

УДК66-987
Код ГРНТИ 53.37

doi 10.54708/19926502_2026_30311318

К проблеме трамбовки набивных масс индукторов цинкоплавильных печей

У.Ш. Шаяхметов^{1*}, А.В. Захаров¹, А.Р. Хамидуллин¹,
И.В. Недосеко², В.Ф. Юлдашбаева³, В.В. Чудинов⁴

¹ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», Институт технологий и материалов, г. Уфа, Россия

²ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Архитектурно-строительный институт, г. Уфа, Россия

³Институт геологии УФИЦ РАН, г. Уфа, Россия

⁴ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», Бирский филиал, г. Бирск, Россия

Аннотация. В работе дается количественная оценка процесса утрамбовки набивных масс индукторов плавильных печей и на этой основе предлагается автоматизация технологии, исключающая влияние человеческого фактора на качество и долговечность футеровки индукторов цинкоплавильных печей.

Ключевые слова: набивная масса, утрамбовка, футеровка индуктора, долговечность футеровки индуктора.

*ralzax@yandex.ru

Введение

После того как экспертные исследования в лаборатории установили высокое качество набивного материала для футеровки и защиты индукторов цинкоплавильных печей, нет гарантии, что спеченная футеровка обеспечит безаварийную работу в течении длительного времени эксплуатации и числа циклов плавки. Так как отсутствует количественная оценка процесса и степени уплотнения. Качество набивки достигается, во-первых, полной гомогенизацией смеси и, во-вторых, полным уплотнением набивной массы в корпусе индуктора. Неравномерное уплотнение приводит к нарушению гомогенности по плотности, к неполному удалению воздуха из пор и к растрескиванию при спекании. В работе рассматриваются технологии уплотнения набивной массы индуктора цинкоплавильной печи на основе количественных оценок.

Количественная оценка степени трамбовки осуществляется на основе реологических свойств материалов. Фундаментальные исследования в этом направлении проведены в работе [1]. Реологические свойства грунтов и насыпных масс могут быть различными. В работе [1] изучалось проникновение стержня в песок, глину и гранит в опытах, схематически представленных на Рис. 1.

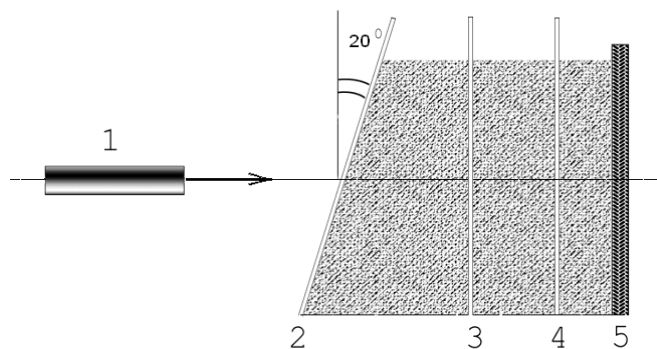


Рисунок 1. Схема исследования реологических свойств грунта и насыпных материалов.

Испытуемый материал укладывается в виде трапеции с прослойками из бумаги. Наклонная плоскость позволяет менять расстояние от границы до листа бумаги. Расстояние, которое стержень прошел в материале, определяется по листу бумаги с последним пробитым отверстием (также это расстояние можно измерить щупом: от верха кратера до верха стержня + длина стержня).

Рабочей формулой для сухого песка является формула Галилео Галилея: объем вытесненного из кратера песка пропорционален кинетической энергии стержня $a V = 0,5mv^2$. Из нее получается формула, связывающая глубину проникновения стержня с константой материала a :

$$a = \rho_c \frac{l_c}{L_k} v^2, \quad (1)$$

где L_k – глубина проникновения; l_c – длина стержня; ρ_c – плотность материала стержня; v^2 – квадрат начальной скорости стержня. По данным, приведенным в [1] для сухого песка, $a = 204,4$ Мпа.

Для мелкого сухого песка предлагается формула глубины проникновения [2]:

$$L_k = 0,1\rho_c \left(26,2\sqrt{d} - \frac{d}{l_c} + 1,75l_c \right) * (v/1000)^{0,4}. \quad (2)$$

В работе [3] предложена формула для глубины проникновения стержня в песок, глину, гранит:

$$L_k = 8 \cdot 10^{-4} SN \left(\frac{m}{A} \right)^{0,7} \ln(1 + 2,15(v/100)^2). \quad (3)$$

В работе [1] приводится экспериментальная формула для проникновения ударника в вязкую среду:

$$L_k = \left(\frac{m}{2bA} \right) \ln(1 + \frac{b}{a}(v/100)^2). \quad (4)$$

Здесь m – масса ударника, который по форме может отличаться от цилиндра; A – площадь наконечника ударника, а S – числовой фактор острия наконечника; N – константа материала, как и a и b .

