеивали на внешнюю сторону стенок. Процесс тензометрирования проводили по двум каналам, а по третьему измеряли амплитуду вибраций дна контейнера. Для этой цели со стороны дна был установлен потенциометрический датчик линейного перемещения (исполнение РС, рис. 3, поз. 3а), у которого допустимая рабочая скорость движения составляла не менее 5 м/с. Измерения осуществляли через промежуточные тензопреобразователи, соединенные с портативным компьютером серии X50SL цифровым интерфейсом под управлением ОС Windows 2000/XP.

Обсуждение результатов исследований. В цикле формовки исследовали три последовательные стадии вибрационного нагружения (рис. 4). Полученные дан-

*Для исследований была собрана форма в контейнере третьего типоразмера, см. табл. 1

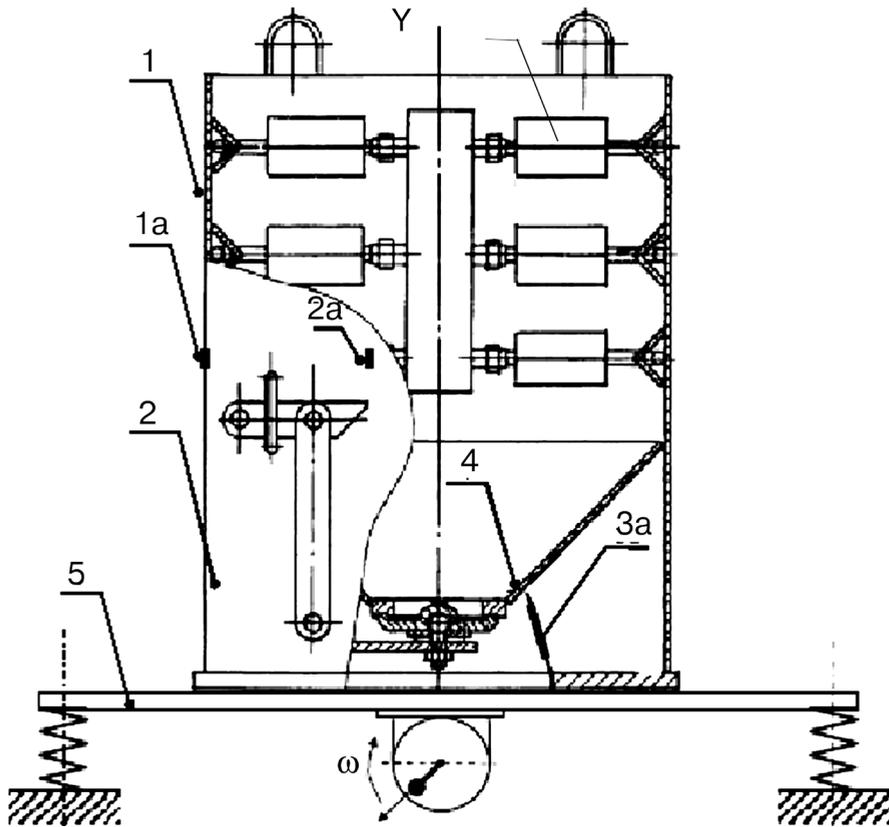


Рис. 3. Схема виброобработки и конструкция контейнера со встроенной системой аспирации газов и донной разгрузочной воронкой: 1, 2 – боковые стенки контейнера, расположенные соответственно в перпендикулярной и параллельной плоскостях действия вибрационной силы; 3 – внутренняя система аспирации; 4 – герметичная разгрузочная воронка; 5 – виброиспытательная площадка; 1а, 2а – тензодатчики, расположенные соответственно на боковых стенках 1, 2; 3а – датчик виброперемещения

ные тарировали для расчета динамических напряжений и амплитуд прогибов дна контейнера третьего типоразмера.

