

**О. В. Ноговіцин**, д-р техн. наук, старш. наук. співроб., зав. відділу;  
e-mail: alexey.nogovitsyn@gmail.com

**П. В. Русаков**, канд. техн. наук, старш. наук. співроб. ;  
e-mail: mega.2212@ukr.net

**В. П. Школяренко**, канд. техн. наук, старш. наук. співроб. ;  
e-mail: hvp@ukr.net

**К. А. Сіренко**, мол. наук. співроб. ; e-mail: thermoexp.metal@gmail.com

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ВІБРАЦІЙНОГО УЩІЛЬНЕННЯ ЛИВАРНИХ ФОРМ З УРАХУВАННЯМ АСИМЕТРІЇ ФРИКЦІЙНИХ СИЛ

Мета роботи – створення наукових основ для моделювання та аналізу взаємодії піщаної формувальної суміші з елементами ливарної форми в процесі вертикального збудження коливань ливарної форми. Під впливом зовнішніх вібраційних сил в суміші виникає змінний напружено-деформований стан, відбувається руйнування первинних структурних зв'язків і послаблюються зв'язки між її окремими елементами, здійснюються кінцеві переміщення мінеральних часток з утворенням більш щільною упаковки. В процесі фізичного моделювання розкриті особливості збудження ефекту асиметрії фрикційних сил при вібраційному ущільненні ливарних форм. Отримано експериментальні дані, що дозволяють визначити закон наростання щільності середовища і тривалість вібраційного впливу в залежності від параметрів асиметрії фрикційних сил. Встановлено загальні принципи побудови нових конструкцій ливарних форм з урахуванням асиметрії фрикційних сил. Наведено конструкцію ливарної форми для лиття порожнистих циліндричних виливків. Результати роботи розширюють уявлення про технологічний процес вібраційного формування з використанням ефекту дії асиметрії фрикційних сил.

**Ключові слова:** ливарна форма, формувальний пісок, вібраційне ущільнення, асиметрія фрикційних сил.

Технологічний парк обладнання для виготовлення циліндричних обичайок з високоміцних алюмінієвих сплавів переважно використовує листовий прокат. В цьому напрямку орієнтовано вектор досліджень на подальше удосконалення процесів безперервного лиття [1–3]. Розглядаючи в контексті з цим потенціалні схеми виготовлення гільзових заготовок доцільно зробити аналіз можливостей технологій лиття циліндричних обичайок в ливарних формах. Зокрема, останнім часом спостерігається інтенсивне удосконалення спеціальних способів лиття та побудова сучасних ливарно-технологічних систем (ЛТС) з більш широкими функціональними можливостями [4–6].

Первинною операцією в технології лиття, від чого безпосередньо залежить якість литих виробів, є процес виготовлення ливарної форми. З цих позицій розглянемо можливості використання контейнерних ливарних форм для виготовлення малих партій гільзових заготовок, в яких існує потреба виробництва оболонкових виробів.

За діючими технологіями контейнерні ливарні форми з полістироловими моделями ущільнюються на вібраційних столах, на них встановлюють ящики з піском і занурюють в піщану суміш одноразові пінопластові моделі, які в процесі лиття термічно розкладаються під впливом розплавленого металу [7–9]. Це досить розповсюджена вібраційна технологія ущільнення і вона застосовується не тільки в процесах лиття, а також в промисловості будівельних матеріалів і в інших сферах виробництва. Однак, вібраційне ущільнення контейнерів по суті не є строго детермінованим процесом і

## Проблеми технології форми

досить часто при зміні параметрів вібрації, параметрів форми (вагові, геометричні, тощо), або при переході до формування інших моделей якісне ущільнення форми не відбувається. Можливих причин розладу процесу значна кількість.

