

8. Результаты испытаний турбины К-25-90 в режиме теплофикационного противодавления / Н. П. Волков, А. М. Леонков, А. Д. Качан и др. // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). – 1968. – № 5. – С. 42–46.

9. Исследование работы турбинных отсеков на переменных режимах / Н. П. Волков, А. М. Леонков, А. Д. Качан и др. // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). – 1969. – № 7. – С. 45–51.

10. Леонков А. М., Качан А. Д. Выбор расчетных характеристик части низкого давления теплофикационных турбин // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). – 1969. – № 5. – С. 43–48.

11. Методика выбора оптимальных расчетных характеристик турбин типа ТК для АТЭС / А. Д. Качан, А. М. Леонков, В. М. Сыропушинский, Б. В. Яковлев // Научные и прикладные проблемы энергетики. – Мн.: Выш. шк., 1979. – Вып. 6. – С. 12–16.

12. M ü h l h ö u s e r H. Heizturbinen, ein Beitrag zur besseren Ausnützung der Primärenergie / Brown Boveri Mittellilungen, 1982. – С. 423–430.

13. Bergman D., Haase H., Zöerner W. Design Requirements for Turbines with Aeat Extraction. International Conference on modern Power Stations / France, 1985. – С. 1–11.

14. Савин В. И., Левин Л. И. Современные ТЭС Польской Народной Республики // Проектирование систем теплоснабжения: Сб. тр. / Промэнергопроект. – М., 1973. – Вып. 4. – С. 112–123.

15. Кяер С. Опыт проектирования и эксплуатации энергоблоков на сверхкритические параметры пара в Дании // Электрические станции. – 2002. – № 3. – С. 63–68.

16. Бунин В. С. Исследование работы теплофикационных турбин в различных системах теплоснабжения. Работа ВТИ. Т. 1344, 1966.

17. Яковлев Б. В. Исследование влияния режимов ступенчатого подогрева сетевой воды на выбор оптимальных поверхностей нагрева сетевых подогревателей турбин // Теплоэнергетика. – Мн., 1973. – Вып. 3.

18. Качан А. Д., Яковлев Б. В. Справочное пособие по технико-экономическим основам ТЭС. – Мн.: Выш. шк., 1982. – 318 с.

Поступила 29.03.2002

УДК 536.7+66.047

## **НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ УСАДКИ КЕРАМИЧЕСКОЙ МАССЫ ПЛАСТИЧЕСКОГО ФОРМОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ЛУКОМЛЬСКОЙ ГЛИНЫ**

**ИВАНОВСКИЙ И. К.**

*УП «Минский завод стройматериалов»*

**Инж. КАЛИНИЧЕНКО Е. С., докт. техн. наук, проф. ОСИПОВ С. Н.**

*Белорусский национальный технический университет*

Процессы усадки керамических масс во время сушки глиняных изделий пластического формования являются основной причиной образования трещин вследствие неравномерных деформаций, приводящих к ухудшению внутренней структуры и снижению качества изделий. Как правило, значительная усадка глиняных изделий при сушке начинается от формочной влажности и продолжается до определенной для каждой глины и

условий ее сушки критической влажности, после которой коэффициент усадки резко (примерно на порядок) уменьшается, и ее уже можно не учитывать.

Обычно считается, что в течение периода значительной усадки глиняных масс величина коэффициента усадки остается приблизительно постоянной, хотя в действительности при внимательном изучении усадочных зависимостей строгой линейности не наблюдается.

Изредка встречаются глины, у которых процесс основной усадки протекает двухступенчато, когда при некоторой промежуточной влажности величина коэффициента усадки существенно изменяется. В качестве известного примера можно назвать одинцовскую глину, усадочные свойства которой исследованы в [1].

В начале сушки при влажности 26...19 % усадка глины происходит наиболее интенсивно с коэффициентом объемной усадки  $\beta_v \approx 1,72 \% / \%$  (коэффициент линейной усадки  $\beta_l \approx 0,57$ ). В диапазоне влажности 19...8 % усадка происходит с меньшей интенсивностью ( $\beta_v \approx 1,30 \% / \%$  и  $\beta_l \approx 0,43 \% / \%$ ). Средний коэффициент усадки в диапазоне влажности 26...8 % составил  $\beta_v \approx 1,56 \% / \%$  ( $\beta_l \approx 0,52$ ).