На первой стадии (от начала включения вибровозбудителя до момента его выхода на установившуюся рабочую частоту) всплески динамических напряжений вызваны прохождением системой резонансной области вибраций, которая отрицательно влияет на процесс формовки вплоть до начала вхождения в зарезонансную область. Наблюдения динамики НДС в элементах литейной формы* показали, что на стадии пуска и разгона дебалансного ротора возникают сильные динамические колебания стенок, вызывающие коробление и деформацию нежестких моделей лопаток колеса $\varnothing 450$ мм. Деформации и коробления возникают в слабых сечениях за счет циклических изгибных колебаний, вызванных резонансом стенок контейнера. Рассмотрим осциллограммы пуска виброплощадки с установленной массой литейной формы 850 кг (рис. 5). В период разгона вибромашины на энергочастотной кривой пусковой нагрузки 2 выделяются предрезонансные зоны с высоким приращением угловой скорости, за которыми следуют первичные резонансные участки с пологим подъемом, и вторичные резонансные участки, в конце которых снова наблюдается высокий темп подъема частоты вращения. По мере приближения к установившемуся режиму колебания проходят зарезонансную область, и темп подъема постепенно

*Работа выполнялась на Красноармейском литейно-механическом заводе, Донецкая обл.

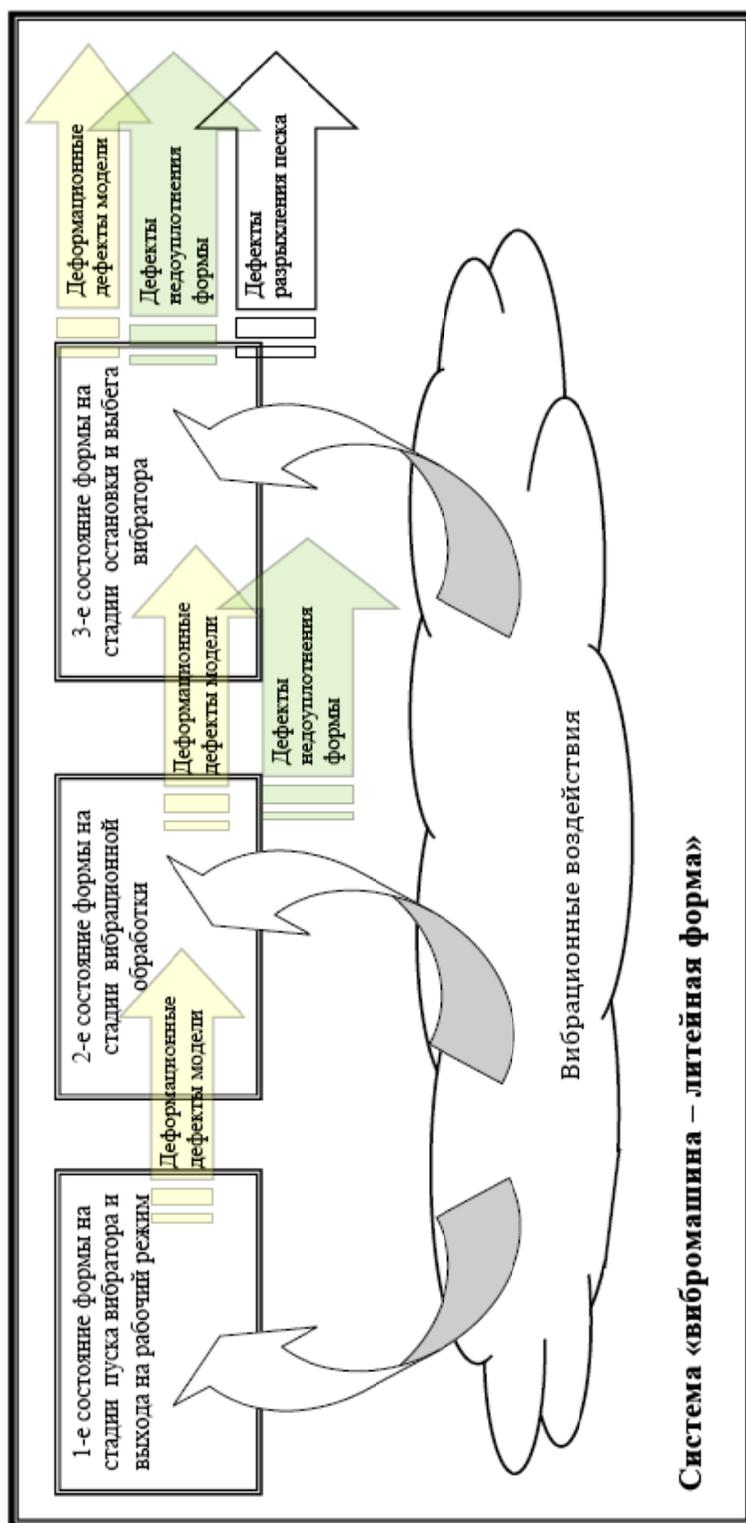


Рис. 4. Три стадии формирования дефектов в цикле вибративной формовки

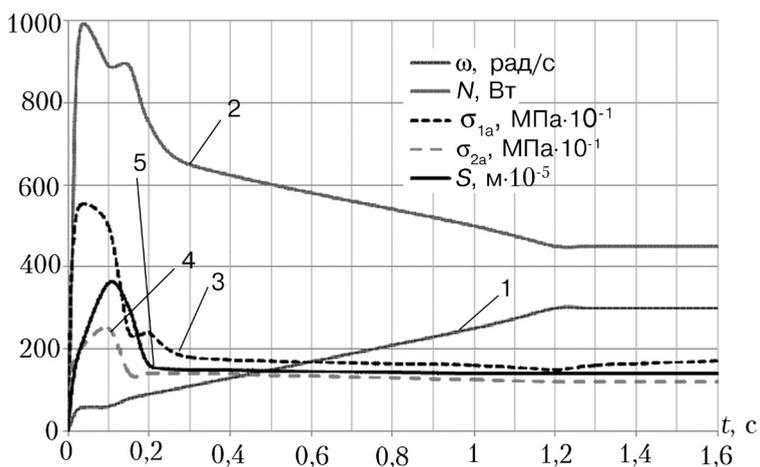