Проведене моделювання роботи вібраційних машин з мінливою масою ливарних форм [10] та виконані емпіричні дослідження з вимірюванням тиску суміші в процесі ущільнення кварцового піску [11], вказують на те, що специфіка вібраційного руху формувального матеріалу певною мірою пов'язана з наявністю в ньому двох протилежних станів. Перший характеризується гравітаційним падінням і осипанням маси під дією зовнішніх збурень. Однак другий стан (поводження сипучого вогнетривкого наповнювача під впливом вібрації) характеризується тим, що через певний проміжок часу відбувається біфуркація процесу і формувальний пісок позбавляється руху і завмирає. Звідси випливає висновок про те, що при використанні кварцових пісків, які ущільнюються в опоках вібраційними пристроями, домогтися глибокої щільності піску в контейнері при наявності порожнистих моделей вельми складно. Для кількісної оцінки сказаного проводили вібраційне ущільнення піщаних форм з використанням висушеного кварцового піску марки ПК-3 із залишковою вологістю в межах 0,6–0,8%. Засвідчено результати: в середині ливарних форм заввишки 0,7–1,2 м утворюються статично нерухомі зони які практично не реагують на вібраційний вплив кругових коливань збудника на частоті 50 Гц. Проведене моделювання процесу з аналізом причин виникнення статичної рівноваги піску навколо моделей в середині форми показало, що процес вібраційного ущільнення суміші в контейнері є багатофакторним і на нього впливають не тільки параметри вібрації, але й ряд не пов'язаних з цим процесом параметрів: властивості формувальної суміші, параметри ливарної форми, параметри моделей і т. д., рис. 1.



Рис. 1 Чинники вібраційного ущільнення ливарних форм

Отже, підсумовуючи отримані результати можна зробити висновки, що при вібраційному ущільненні моделей будь-який з наведених на рис. 1 чинників може привести, в кінцевому підсумку, до неякісного ущільнення пустотілих моделей у формувальній суміші. Щоб частково локалізувати це негативне явище запропоновано попередньо перевіряти хід процесу за допомогою спеціального пробника. Індикаторну модель – пробник (рис. 2) виготовлено, з того ж матеріалу, що й моделі.

<sup>1</sup>ДСТУ Б.В.2.7-131:2007 Пісок кварцовий. Технічні умови

Пробник 1 засипали в контейнері 2 кварцовим піском 3 і піддавали вібраційному ущільненню на вібростенді 4. Конструкція пробника мала ряд циліндричних отворів і по глибині затікання  $H$  піску в отвори різних діаметрів  $D$  приймає корегуючі рішення стосовно глибини розміщення моделей, які мали подібні порожнини. Проте застосування пробника не вирішувало в цілому проблеми підвищення ефективності вібраційного ущільнення формувальної суміші.

Отже, подальшою метою стала розробка способу і формувального обладнання, яке б дозволяло досягати високої щільності кварцового піску в ливарних формах навколо моделей. Згодом знайдено ефективне технічне рішення щодо вібраційного ущільнення піску. Воно полягає в тому, що для збудження направленного руху піску створюють фрикційну асиметрію в циклічній взаємодії корпусних деталей форми з частинками формувальної суміші.

Для цього в ливарних формах у вигляді опоки-контейнера, що має бокові стінки і дно, на внутрішній стороні стінок в напрямках колінарних висоти опоки-контейнера, було сформовано анізотропний шорсткий рельєф, який при русі вгору і вниз проявляє нерівні коефіцієнти ковзання по формувальній суміші.

На рис. 3 наведено конструкцію ливарної форми для лиття циліндричних обичайок, та показано фрагмент поверхні з анізотропним шорстким рельєфом, (вид А), що контактує з частинками формувальної суміші, який при дії вертикальної вібрації зі швидкістю  $v_1$  генерує силовий ущільнюючий рух частинок формувальної суміші зі швидкістю  $v_2$ .

Основними конструктивними деталями опоки-контейнера є бокові стінки 1 і дно 2. На внутрішній стороні стінок 1 в напрямках колінарних висоти опоки сформовано анізотропний шорсткий рельєф 3, який при русі вгору і вниз проявляє нерівні коефіцієнти ковзання по формувальній суміші 4. При формуванні габаритних ливарних форм опока-контейнер додатково включає каркасну комірчасту кришку 5, та встановлені усередині формувального простору і жорстко зв'язані з дном 2 стрижньові нагнітачі 6 формувальної суміші. Стрижньові нагнітачі встановлюють поблизу блоку моделей 7 і жорстко зв'язують з дном 2. Каркасна комірчаста кришка 5, розташовується всередині опоки-контейнера таким чином, що може спиратися на стрижньові нагнітачі 6. Вона надає формі підвищену жорсткість, а також виконує допоміжну функцію фіксації ливарно-ливникової системи 8 у формі.