Результаты исследования этих сред и сопоставление с приведенными формулами приводятся в работе [1] в графической форме.

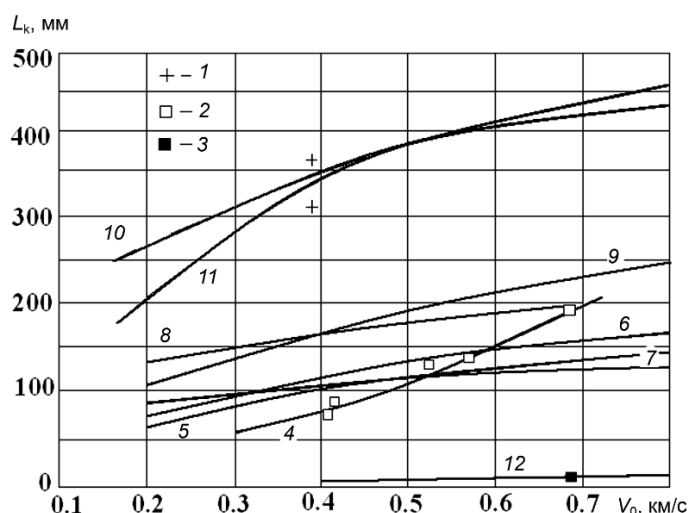


Рисунок 2. Теоретические графики глубины проникновения стержней в различные среды по формулам (1)–(4) и экспериментальные точки.

Экспериментально подтверждается только формула (1). Используем ее для определения качества трамбовки набивной массы индуктора цинкоплавильной печи. высокое качество набивного материала для футеровки и защиты индукторов цинкоплавильных печей нет

гарантии, что спеченная футеровка обеспечит безаварийную работу в течении длительного времени эксплуатации и числа циклов плавки. Так как отсутствует количественная оценка процесса и степени уплотнения. Качество набивки достигается, во-первых, полной гомогенизацией смеси и, во-вторых, полным уплотнением набивной массы в корпусе индуктора. Не равномерное уплотнение приводит к нарушению гомогенности по плотности, к неполному удалению воздуха из пор и к растрескиванию при спекании. В работе рассматриваются технологии уплотнения набивной массы индуктора цинкоплавильной печи на основе количественных оценок.

Ручное уплотнение набивной массы

Качественное уплотнение достигается при послойной засыпке набивной массы в корпус индуктора, послойном удалении воздуха из пор в набивной массе и послойной трамбовке.

При этом засыпается слой 100 мм с насыпной плотностью, которая зависит от марки насыпной массы. Поверхность насыпной массы выравнивается до строго горизонтальной, затем протыкается вилкой с длиной зуба 95 мм для создания каналов вывода воздуха при трамбовке. Из данных испытаний 2-го этапа известно, что для насыпной массы марки ТАТ насыпная плотность составляет 2450 кг/м^3 , а плотность полностью утрамбованной массы, (после чего уплотненная масса не дает усадку при давлении под прессом 250 МПа), составляет 3060 кг/м^3 . Для достижения такого уплотнения высота слоя с 100 мм должна уменьшиться до 80мм при трамбовке. Если при одном проходе ручной трамбовкой или трамбовкой с электроприводом высота слоя уменьшается на 1,5 мм, то потребуется 13 проходов. И так для каждого последующего слоя до полной высоты засыпки корпуса индуктора набивной утрамбованной массой.

Очевидно, что весь цикл работ очень затратен и приводит работников как к физической усталости, так и к психологической из-за требуемой точности многочисленных ударов трамбовки. Усталость приводит работника к сокращению силы удара трамбовкой и к сокращению числа проходов, что приводит к неоднородности плотности утрамбованной насыпной массы и к неполному уплотнению, неполному удалению воздуха из пор, а в итоге к не совсем качественной футеровке индуктора.