Рис. 5. Оциллограммы пуска и разгона вибровозбудителя до установившейся круговой частоты: 1 – разгонная кривая круговой частоты ω ; 2 – кривая потребляемой мощности двигателя при разгоне ротора вибровозбудителя; 3 – амплитудные значения растягивающих динамических напряжений в стенке контейнера, расположенной перпендикулярно по отношению к плоскости действия вибрационных сил; 4 – то же в стенке контейнера, расположенной параллельно по отношению к плоскости действия вибрационных сил; 5 – амплитуда виброперемещений дна контейнера

снижается до нуля. Отмеченное явление ослабления темпа разгона двигателя наблюдается тем заметнее, чем больше масса литейной формы, установленной на виброплощадке. При жесткости подвески рабочего органа $c = 5 \cdot 10^6$ Н/м и массе литейной формы 850 кг зависание наблюдается при резонансной частоте 65 рад/с. В этот момент заметны высокие (до 3600 мкм) амплитуды колебаний дна контейнера в зоне резонанса (кривая 5). При прохождении указанного участка, начиная с момента времени 0,2 с, происходят дальнейший подъем роторной скорости и выход на установившуюся частоту в зарезонансную область. Синхронно проведенная регистрация динамических напряжений, возникающих в период разгона вибровозбудителя, показала их заметное нарастание в стенках контейнера в зоне собственных резонансных частот. Причем, большее значение отмечено в боковых стенках, перпендикулярных действию вибрационных сил (точка 55 МПа на кривой 3). Величина этих напряжений больше от наводимых динамических напряжений в боковых стенках, расположенных параллельно плоскости действия вектора круговой вибрации (20 МПа, кривая 4). В табл. 2 приведены параметры вибровозбудителя, используемого в качестве рабочего органа.