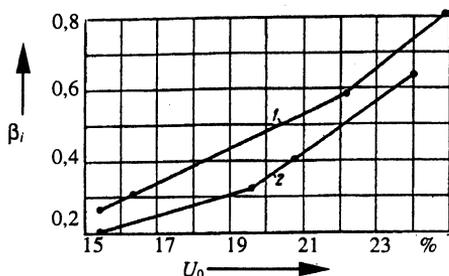


Рис. 1. Зависимость коэффициента линейной усадки дорогинского суглинка (1) и его смеси с добавкой 10 % дегидратированного суглинка (2) от формовочной влажности

Также известны [2] случаи непрерывного уменьшения величины коэффициентов усадки керамических масс, составленных на основе суглинков (рис. 1). Для разных суглинков (клешихинский, омский и дорогинский) при уменьшении формовочной влажности с 25...28 до 15 % коэффициенты усадки плавно уменьшаются в 1,5...3,0 раза.

На Минском заводе строительных материалов формование кирпича-сырца производится из шихты,

состоящей из 80 % лукомльской глины и 20 % гранитного отсева, на прессах (экструдерах) при вакууме 85...90 кПа.

Так, по данным [3], в результате вакуумирования карамышевской глины величина  $\beta_l = 0,0055$  1/% уменьшается до  $\beta_l = 0,0050$  1/% при значительном изменении сушильных свойств. Однако большого изменения коэффициентов усадки формовочных масс после вакуумирования при сушке не установлено.

Существует несколько точек зрения на природу усадки. Согласно капиллярной теории [4–8], усадка происходит вследствие изменения содержания влаги в порах и капиллярах, которое приводит к изменению сил капиллярного давления, вызывающего стягивание твердого скелета тела. По коллоидной теории [9], усадка происходит из-за высыхания коллоидной массы — основной составляющей набухшего коллоидного тела. Согласно теории напряженных мембран [10], поверхностная водная пленка действует на частицы подобно упругой резиновой пленке, сжимающей их.

В [11] установлено превалирующее влияние на усадку капиллярных сил. Вероятно, в процессе усадки действуют силы, обусловленные удале-

нием осмотической, капиллярной и адсорбционной влаги, роль которых изменяется со временем [12]. Объяснение процесса усадки следует искать в структурных особенностях коллоидных капиллярно-пористых материалов, вытекающих из гидрофильности и относительной тонкой дисперсности. Эти особенности заключаются во взаимодействии твердой и жидкой фаз, вызванном силами молекулярного сцепления, и в подвижности структуры, обусловленной гидратацией частиц твердой фазы, благодаря которой образующиеся вокруг частиц диффузные гидратационные слои облегчают взаимное их перемещение, придавая структуре подвижность.

В настоящей статье усадка исследовалась по методике и на установке, описанном в [13]. Полученные данные рассматривались в трех аспектах: во взаимосвязи усадки и гидрофильных свойств материала; в зависимости усадки от различных факторов; во влиянии усадочных характеристик на сушильные свойства материалов.

Изменение размеров образца характеризовалось относительной усадкой и мерой:

$$\beta_l = \frac{l_1 - l_2}{l_2} \cdot 100 \%; \quad \beta' = \frac{1}{l_1} \frac{dl}{dU}, \quad (1)$$

где  $l_1$  и  $l_2$  – начальный и конечный размеры образца.

Мера усадки аналогична коэффициенту усадки  $\beta$  [14]. Однако коэффициент усадки рассчитывается по отношению к длине абсолютно сухого образца, которая для ряда материалов, в том числе и для глин, является величиной условной, так как усадка прекращается до достижения образцом сухого состояния. Мера усадки рассчитывается по отношению к первоначальной длине образца, что удобнее для практики. Зависимость между ними имеет вид

$$\beta = \frac{\beta_l}{1 + \beta_l U_0}. \quad (2)$$

Исследование образцов разного диаметра и при различных режимах сушки [11] показало, что для образцов диаметром 5...10 мм при интенсивности сушки 0,2...0,5 кг/(м<sup>2</sup>·ч) меру усадки можно считать постоянной, т. е. определенная при таких условиях мера усадки является характеристикой материала.