На поверхнях комірок кришки 5 і поверхнях стрижньових нагнітачів 6 сформовано анізотропний шорсткий рельєф 9, який проявляє нерівні коефіцієнти ковзання по формувальній суміші при русі опоки-контейнера вгору і вниз.

Анізотропний шорсткий рельєф 9 сформовано шляхом послідовного чергування виступів 10 і западин 11 (див. рис. 3, Б) які утворюють на поверхні пиловидні зубці. Пиловидні зубці мають форму трикутника з нахилом двох граней так, що вони забезпечу-

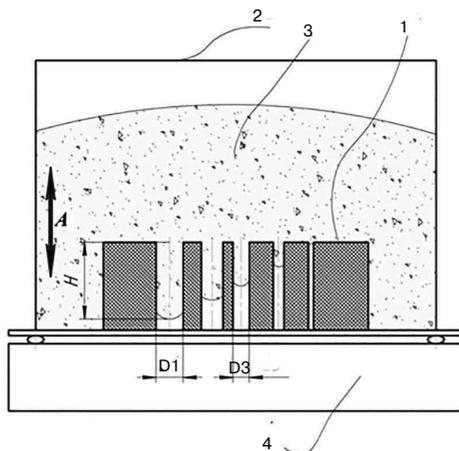


Рис. 2. Пробник

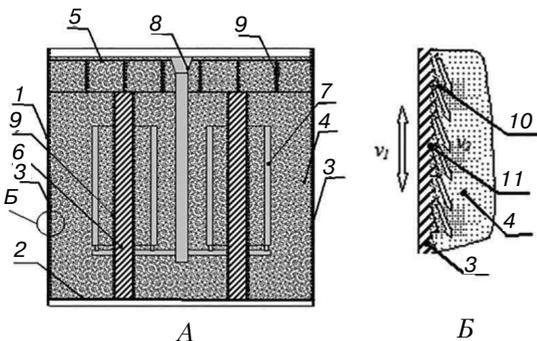


Рис. 3. Ливарна форма для лиття циліндричних обичайок

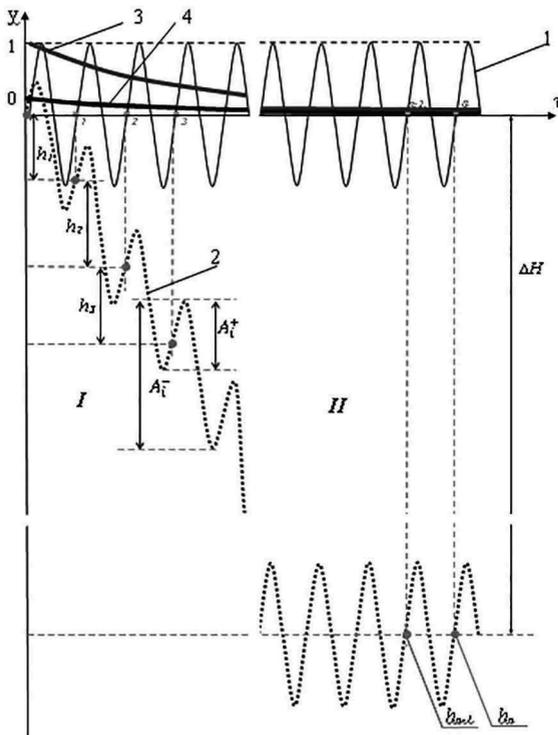


Рис. 4. Суміщені часові діаграми основних характеристик процесу вібраційного формування

На суміщених часових діаграмах кривими 1, 2, показано:

крива 1 – часова циклічна діаграма з  $n$  циклів ( $i = 1, 2, 3...n-1, n$ ) вертикальних гармонічних коливань опоки з амплітудою  $y = 1$ , в кожному циклі;

крива 2 – часова циклічна діаграма з  $n$  циклів вертикальних коливань та зсувів формувальної суміші, що контактує з анізотропною шорсткою поверхнею,  $A_i$  з амплітудою, тут:  $A_i^+$  – значення амплітуди позитивного зсуву частинок формувальної суміші в  $i$ -му циклі при русі контейнера вгору;  $A_i^-$  – значення амплітуди негативного зсуву частинок формувальної суміші в  $i$ -му циклі при русі контейнера вниз;

крива 3 – показник, який відображає коефіцієнт ковзання  $S_{\uparrow}$  анізотропною шорсткого рельєфу по формувальній суміші при русі контейнера вгору;

крива 4 – показник, який відображає коефіцієнт ковзання  $S_{\downarrow}$  анізотропною шорсткого рельєфу по формувальній суміші при русі контейнера вниз.