Таблица 2. Технические характеристики вибровозбудителя ИВ-98Н

Номинальная мощность, кВт	0,55
Трехфазное напряжение питания, В	42
Частота колебаний (синхронная), Гц	50
Вынуждающая сила, кН	5,65-11,3
Статический момент массы дебалансов, кг·см	5,7-11,4

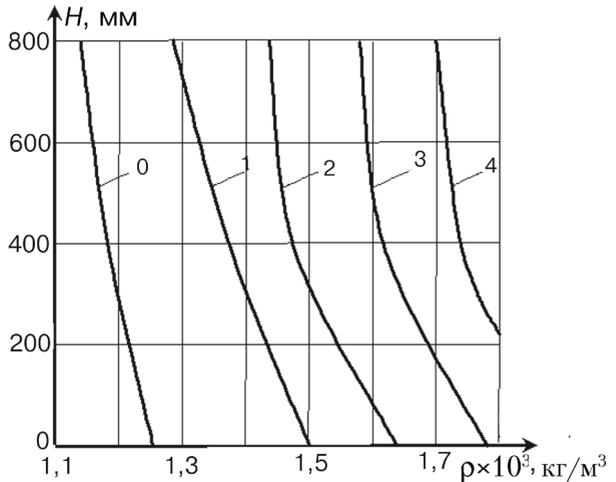
На второй стадии виброформовки (стационарный режим вибронагружения

с постоянной частотой и амплитудой колебаний рабочего органа) амплитудные значения ускорений не превышают ускорения свободного падения (см. рис. 3). Частицы смеси приобретают подвижность и под действием вибрации и гравитационного поля склонны к компактному изменению пространственного положения. Если принять во внимание тот факт, что упругие свойства формовочной смеси создаются концентрацией воздуха, находящегося в пространстве между частицами, то методами теории колебаний можно определить собственную частоту дисперсных частиц, при которой возникает внутриформенный резонансный режим. Отдельные параметры движения частиц среды в резонансном режиме могут быть определены по уравнениям классической механики

$$\frac{d\bar{x}_i}{dt} = \bar{v}_i; \quad \frac{d\bar{v}_i}{dt} = \frac{\bar{F}_i}{m_i}; \quad \frac{d\bar{\omega}_i}{dt} = \frac{\bar{M}_i}{J_i}; \quad i=[1, N], \quad (1)$$

где x_i – координата i -й частицы; v_i – ее скорость; $\bar{F}_i = \sum_j \bar{F}_{ij} + m_i \bar{g}$ – сила, которая действует на i -ю частицу вследствие столкновения с j -й частицей; \bar{F}_{ij} – силы, действующие на частицы вследствие контакта между собой; m_i – масса i -й частицы; \bar{g} – ускорение свободного падения; $\bar{\omega}$ – угловая скорость i -й частицы; $\bar{M} = \bar{r}_{Cij} \times \bar{F}_i$ – угловой момент, действующий на частицу; \bar{r}_{Cij} – радиус эксцентриситета, определяемый точкой столкновения; J_i – момент инерции частицы; N – количество частиц.

Вибрация смеси с возбуждением внутриформенного резонанса обеспечивает снижение силы трения между частицами и позволяет эффективно вести процесс уплотнения дисперсной формовочной массы. В этом режиме достигается наибольшая скорость релаксации упругих напряжений за счет разрушения и вытеснения воздушно-поровых ячеек в формовочной дисперсной среде. На рис. 6 приведены кривые, характеризующие процесс изменения плотности формовочной массы по высоте опоки H при наложении гармонических колебаний в стационарном режиме с частотой 49,6 Гц. Формовочная масса на дне контейнера достигает максимальной плотности, примерно через 7 с и в процессе вибрации нарастание толщины уплотненного слоя песка происходит направленно – снизу вверх. Обобщенное представление ВЛТС [9] как открытой механической системы позволяет из уравнения энергетического баланса выделить диссипативную составляющую, коррелирующую с изменением НДС контейнерной формы. Явление внутриформенной резонансной диссипации описывается действием периодической возмущающей силы F на платформу виброплощадки при условии, что форма также совершает гармонические колебания с амплитудой x