Величина усадки зависит от начальной влажности. При сравнении величины усадки глин различных месторождений в качестве начальной принималась формовочная влажность глины  $U_\phi$ , так как именно она является характеристикой для разных материалов

$$\beta_l = \beta(U_\phi - U_{кр}), \quad (3)$$

где  $U_{кр}$  – влажность окончания усадки.

Усадка исследовалась [11] на каолинах и их смесях, а также на глинах различных месторождений, зависимость усадочных свойств от гидрофильности – на образцах диаметром 7 мм из глуховского и глуховецкого каоли-

нов и их смесей. По результатам опытов было установлено, что для данных каолинов величина усадки, ее мера и влажность окончания усадки различны. В образцах с большим количеством адсорбированной воды усадка увеличивается за счет развитых гидратных слоев и подвижности частиц коагуляционной структуры. Такой структуре свойственны гибкие контакты. Прочность их невысокая и зависит от толщины водных оболочек, которыми и определяется пластичность системы. В [15] отмечалось, что при удалении иммобилизованной и рыхло связанной воды гидратных оболочек в начальный период усадки двухфазная вязкопластическая система оказывает незначительное сопротивление комплексу внешних и внутренних воздействий за счет достаточно развитых гидратных оболочек. Это справедливо для безградиентной сушки, когда даже большая усадка не приводит к опасным напряжениям.

При наличии поля влажности с определенным градиентом существенной характеристикой является мера усадки. В системе с меньшим количеством влаги моно- и полимолекулярной адсорбции происходят резкое, не заторможенное водными прослойками сближение частиц и быстрое образование твердых контактов между ними, в результате чего мера усадки больше для менее гидрофильных материалов (например, для глуховецкого каолина – 0,68, для глуховского – 0,18).

Влажность окончания усадки – важная усадочная характеристика с точки зрения выбора режима сушки. Удаление влаги с этого момента происходит из пористого пространства структуры почти без изменения расстояний между взаимодействующими частицами. В системе появляются жесткие контакты, пластичность значительно уменьшается. В более гидрофильном глуховском каолине количество удаляемой в процессе усадки влаги больше, чем в материалах с меньшей гидрофильностью. Жесткие контакты в более гидрофильных материалах появляются после удаления значительного количества влаги из-за развитых гидратных слоев на частицах, что соответствует их структурно-реологическим характеристикам. Эмпирические зависимости усадки и диапазона усадочной влажности от величины мономолекулярной адсорбции для каолинов имеют вид [11]:

$$\beta = \frac{1}{1 + 2,1m}; \quad \Delta U_{yc} = 17,2m, \quad (4)$$

где  $m$  – моносорбционная влажность, %.

Для многокомпонентных систем мера усадки может изменяться в процессе дегидратации материала.

Для смеси глуховецкого и глуховского каолинов характерно явление синергизма, когда добавка 50 % глуховского каолина уменьшает коэффициент усадки смеси на 80 % (рис. 2).

При сушке керамической массы происходит усадка, которая при начальной влажности  $U_0$  более 15 % прямо пропорциональна ее уменьшению до критического значения  $U_{кр}$ , когда усадка прекращается или сокращается в несколько раз (для глин обычно 10...18 %). Значения коэффициентов линейной усадки для глин обычно находятся в пределах  $\beta_l = 0,38...0,75 \% / \%$ . Для каолинов они меньше (около 0,2), а для суглинков – у верхнего преде-

ла глин. Значение коэффициента температурного линейного расширения для каолина составляет  $0,53 \cdot 10^{-5}$  (град. $^{-1}$ ), т. е. температурное расширение керамической массы из глины при нагреве на  $100^\circ\text{C}$  примерно на три порядка меньше усадки при высыхании 10 % влаги.

Таким образом, при сушке керамической массы температурные расширения можно не учитывать.

Однако процессы усадки керамической массы при сушке и закономерности возникающих при этом деформаций и напряжений во многом аналогичны хорошо изученным процессам термоупругости. Поэтому целесообразно использовать закономерности термоупругости для оценки условий трещинообразования при сушке изделий строительной керамики.

Для плоских изделий строительной керамики (плитка, кирпич и т. п.) можно использовать решения, полученные для тепловых напряжений в пластине при изменении температуры только по толщине [16]. В качестве аналога коэффициента усадки керамической массы в активном по усадке диапазоне влажности можно использовать коэффициент температурного линейного расширения.