**Суть процесу анізотропного вібраційного ущільнення.** При формуванні ливарних форм на опоку-контейнер з формувальною сумішшю та блоком моделей циліндрів (див. рис. 3) накладають вібрацію, що включає серію з  $i$  циклів вертикальних коливань ( $i = 1, 2, 3...n-1, n$ ) і таким чином збуджують гравітаційне осипання формувальної суміші у внутрішньому просторі форми. Для підвищення ефективності ущільнення ливарних форм в процесі механічних коливань опоки-контейнера утворюють фрикційну асиметрію в циклічній взаємодії корпусних деталей форми з частинками формувальної суміші і при цьому у внутрішньому просторі форми циклічними коливаннями корпусних деталей форми додатково генерують силовий ущільнюючий рух формувальної суміші.

Генерацію силового руху проводять в контактних зонах анізотропного шорсткого рельєфу 3 та анізотропного шорсткого рельєфу 9 з формувальною сумішшю 4, шляхом збудження вібраційних рухів опоки-контейнера.

В процесі вібрації опоки-контейнера на частоті  $f$  відбувається вертикальний синхронний рух поверхонь деталей контейнера в прямому і зворотному напрямку

ють коефіцієнт ковзання анізотропно шорсткого рельєфу по формувальній суміші при русі контейнера вгору більше за коефіцієнт ковзання анізотропно шорсткого рельєфу при русі контейнера вниз.

Призначенням каркасної комірчастої кришки 5 є забезпечити підвищення ефективності ущільнення частинок піску в верхніх шарах формувальної суміші в ливарній формі, а стрижньових нагнітачів 6 – забезпечити підвищення ефективності ущільнення формувальної суміші навколо блоку моделей 7, та в зонах віддалених від бокових стінок опоки-контейнера.

На рис. 4 наведено суміщені часові діаграми основних характеристик процесу вібраційного формування. Відрізок часу, в якому відбувається вібраційне ущільнення з варіаційними змінами часових діаграм, відображено стадія I, а кінцева стадія II відображає відрізок часу вібраційного навантаження форми, в якому формувальна суміш досягає ущільненого стану.

зі швидкістю  $v_1 = 2Af$  (див. рис. 3, Б). В результаті контактної динамічної взаємодії поверхонь деталей опоки-контейнера з формувальною сумішшю, прилегли до контактуючих поверхонь шари формувальної суміші також здійснюють коливальні рухи на частоті  $f$  вібрації ливарної форми (див. рис. 4., крива 2). Враховуючи той факт, що контактуючі поверхні мають анізотропний шорсткий рельєф, який проявляє нерівні коефіцієнти ковзання по формувальній суміші при русі опоки-контейнера вгору і вниз, то на стадії I швидкість руху формувальної суміші в процесі вібраційного ущільнення буде меншою синхронної швидкості  $v_1$ . В кожному циклі механічних коливань, різниці швидкостей руху анізотропної шорсткої поверхні  $v_1$  і формувальної суміші  $v_2$  залежать від коефіцієнта ковзання  $S_{\uparrow}^i$  вгору, ( $S_{\uparrow}^i = \frac{v_1 - v_2}{v_1}$ ) та коефіцієнта ковзання  $S_{\downarrow}^i$  вниз ( $S_{\downarrow}^i = \frac{v_1 - v_2}{v_1}$ ).

В перших циклах вібраційного формування суміш знаходиться у стані низької щільності, і тому при русі контейнера вгору будуть високі, близькі до одиниці  $S_{\downarrow}^i \approx 1$ , значення коефіцієнта ковзання. Але при русі контейнера вниз, синхронна швидкість  $v_1$  руху деталей контейнера стає близькою до швидкості  $v_2$  руху частинок формувальної суміші, а коефіцієнт ковзання буде близьким до нульового значення  $S_{\downarrow}^i \approx 0$ .

Отже, в кожному вібраційному циклі анізотропний шорсткий рельєф при механічних коливаннях формує нерівні коефіцієнти ковзання  $S_{\uparrow}^i$  та  $S_{\downarrow}^i$ , що утворює фрикційна асиметрію в циклічній взаємодії корпусних деталей форми з частинками формувальної суміші, і забезпечує генерацію силового ущільнюючого руху формувальної суміші.