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

где E_k, E_p – кинетическая и потенциальная энергии системы; $2W$ – рассеяние энергии за единицу

Рис. 6. Динамика изменения плотности формовочной массы по высоте опоки при наложении вибраций в стационарном режиме: 0 – кривая начальной насыпной плотности; 1-4 – соответственно кривые компрессионной плотности песка через 2, 4, 6, 8 с вибрационной обработки на частоте 49,6 Гц

времени. В процессе вибрационного уплотнения объем воздуха уменьшается (увеличивается жесткость смеси), поэтому изменяется величина диссипативной составляющей $2W$. Экспериментальные наблюдения за изменением параметра W проводили путем регистрации кривой падения мощности вибровозбудителя в процессе виброформовки (рис. 7). Затем, определяя момент стабилизации энергетической кривой, находили момент завершения процесса дилатансии* формовочной среды. В нашем случае оптимальное время виброформовки ($t_{\text{опт}}$) не превышало 7 с.

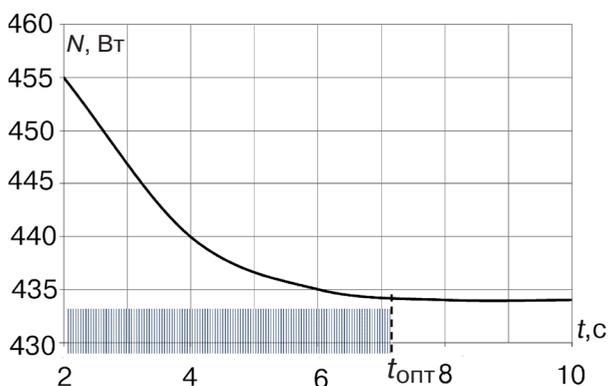


Рис. 7. Кривая изменения мощности вибровозбудителя на стадии виброформовки; ||||| — оптимальное время виброформовки

Оптимальные параметры вибрации. Оптимальную частоту и амплитуду задавали, используя амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) контейнерной формы. Так,