В [16] рассмотрен частный случай общей задачи термоупругости для определения напряжений в пластине при изменении температуры только по толщине, что для нашего случая аналогично изменению влажности  $U_z = f(z, \tau)$ , где  $z$  – координата по толщине пластины (см) и  $\tau$  – время (с).

При этом в пластине возникают следующие напряжения:

$$\sigma_x = \sigma_y = f(z); \quad \sigma_z = \sigma_{xz} = \sigma_{yz} = \sigma_{xy} = 0. \quad (5)$$

Уравнения совместимости деформаций удовлетворяются при

$$\frac{d^2}{dz^2} \left[ f(z) + \frac{\beta E}{1-\nu} (U_z - U_0) \right] = 0, \quad (6)$$

где  $\beta$  – удельный коэффициент усадки, 1/%;  $E$  – модуль упругости (деформации);  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $U_z$  – влажность по глубине пластины, %;  $U_0$  – начальная влажность керамической массы, численно равная влажности в середине пластины в начальный период сушки, %.

Из (6)

$$\sigma_z = \sigma_y = f(z) = -\frac{\beta E}{1-\nu} (U_z - U_0) + C_1 + C_2 z. \quad (7)$$

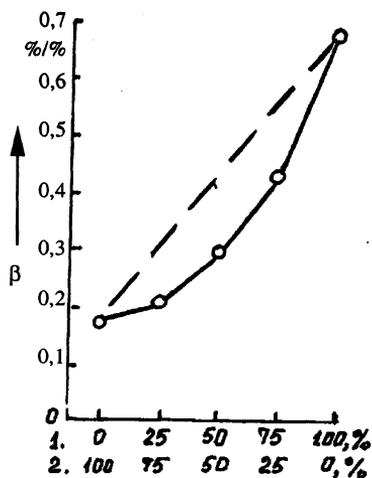


Рис. 2. Зависимость коэффициента усадки смеси глуховского и глуховецкого каолинов от состава: 1 – глуховецкий; 2 – глуховской

Постоянные  $C_1$  и  $C_2$  определяются из граничных условий, которые удовлетворяются в смысле принципа Сен-Венана: равнодействующее усилие и равнодействующий момент на контуре пластины полагаются равными нулю, т. е.

$$\int_{-R}^{+R} \sigma_n dz - \int_{-R}^{+R} \sigma_n z dz = 0, \quad (8)$$

где  $R$  – полутолщина пластины, см;  $\sigma_n$  – напряжение, нормальное к контуру.

Учитывая, что  $\sigma_n = \sigma_x = \sigma_y$ , и определяя постоянные  $C_1$  и  $C_2$ , получаем

$$\sigma_n = \sigma_y = \frac{E}{1-\nu} [\varepsilon + z\chi - \beta(U_z - U_0)], \quad (9)$$

где

$$\varepsilon = \frac{1}{2R} \int_{-R}^{+R} \beta(U_z - U_0) dz; \quad \chi = \frac{12}{R^3} \int_{-R}^{+R} \beta(U_z - U_0) z dz. \quad (10)$$

В качестве характеристики условия возникновения трещин при сушке керамических изделий в начальный период обычно принимается перепад влажности между поверхностью и срединной частью изделия ( $\Delta U_n = U_0 - U_n$ , где  $U_n$  – влажность у поверхности керамической массы, %).

Для проведения численных расчетов необходимо определить  $U_z = f(z)$ .

Как известно, для первого периода сушки, который обычно характеризуется установлением регулярного режима, теоретически и экспериментально установлена квадратичная зависимость изменения  $U_z$ .

Однако для начального периода сушки такая зависимость непригодна по многим причинам, но в первую очередь из-за термоградиентных процессов. Следствием градиента температуры является переток влаги от поверхностной зоны керамической массы, где происходит быстрый рост температуры, вглубь, где влажность соответственно повышается. Этот процесс роста влажности в глубине керамической массы имеет форму своеобразной волны, у которой превышение влажности над начальной  $U_0$  происходит на расстоянии  $R_z$  от нагреваемой поверхности и зависит не только от диффузионных свойств материала, но и от скорости тепловосприятия, т. е. от времени и величины теплового потока, воспринимаемого керамической массой [17].