Генерація силового ущільнюючого руху формувальної суміші відбувається за рахунок примусового зсуву частинок піску, так що за кожний цикл механічних коливань контактуюча з анізотропним шорстким рельєфом формувальна суміш зсувається на певну відстань  $h_i$ , при цьому ущільнюється, а також змінює значення коефіцієнтів ковзання.

Абсолютне значення  $h_i$  примусового зсуву в  $i$ -му циклі залежить від розмаху амплітуди  $U$  вертикальних коливань анізотропної поверхні, а також від коефіцієнтів ковзання анізотропної поверхні по формувальній суміші. Враховуючи той факт, що в процесі здійснення опоки-контейнером механічних коливань змінюється насипна щільність формувальної суміші, то, відповідно, відбувається зменшення значень коефіцієнтів ковзання і зменшується різниця між їх значеннями, поступово наближаючись до нуля.

На кінцевій стадії II формувальна суміш досягає ущільненого стану, а максимальне зменшення висоти стовпа буде визначатися як:

$$\Delta H = \sum_{i=1}^n h_i,$$

(див. рис. 4, крива 2).

Для ущільненої формувальної суміші (останній цикл вібраційного  $i = n$  навантаження,) показник ковзання буде близький до нульового значення  $S_{\uparrow}^n \approx 0$ .

### Висновки

Для автомобілебудування, авіації та космічної техніки найбільший інтерес представляють високоміцні сплави систем Al-Cu (Д16), Al-Zn (B95), Al-Mg (AMг6). Однак оптимальна технологія лиття герметичних циліндричних оболонок із зазначених матеріалів базується на наукових розробках, що стосуються процесів виготовлення ливарних форм.

Отже, розглядаючи в цілому результати, отримані в ході проведених досліджень, можна зробити висновок, що застосування в конструкціях контейнерів нових додаткових елементів, на поверхнях яких сформовано анізотропний шорсткий рельєф, який при русі вгору і вниз проявляє нерівні коефіцієнти ковзання по формувальній суміші,

дозволяє досягати високої щільності дисперсного середовища, при формуванні порожнистих циліндричних моделей, і таким чином розв'язати проблеми з розробкою ефективних ливарних форм.

### Список літератури

1. Ноговицын А. В., Баранов И. Р., Назаренко В. А., Машкин А. М. Физическое моделирование течения расплава при валковой разливке. *Процессы литья*. 2015. № 4. С. 69–73.
2. Ноговицын А. В., Баранов И. Р. Метод расчета протяженности зон кристаллизации и деформации при валковой разливке-прокатке. *Обработка металлов давлением*. 2013, № 1 (34). С. 170–176.
3. Ноговицын А. В., Подольцев А. Д., Кучерявая И. Н. *Трёхмерное моделирование гидродинамических процессов в двухвалковом кристаллизаторе при различных способах подачи металла*. Праці ІЕД НАНУ. 2015. Вип. 40. С. 95–102.
4. Analysis of Mold Filling in Lost Foam Casting of Aluminum: Part II-Example Applications (20090100) *International Journal of Metalcasting*, Vol. 3, Issue 1, Winter 2009, P7-25
5. Русаков П. В. *Способ принудительно миграционного уплотнения форм с несвязанным наполнителем при синхроиимпульсном управлении вибрацией и газовым разрежением*. Материалы IV Международной научно-практической конференции «ЛИТЬЕ – 2000», с. 131–132, 25–27 марта, 2008 г. Запорожье.
6. Русаков П. В. Некоторые общие принципы дуального управления процессом виброформовки. *Процессы литья*. 2010. № 4. С. 36–45 .
7. Патент US6457510 (B1) - 2002-10-01, ECLA: B22C15/10. Method for compacting moulding sand.
8. Русаков П. В. Способ виброформовки насыпных литейных форм с энергетическим отображением процесса дилатансии. *Металл и литье Украины*. 2009. № 4/5. С. 12–17.
9. Авдокушин В. П. Выбор оптимальных режимов виброуплотнения форм при литье по газифицируемому моделям. *Литейное производство*. 2001. № 4. С. 38–40.
10. Русаков П. В. Особенности моделирования виброформовочных машин с переменной присоединяемой массой. *Процессы литья*. 2009. № 3. С. 35–42 .
11. Русаков П. В. та ін. *Способ вимірювання тиску піску в ливарній формі*. Сб. Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейной индустрии» Киев. 2010. С. 235–238.