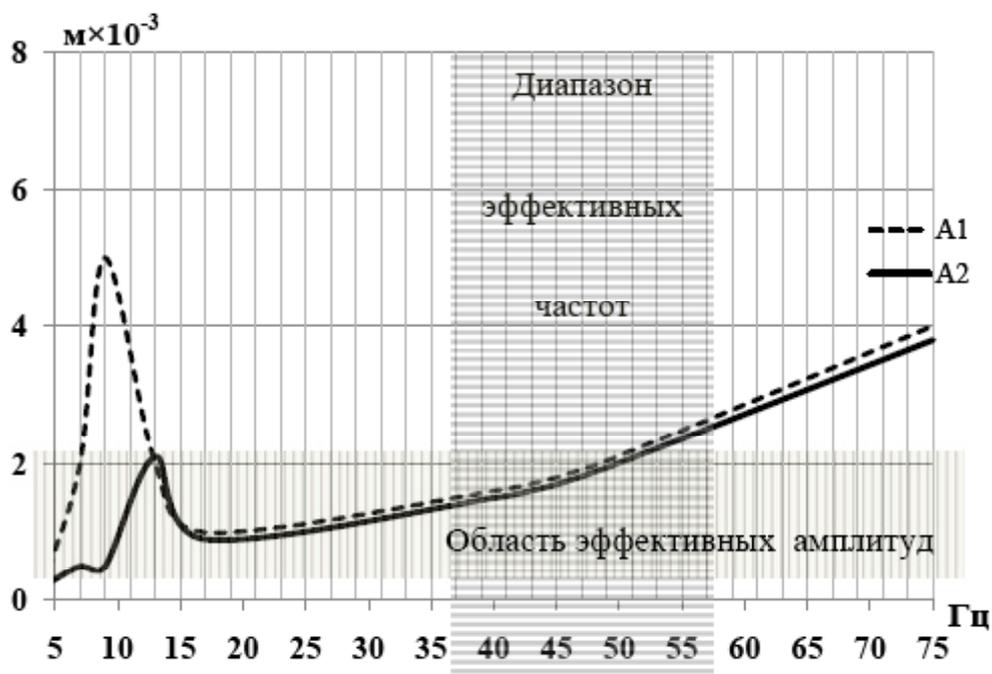


Рис. 8. Амплитудно-частотные характеристики литейного контейнера емкостью 0,58 м³, заполненного кварцевым песком при наложении гармонических вертикальных колебаний по схеме рис. 3: A1 — до проведения конструктивной оптимизации; A2 — после изменения конструкции дна и добавления элементов жесткости

*Дилатансия — изменение объема материала при сдвиговой деформации

по результатам изучения АЧХ контейнера вместимостью 0,58 м³ (рис. 8, кривая А1) была проведена конструктивная коррекция и ко дну были добавлены элементы жесткости, которые обеспечили улучшение его технологических свойств (кривая А2).

Как видно на рис. 8, диапазон эффективных частот вибрационного уплотнения формовочной массы находится в пределах 38-56 Гц. Верхнее пороговое значение амплитуды колебаний соответствует $1,8 \cdot 10^{-6}$ м, ниже которого располагается область эффективных амплитуд виброперемещений.

Третья стадия цикла вибрационной формовки является переходным режимом

окончания процесса вибронегружения и протекает с момента прекращения подачи питания на двигатель вибровозбудителя. При отключении электрической машины дебалансный ротор начинает проходить весь диапазон вибрационных частот сверху вниз. При снижении угловой скорости регистрируются всплески амплитуд колебаний и высокий уровень динамических напряжений. Несмотря на отсутствие питания, силовая отдача вибратора на форму более выражена, чем при пуске. На рис. 9 показаны кривые формирования НДС контейнерной формы на третьей стадии цикла вибрационной формовки. Особенностью динамического состояния литейной формы в период остановки является повышенный уровень вибрации (до 4500 мкм) дна формы в вертикальном направлении на роторной частоте 65 рад/с. Также регистрируются высокие динамические напряжения в боковых стенках контейнера σ_{1a} , σ_{2a} , которые вызваны возбуждением резонансных колебаний при прохождении зоны собственных частот литейной формы.

Заключение

Проведенные исследования развивают теорию вибрационного уплотнения насыпных контейнерных форм и создают основу разработки ВЛТС с пространственными и направленными колебаниями переменной грузоподъемности (от 0,5 до 5 т). Исследован процесс формирования напряженно-деформированного состояния (НДС) литейной формы на стадии вибрационной формовки. Установлено, что в переходных режимах вибрационного нагружения функция изменения НДС зависит от конструктивной жесткости литейных форм и коэффициента запаса мощности привода виброформовочной машины. Исследованы случаи возбуждения резонансных явлений, вызывающих деформирование элементов формы, и проведен анализ процессов формирования НДС в нестационарных режимах вибронегружения. Определены основные причины, снижающие эффективность уплотнения форм, вызванные переходными процессами, действием эффекта Зоммерфельда и критическим деформированием стенок контейнера. Для повышения эффективности уплотнения предложен ряд новых подходов к управлению процессом формообразования и оптимизации конструкций опок-контейнеров.