Наиболее приемлемой формой аппроксимации изменения влажности с глубиной от поверхности керамической массы в самом начале сушки является экспонента вида

$$\Delta U_z = \Delta U_n \exp(-\alpha z), \quad (11)$$

где  $\alpha$  – коэффициент при показателе степени экспоненты [1/см];

$$\Delta U_z = U_0 - U_z. \quad (12)$$

Выражения (10) будут выглядеть следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{1}{2R} \int_{-R}^{+R} \beta \Delta U_{\text{п}} e^{-\alpha z} dz; \quad \chi = \frac{12}{R^3} \int_{-R}^{+R} \beta \Delta U_{\text{п}} z e^{-\alpha z} dz. \quad (13)$$

С учетом, что  $R = R_{\tau}$  в фиксированный момент времени, получим для поверхности керамической массы

$$\sigma_{x\text{п}} = \sigma_{y\text{п}} = \frac{\beta E \Delta U_{\text{п}}}{\alpha R_{\tau} (1-\nu)} \left[ 13 + \left( \frac{12}{\alpha R_{\tau}} - 1 \right) e^{-\alpha R_{\tau}} - \frac{12}{\alpha R_{\tau}} - \alpha R_{\tau} \right]. \quad (14)$$

Откуда при  $\sigma_{x\text{п}} = \sigma_{y\text{п}} = \sigma_{\text{кр}}$ , когда начинается трещинообразование, находим [17]

$$\Delta U_{\text{кр}} = \frac{\alpha R_{\tau} (1-\nu) \sigma_{\text{кр}}}{\beta E \left[ 13 + \left( \frac{12}{\alpha R_{\tau}} - 1 \right) e^{-\alpha R_{\tau}} - \frac{12}{\alpha R_{\tau}} - \alpha R_{\tau} \right]}. \quad (15)$$

По этой формуле при известных параметрах  $\beta$ ,  $\alpha$ ,  $R_{\tau}$ ,  $\nu$ ,  $\sigma_{\text{кр}}$  и  $E$  можно аналитически определить величину критического перепада влажности, при котором начинается трещинообразование на поверхности керамической массы.

Особую роль при определении критического значения относительной деформации поверхностного слоя керамической массы имеют физически обоснованные предельные значения напряжений и модулей деформации. В качестве параметра предельного напряжения следует принять значение пластической прочности массы  $P_m$  (кПа).

Выражение (15) получено при условии постоянства величины модуля деформации при изменении температуры. В нашем случае величина модуля деформации зависит от влажности керамической массы и с уменьшением влажности резко (примерно по экспоненте) увеличивается.

Аналогичная ситуация возникает с величиной критических напряжений, при которых появляются трещины на поверхности керамической массы.

Величина критического перепада влажности обратно пропорциональна значению коэффициента усадки формовочной смеси. Поэтому экспериментальное определение величины  $\beta$  в различных промежутках влажности имеет большое практическое значение.

Эксперименты по определению коэффициентов усадки при сушке проведены с образцами пластического формования лукомльской глины и ее смесями с гранитным отсевом, песком и смесью песка и гранитного отсева в качестве отошителя по известной методике [18] без вакуумирования образцов.

Такие же эксперименты по определению коэффициентов усадки образцов смеси 80 % лукомльской глины и 20 % гранитного отсева пластического формования проведены после вакуумирования и формования кир-

пича-сырца в четырех прессах (№ 2, 3, 4 и 5). Пресс № 1 в этот период находился в ремонте. Уровень вакуума в прессах составлял около 90 кПа.

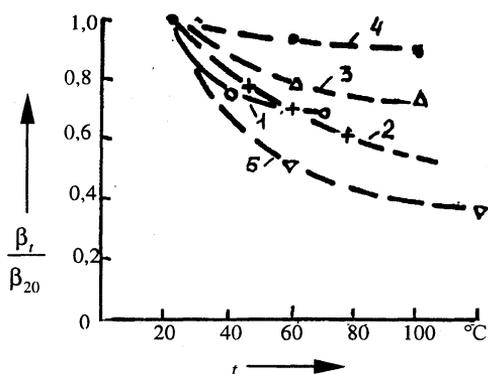


Рис. 3. Влияние нагревания глиняной массы на уменьшение относительной величины коэффициента усадки глины: 1 – ленинградская ( $U_0 = 21\%$ ;  $U_{кр} = 10\%$ ); 2 – гороблагодатская (13,8; 7,2); 3 – одинцовская (12,3; 7,1); 4 – новобахмутская (10; 5,7); 5 – никифоровская (24...27; 14...17)