Автоматическая технология уплотнения набивной массы

Чтобы избежать такого исхода трамбовки, приводящего к браку, имеется два пути. Первый путь, который предлагает главный технолог завода в германии – контроль за ходом изготовления футеровки индуктора со стороны специально назначенного технолога, особенно в праздничные дни и в ночные смены. Второй путь – автоматизация процесса набивки насыпной массы индуктора с применением компьютерного управления, исключающего участие человека в наиболее трудоемком процессе трамбовки. Такую автоматическую систему несложно изготовить, а ее изготовление и эксплуатация позволит уменьшить число работников с трех, включая контролирующего технолога, до одного. При этом сокращаются затраты на изготовление футеровки индуктора как в денежном выражении, так и во времени, (автомат работает быстро и непрерывно).

Устройство для непрерывной трамбовки состоит из строительного 3D-принтера. 3D-принтер состоит из четырех опор, на которых закрепляются две параллельные горизонтальные балки – направляющие. Их горизонтальность устанавливается регулировкой опор по высоте. По горизонтальным параллельным балкам-направляющим перемещается перпендикулярная им балка-направляющая вдоль параллельных балок (ось ОХ в системе координат 3D-принтера). Вдоль перпендикулярной балки перемещается подвес – держатель головки 3D-принтера (ось ОУ в системе координат 3D-принтера). Держатель головки 3D-принтера может подниматься и опускаться по своей направляющей (ось ОZ в системе координат 3D-принтера). Передвижения по трем осям осуществляются при помощи шаговых двигателей, на которые в каждый тактовый интервал времени подается или не подается

электрический импульс от усилителя-драйвера в зависимости от поступившего на драйвер сигнала управления в g-кодах на каждый драйвер. Шаг перемещения 3D головки по трем осям определяется конструкцией 3D-принтера и настройкой компьютерной программы. Траекторию головки 3D-принтера в каждом слое по высоте задает программа слайсера по объемной фигуре области обработки в 3D Компасе.



Рисунок 3. 3D-принтер производства Ярославского завода АМТ.

В автомате по трамбовке экструдер строительного 3D-принтера используется для засыпки слоя набивной массы в корпус индуктора высотой 100 мм. Затем экструдер заменяется электромагнитным утрамбователем, который прикрепляется к крепежам экструдера. После прохождения 13 раз утрамбователем по всей поверхности насыпной массы и ее уплотнения на 20мм утрамбователь заменяется на экструдер и засыпается второй слой. После его уплотнения на 20 мм засыпается третий слой, и так до тех пор, пока корпус индуктора не будет заполнен до верха уплотненной набивной массой. В местах, где требуется горизонтальное уплотнение или наклонное, головка проходит не 13 раз, а 20 раз, что предусматривает программа передвижения головки 3D-уплотнителя. В особых местах возможна ручная трамбовка при выключенном 3D-утрамбователе.

Приведенные данные подкреплены математическими расчетами и экспериментальной проверкой.

Различные по реологии массы описываются разными эмпирическими или феноменологическими формулами на глубину проникновения стержня с известной длиной, плотностью и начальной скоростью при первом соприкосновении стержня с массой той или иной реологии. Обзор и сравнение с экспериментом приведены в работе [4], в которой показано, что сухие сыпучие смеси или набивные массы описываются наилучшим образом формулой Галилео Галилея:

$$aV = \frac{1}{2}m_c v^2, \quad (5)$$

где постоянная a – работа по вытеснению единицы объема сыпучей массы ударным стержнем; V – объем вытесненной ударником массы из кратера; m_c – масса стержня; v – скорость стержня.

Испытания, проведенные авторами работы [4], показали, что для сухой песчаной массы $a = 203$ МПа. За одну секунду стержень электромагнитного трамбователя с поперечной площадью 1 см^2 совершит 50 ударов и покроет площадь трамбовки 50 см^2 . При глубине

трамбовки 1,5 мм будет вытеснен объем $V = 50 \times 0,15 \text{ см}^3 = 7,5 \text{ см}^3$. Для этого потребуется электрическая энергия не менее $aV = 203 \times 10^6 \times 7,5 \times 10^{-6} = 1522,5 \text{ Дж/с}$. То есть, требуется электромагнитный вибрационный трамбователь типа погружного вибрационного насоса мощностью 1,5 кВт.

Строительный 3D-утрамбователь может с успехом применяться для трамбовки насыпных слоев из дренажного щебня, гравийно-песчаной смеси, песка в основе, на которую заливается бетонная армированная плита – фундамент малоэтажного здания, на котором строительный 3D-принтер в последующем напечатает стены здания. Мощность трамбователя рассчитывается по предложенной методике в зависимости от постоянной a насыпной основы и площади обработки за одну секунду. Равномерная трамбовка основы позволяет сократить толщину бетонной плиты под фундамент [5–7]. Технологические аспекты описаны в работах [8–12].