Надійшла 10.12.2020

### References

1. Nogovitsyn A. V., Baranov I. R., Nazarenko V. A., Mashkin A. M. (2015) Physical modeling of melt flow during roll casting. *Casting processes*, no 4, pp. 69–73. [in Russian].
2. Nogovitsyn A. V., Baranov I. R. (2013) The method of calculating the length of the zones of crystallization and deformation during roll casting. *Processing of metals by pressure*, no 1 (34), pp. 170–176. [in Russian].
3. Nogovitsyn A. V., Podoltsev A. D., Curly I. N. (2015) *Three-dimensional modeling of hydrodynamic processes in a two-roll mold with different methods of metal supply*. Proceedings of the IER NASU. Issue. 40, pp. 95–102. [in Russian].
4. Analysis of Mold Filling in Lost Foam Casting of Aluminum: Part II-Example Applications (20090100) *International Journal of Metalcasting*, Vol. 3, Issue 1, Winter 2009, pp. 7–25. [in Russian].
5. Rusakov P. V. (2008) *Method of forced migration compaction of forms with unbound filler in synchropulse control of vibration and gas vacuum*. Proceedings of the IV International scientific-practical conference "CASTING – 2000". Pp. 131–132, March 25–27, Zaporozhye. [in Russian].
6. Rusakov P. V. (2010) Some general principles of dual control of the vibroforming process. *Casting processes*, no 4, pp. 36–45. [in Russian].
7. Patent US6457510 (B1) - 2002-10-01, ECLA: B22C15 / 10. Method for compacting molding sand.
8. Rusakov P. V. (2009) The method of vibroforming of bulk foundry molds with energy mapping of the dilatancy process. *Metal and casting of Ukraine*, no 4/5, pp. 12–17. [in Russian].
9. Avdokushin V. P. (2001) Choice of optimal modes of vibrocompaction of forms at molding on gasified models. *Foundry production*, no 4, pp. 38–40. [in Russian].

10. Rusakov P. V. (2009) Features of modeling of vibroforming machines with variable attached mass. *Casting processes*, no 3, pp. 35–42. [in Russian].
11. Rusakov P. V. and others. (2010) The method of measuring the pressure of sand in the mold. *Sat. Promising technologies, materials and equipment in the foundry industry»*. Kiev, pp. 235–238. [in Russian].

Received 10.12.2020

**O. V. Nogovitsyn**, *Dr. Sci. (Engin.)*, the Head of the Department;

*e-mail: alexey.nogovitsyn@gmail.com*

**P.V. Rusakov**, *PhD (Engin.)*, Senior Research Scientist; *e-mail: mega.2212@ukr.net*

**V. P. Shkolyarenko**, *PhD (Engin.)*, Senior Research Scientist; *e-mail: hvp@ukr.net*

**K. A. Sirenko**, *Research Scientist*; *e-mail: thermoexp.metal@gmail.com*

Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

### **MODELING THE PROCESSES OF VIBRATION COMPACTION OF CASTING MOLDS TAKING INTO ACCOUNT THE EFFECT OF ASYMMETRY OF FRICTION FORCES**

*The purpose of the work is to create a scientific basis for modeling and analysis of the interaction of the sand molding mixture with the elements of the mold in the process of vertical excitation of vibrations of the mold. Under the influence of external vibration forces in the mixture there is an alternating stress-strain state, there is a destruction of the primary structural bonds and weakens the bonds between its individual elements, the final movements of mineral particles with the formation of denser packaging. In the process of physical modeling the peculiarities of excitation of the effect of asymmetry of frictional forces at vibration consolidation of molds are revealed. Experimental data have been obtained to determine the law of increasing density of the medium and the duration of vibration influence depending on the parameters of the asymmetry of frictional forces. The general principles of construction of new designs of foundry forms taking into account asymmetry of frictional forces are established. The design of a casting mold for casting hollow cylindrical castings is given. The results of the work expand the idea of the technological process of vibration formation using the effect of asymmetry of frictional forces.*

**Keywords:** *The sand mold, molding sand, vibrating seal, asymmetry of frictional forces.*