сушки. При изменении температуры сушки образцов полусухого прессования с 20 до 100 °С значения коэффициентов усадки уменьшаются: для новобахмутской глины – на 12 %, для одинцовской – на 27 %, для гороблагодатской – на 44 %. При этом необходимо указать на резкое уменьшение величин коэффициентов усадки образцов глины полусухого прессования по сравнению с пластическим тех же глины.

Если коэффициенты линейной усадки глины пластического формования (39 различных глины) изменяются в пределах  $\beta_l = 0,37...0,75$  (в эксикаторе минимальное значение для николаевской глины – 0,37), то для глины полусухого прессования они имеют заметно меньшую величину: новобахмутская – 0,145; одинцовская – 0,257; гороблагодатская – 0,349 при  $t = 20$  °С. Поэтому при сушке глиняных изделий полусухого прессования опасность образования поверхностных и внутренних трещин значительно уменьшается. Затраты теплоты на сушку также уменьшаются, что важно для экономии энергетических ресурсов.

График суммарной усадки лукомльской глины без вакуумирования по уровню наклона аппроксимирующих прямых можно разделить на три зоны (рис. 4).

В первой, начальной, зоне при абсолютной влажности ( $U_{аб} = 34,6...29,9\%$ ) величина коэффициента линейной усадки составляет примерно  $\beta_l = 1,12$ , что значительно больше приведенных выше значений коэффициентов усадки 35-ти глины ( $\beta_l = 0,38...0,75$ ).

Во второй зоне ( $U_{аб} = 29,9...22,7\%$ ) значение усадки  $\beta_l = 0,278$ , что значительно меньше общепринятых значений.

Известно [14], что для образцов глины пластического формования ( $U_{аб} > 12\%$ ) температура сушки в пределах 17...105 °С не оказывает заметного влияния на величину коэффициента усадки. Однако данные [19] свидетельствуют о возможном влиянии режима сушки на усадочные свойства отдельных глиняных масс пластического и полусухого формования (рис. 3). При полусухом формовании глины  $U_{аб} \leq 12\%$ , согласно [20], коэффициент усадки также зависит от режима

Если рассматривать обе зоны совместно ( $U_{аб} = 34,6...22,7 \%$ ), то средний коэффициент составит  $\beta_{ср} = 0,65$ , что соответствует приведенному выше общему диапазону изменений коэффициентов усадки. При этом критическая влажность для лукомльской глины составила  $U_{кр} = 22,7 \%$ .

При сушке глины в области за критической влажности (3 зона) величина коэффициента усадки уменьшается до  $\beta_l = 0,027$ , т. е. почти в 10 раз по сравнению с предыдущим значением.

Для смеси 80 % лукомльской глины и 20 % гранитного отсева общая картина изменения величин коэффициентов усадки с уменьшением влажности имеет тот же вид (рис. 5, линия 1).

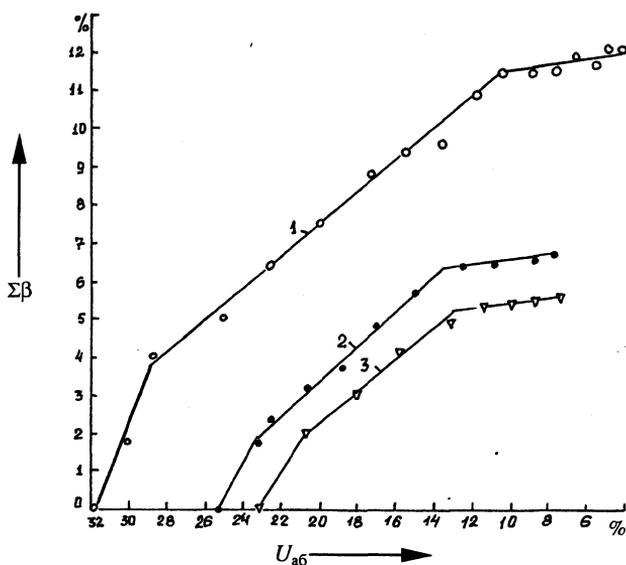


Рис. 5. Графики суммарной усадки образцов пластического формования без вакуумирования: 1 – 80 % лукомльской глины и 20 % гранитного отсева; 2 – 75 % лукомльской глины и 25 % песка; 3 – 80 % лукомльской глины с 10 % гранитного отсева и 10 % песка