Заключение

Приведенные в работе насыпная и утрамбованная плотность и связанные с ними высота насыпного слоя и высота утрамбованного слоя, как и необходимая мощность трамбователя, позволяют вести объективный контроль процесса утрамбовки набивной массы футеровки индуктора цинкоплавильной печи как в ручном, так и в автоматическом режимах, исключающие брак футеровки.

Литература:

1. Коняев А.А., Герасимов А.В., Платова Т.М., Пашков С.В. Экспериментально-теоретическое исследование проникания компактных и удлиненных ударников в мягкий и прочный грунт // Известия вузов. Физика. 2012. Т. 55. № 9/3. С. 7. [Konayev A.A., Gerasimov A.V., Platova T.M., Pashkov S.V. Experimental and theoretical study of the penetration of compact and elongated impactors into soft and hard soil // Izvestiya Vuzov. Fizika. 2012. Vol. 55. No. 9/3. P. 7 (in Russian)].
2. Savvateev A.F., Budin A.V., Kolikov V.A., Rutberg H.G. High-speed penetration into sand // Int. J. Impact Eng. 2001. Vol. 26. P. 675–681.
3. Young C.W. Contractor Report. SAND 97-2426. Unlimited Release. UC-705, 1997. 24 p.
4. Яханов В.А., Далецкий А.П. Оптимизация гранулометрического состава мелкого заполнителя как фактор формирования плотной структуры вибропрессованного бетона. В сб.: Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием XIII «Современные проблемы строительного материаловедения». Уфа: РИЦ БашГУ, 2018. С. 215–218. [Yakhanov V.A., Daletsky A.P. Optimization of the granulometric composition of fine aggregate as a factor in the formation of a dense structure of vibration-pressed concrete. In: Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation XIII “Modern Problems of Construction Materials Science”. Ufa: Bashkir state University, 2018. P. 215–218 (in Russian)].
5. Юрьев В.В., Резван С.А. Совершенствование технологии производства двухслойной тротуарной плитки методом полусухого вибропрессования // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. № 3(84). С. 105–112. [Yuryev V.V., Rezvan S.A. Improving the production technology of two-layer paving slabs using the semi-dry vibration pressing method // Vestnik Volgogradskogo Gosudarstvennogo Arkhitekturno-Stroitel'nogo Universiteta. Series: Construction and Architecture. 2021. No. 3(84). P. 105–112 (in Russian)].
6. Ефименко Ю.С., Касторных Л.И. Особенности подбора составов бетона для двухслойных элементов мощения // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 4(81). С. 112–118 [Efimenko Yu.S., Kastornyykh L.I. Features of the selection of concrete compositions for two-layer paving elements // Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov. 2020. No. 4(81). P. 112–118 (in Russian)].
7. Сватовская Л.Б., Макарова Т.В. Влияние гранулометрии заполнителя на плотность и износостойкость декоративных бетонов // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 5(88). С. 134–139. [Svatovskaya L.B., Makarova T.V. Influence of aggregate granulometry on the density

- and wear resistance of decorative concrete // Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov. 2021. No. 5(88). P. 134–139 (in Russian)].
8. Шаяхметов У.Ш., Хамидуллин А.Р., Захаров А.В. Технология набивной массы для футеровки индукторов цинкоплавильных печей из корундовой сухой смеси. В сб.: Современные технологии композиционных материалов: материалы XI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (г. Уфа, 24 апреля 2026 г.) / отв. ред. У. Ш. Шаяхметов. Уфа: УУНиТ, 2026. С. 223–225. [Shayakhmetov U.Sh., Khamidullin A.R., Zakharov A.V. Technology of ramming mass for lining inductors of zinc-smelting furnaces from corundum dry mixture. In: Modern technologies of composite materials: Proceedings of the XI All-Russian scientific and practical conference with international participation (Ufa, April 24, 2026) / ed. U. Sh. Shayakhmetov. Ufa: Ufa University of Science and Technology, 2026. P. 223–225 (in Russian)].
9. Шаяхметов У.Ш., Хамидуллин А.Р., Захаров А.В., Чудинов В.В. Исследование и разработка малоусадочной композиционной керамики на основе корунда. В сб.: Материалы XI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Уфа: УУНиТ, 2026. С. 228–235. [Shayakhmetov U.Sh., Khamidullin A.R., Zakharov A.V., Chudinov V.V. Research and development of low-shrinkage composite ceramics based on corundum. In: Proceedings of the XI All-Russian scientific and practical conference with international participation. Ufa: Ufa University of Science and Technology, 2026. P. 228–235 (in Russian)].
10. Шаяхметов У.Ш., Хамидуллин А.Р., Захаров А.В. и др. Определение качественных показателей огнеупорной набивной массы. В сб.: Материалы XI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Уфа: УУНиТ, 2026. С. 248–264. [Shayakhmetov U.Sh., Khamidullin A.R., Zakharov A.V., et al. Determination of quality indicators of refractory ramming mass. In: Proceedings of the XI All-Russian scientific and practical conference with international participation. Ufa: Ufa University of Science and Technology, 2026. P. 248–264 (in Russian)].
11. Шаяхметов У.Ш., Хамидуллин А.Р., Захаров А.В. и др. Определение целевых величин определяемых параметров, с обоснованием выбранных значений. В сб.: Материалы XI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Уфа: УУНиТ, 2026. С. 265–282. [Shayakhmetov U.Sh., Khamidullin A.R., Zakharov A.V., et al. Determination of target values of the determined parameters with justification for the selected values. In: Proceedings of the XI All-Russian scientific and practical conference with international participation. Ufa: Ufa University of Science and Technology, 2026. P. 265–282 (in Russian)].
12. Шаяхметов У.Ш., Хамидуллин А.Р., Захаров А.В., Чудинов В.В. Технология получения набивной массы для футеровки индукторов циклоплавильных печей из корундовой сухой смеси // Новые огнеупоры. 2026. № 5/6. С. 39.