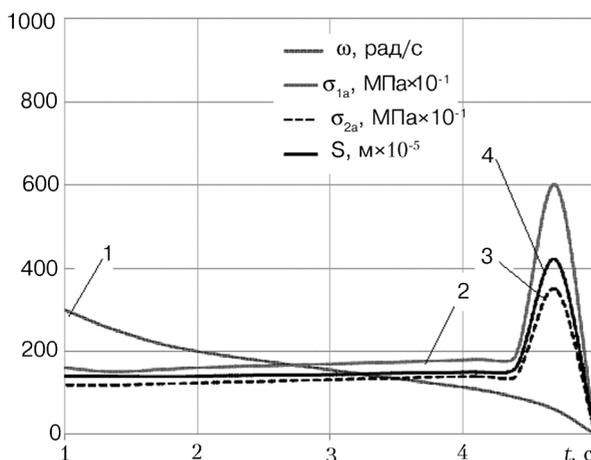


Рис. 9. Динамика изменения НДС контейнерной формы при отключении вибровозбудителя: 1 – осциллограмма круговой частоты выбега вибровозбудителя; 2 – амплитудные значения растягивающих динамических напряжений в стенке контейнера, расположенной перпендикулярно к плоскости действия вибрационных сил; 3 – то же в стенке контейнера, расположенной параллельно по отношению к плоскости действия вибрационных сил; 4 – амплитуда виброперемещений дна контейнера



Список литературы

1. Иванов В. В. Об объемно-напряженном состоянии вакуумно-пленочной формы // Литейн. пр-во. – 2005. – № 7. – С. 11-14.
2. Шинский О. И., Русаков П. В. Особенности гидросилового формирования отливок в песчаной форме, упрочняемой газовым разрежением // Металл и литье Украины. – 2008. – № 9. – С. 16-19.
3. Вербицкий В. И. Анализ эффективности встряхивающих формовочных машин путем имитационного моделирования // Литейн. пр-во. – 1985. – № 11. – С. 26-28.
4. Каменский В. В., Матвеев И. В. Газодинамические, физико-механические и фильтрационные процессы при пневмоимпульсном уплотнении формовочной смеси // Литейщик России. – 2003. – № 6. – С. 21-25.
5. Timoshenko S. Vibration Problems in Engineering. – New York: Van Nostrand Co., 1928. – 480 с.
6. Краснопольская Т. С. Акустический хаос порожденный эффектом Зоммерфельда // Акустичний вісник. – 2002. – Том. 5, № 3. – С. 35-45.
7. Русаков П. В. Способ виброформовки насыпных литейных форм с энергетическим отображением процесса дилатансии // Металл и литье Украины. – 2009. – № 4-5. – С. 12-17.
8. Найдек В. Л., Шинский О. И., Русаков П. В. Энергочастотное управление режимами вибрационной формовки // Процессы литья. – 2009. – № 4. – С. 69-76.
9. Русаков П. В. Особенности моделирования виброформовочных машин с переменной присоединяемой массой // Там же. – 2009. – № 3. – С. 35-42.
10. Русаков П. В. Шинский О. И., Здохненко В. В. Модель ЛТС с синхронизированными по частоте вибрационными машинами // Там же. – 2010. – № 3. – С. 36-45.
11. Русаков П. В. Некоторые общие принципы дуального управления процессом виброформовки // Там же. – 2010. – № 4. – С. 36-45.

Поступила 07.02.2011

УДК 621.744

В. С. Дорошенко, Ю. Н. Иванов, А. Г. Черныш

Физико-технологический институт металлов сплавов НАН Украины, Киев

ФОРМИРОВАНИЕ И МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ЛИТЕЙНОЙ ЛЕДЯНОЙ МОДЕЛИ*

Состав и структура материала литейной одноразовой ледяной модели во многом определяют качество этой модели и полученной по ней отливки, поскольку этот материал в дальнейшем используют при изготовлении литейной песчаной формы. Поэтому важно понимать механизм и кинетику затвердевания льда при получении модели, распределение в нем примесей. Рассмотрены современные модели кристаллизации с учетом теории кластеров и фракталов, приведены примеры моделей.

Ключевые слова: литейные ледяные модели, водная композиция, дендриты, кластеры, фракталы.

*Работа выполнена под руководством О. И. Шинского при участии В. П. Кравченко