В начале сушки в диапазоне ( $U_{аб} = 31,9...28,8 \%$ ) величина коэффициента усадки составляет  $\beta_l = 1,29$ , что также больше, чем для прочих глин, но близко к первому значению коэффициента усадки для чистой лукомльской глины  $\beta_l = 1,12$  (рис. 4).

Во втором диапазоне влажности ( $U_{аб} = 28,8...10,5 \%$ ) значение коэффициента усадки уменьшается до  $\beta_l = 0,41$ , что примерно соответствует нижней границе значений  $\beta_l$  остальных глин.

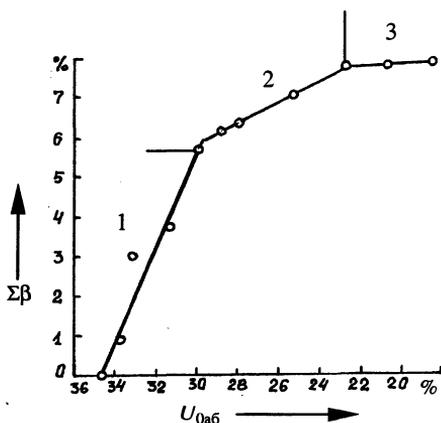


Рис. 4. График суммарной усадки лукомльской глины при сушке без предварительного вакуумирования

Если объединить первый и второй диапазоны влажности ( $U_{аб} = 31,9 \dots 10,5 \%$ ), то средняя величина коэффициента усадки смеси составит  $\beta_{ср} = 0,54$ , что примерно на 17 % меньше такой же средней величины для 100 % лукомльской глины ( $\beta_{ср} = 0,65$ ) и соответствует содержанию (20 %) отошителя – гранитного отсева.

После достижения критической влажности  $U_{кр} \approx 10,6 \%$  значение коэффициента усадки при дальнейшей сушке уменьшается до  $\beta_l = 0,097$ , что примерно в 7 раз меньше, чем среднее предыдущее значение.

Следует отметить, что для смеси 80 % лукомльской глины и 20 % гранитного отсева значение критической влажности уменьшилось почти в 2 раза (с 22,7 до 10,5 %) по сравнению с чистой лукомльской глиной, что может неблагоприятно сказаться на качестве сушки кирпича-сырца, так как в этом случае трещинообразование может происходить не только в начальный период сушки, но и при дальнейшем процессе, а это требует весьма длительного мягкого режима сушки. Последнее удлиняет сроки сушки и увеличивает расход энергоносителей.

Однако эта особенность отмечена для невакуумированной глиногранитной смеси.

Для смеси 75 % лукомльской глины и 25 % песка общая картина изменения величин коэффициентов усадки с уменьшением влажности имеет аналогичный вид (рис. 5, линия 2). В начале сушки ( $U_{аб} = 23,2 \dots 20,0 \%$ ) величина коэффициента усадки смеси составляет  $\beta_l = 0,9$ , что несколько меньше такого же значения для чистых глин ( $\beta_{lmax} = 0,75$ ). При этом диапазон влажности с высоким значением коэффициента усадки по сравнению с чистой лукомльской глиной и ее смеси с 20 % гранитного отсева (рис. 4, 5, линия 1) уменьшился почти в 2 раза. Вероятно, здесь сказались меньшая начальная влажность смеси (25,3 % по сравнению с 34,6 и 31,9 %).

Во второй зоне влажности ( $U_{аб} = 23,3 \dots 13,6 \%$ ) величина коэффициента усадки смеси составляет  $\beta_l = 0,474$ , что соответствует диапазону значений  $\beta_l$  для других чистых глин.

Среднее значение коэффициента усадки в диапазоне изменения влажности с 25,3 до 13,6 % составляет  $\beta_{ср} = 0,54$ , что точно соответствует рассмотренной выше смеси 80 % лукомльской глины с 20 % гранитного отсева.