Об авторах:

ШАЯХМЕТОВ Ульфат Шайхизаманович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры материаловедения и физики металлов, Уфимский университет науки и технологий, Email: rusairu@ufanet.ru.

ЗАХАРОВ Александр Васильевич, кандидат физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры материаловедения и физики металлов, Уфимский университет науки и технологий, Email: ralzax@yandex.ru.

ХАМИДУЛЛИН Айдар Раифович, кандидат физ.-мат. наук, доцент, замдиректора института материалов и технологий, Уфимский университет науки и технологий, Email: aidar_kh_r@mail.ru.

НЕДОСЕКО Игорь Вадимович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительные материалы и конструкции архитектурно-строительного института, УГНТУ, Email: nedoseko1964@mail.ru.

ЮЛДАШБАЕВА Венера Фаизовна, м.н.с. лаборатории геохимии и изотопной геологии, ИГ УФИЦ РАН, Email: yuldashbaeva94@inbox.ru.

ЧУДИНОВ Валерий Валентинович, кандидат физ.-мат. наук, доцент Бирского филиала УУНТ, Email: chudinovvv@rambler.ru.

Metadata:

Title: To the problem of tamping the packed masses of inductors of zinc melting furnaces.

Author 1: Ulfat Shaikhizamanovich Shayakhmetov, Dr. of Tech. Sci., Professor, Professor of the Department of Materials Science and Physics of Metals, Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi st., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia, Email: rusairu@UfaNet.ru

Author 2: Alexander Vasilyevich Zakharov, Cand. of Phys. and Math. Sci., Docent, Associate Professor of the Department of Materials Science and Physics of Metals, Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi st., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia, Email: ralzax@yandex.ru

Author 3: Aidar Raifovich Khamidullin, Ph.D. in Physics and Mathematics, Docent, Deputy Director of the Institute of Materials and Technologies, Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi st., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia, Email: aidar_kh_r@mail.ru.

Author 4: Igor Vadimovich Nedoseko, Dr. of Tech. Sci., Professor, Professor of the Department of Building Materials and Structures of the Architectural and Construction Institute, Ufa State Petroleum Technological University, 1 Kosmonavtov st., 450064 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia, Email: nedoseko1964@mail.ru.

Author 5: Venera Faizovna Yuldashbaeva, Junior Researcher of the Laboratory of Geochemistry and Isotope Geology, Institute of Geology of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 16/2 Karl Marx st., 450077 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia, Email: yuldashbaeva94@inbox.ru.

Author 6: Valery Valentinovich Chudinov, Cand. of Phys. and Math. Sci., Associate Professor, Birk Branch of Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi st., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia, Email: yuldashbaeva94@inbox.ru.

Abstract: The paper provides a quantitative assessment of the process of tamping the packed masses of inductors of melting furnaces and, on this basis, provides automation of technology that eliminates the influence of the human factor on the quality and durability of the lining of inductors of zinc melting furnaces.

Keywords: Stuffing, tamping, lining of the inductor, durability of the lining of the inductor.