При влажности смеси менее критической ( $U_{аб} < 13,6 \%$ ) значение коэффициента линейной усадки составляет  $\beta_l = 0,052$ , что приблизительно в 10 раз меньше его среднего значения для первых двух зон.

Для смеси 80 % лукомльской глины с 10 % гранитного отсева и 10 % песка (рис. 5, линия 3) зависимость величины коэффициента усадки от влажности формовочной массы также имеет трехзонный характер.

В первой зоне сушки ( $U_{аб} = 23,9 \dots 20,9 \%$ ) величина коэффициента линейной усадки смеси составляет  $\beta_l = 0,87$ , что больше максимального значения для чистых глин.

Во второй зоне сушки ( $U_{аб} = 20,9 \dots 13,0 \%$ ) величина коэффициента усадки смеси составляет 0,52, что соответствует другим смесям.

При влажности смеси менее критической ( $U_{аб} < 13,0 \%$ ) величина коэффициента усадки составляет  $\beta_l = 0,055$ , что примерно в 10 раз меньше среднего значения для первой и второй зон.

Диапазон влажности при максимальных значениях коэффициентов усадки для смесей с присутствием песка приблизительно одинаков ( $\approx 2,0 \dots 2,5 \%$ ), но меньше предыдущих исследованных смесей и лукомльской глины без отощителей.

Общей особенностью всех исследованных на усадку невакуумированных составов лукомльской глины с отощителями является наличие трехзонной (стадийной) усадки.

Сушка кирпичных изделий на Минском заводе строительных материалов производится из смеси 80 % лукомльской глины и 20 % гранитного отсева после ее формования в прессах с вакуумированием. Как видно из рис. 6, графикам суммарной усадки образцов присущ двухзонный характер, что имеет принципиальное отличие от невакуумированных формовочных смесей (рис. 4, 5).

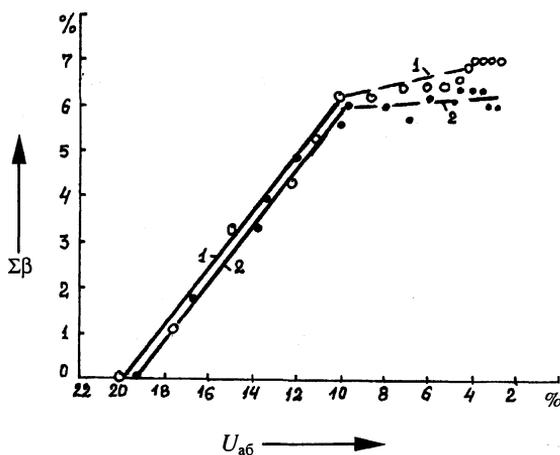


Рис. 6. Графики суммарной усадки смеси 80 % лукомльской глины и 20 % гранитного отсева после вакуумирования: 1 — пресс № 2; 2 — пресс № 3

Формовочная масса, полученная из пресса № 2 (рис. 6, линия 1), в диапазоне абсолютной влажности ( $U_{аб} = 20,0 \dots 10,2 \%$ ) характеризуется коэффициентом усадки  $\beta_l = 0,632$ , близким к среднему значению в диапазоне интенсивной усадки 100 % лукомльской глины до вакуумирования ( $\beta_{иср} = 0,665$ ).

Таким образом, в результате вакуумирования присутствие 20 % отощителя в виде гранитного отсева не приводит к уменьшению величины коэффициента усадки на основном участке сушки вплоть до величины критической влажности.

При влажности формовочной смеси менее критической ( $U_{кр} = 10,2 \%$ ) величина коэффициента усадки глины уменьшается примерно в 6 раз и составляет  $\beta_l = 0,1$ .

Формовочная масса, получаемая из пресса № 3 (рис. 6, линия 2), в диапазоне абсолютной влажности ( $U_{аб} = 19,2 \dots 10,1 \%$ ) характеризуется  $\beta_l = 0,615$ . При влажности формовочной смеси менее критической

( $U_{кр} = 10,1 \%$ ) величина коэффициента линейной усадки уменьшается до  $\beta_l = 0,06$ , что примерно в 10 раз меньше по сравнению с зоной интенсивной усадки. Вся усадочная зависимость характеризуется двумя зонами. Влияние 20 % отошителя невелико ( $\Delta\beta_l = 0,65 - 0,615 = 0,035$ ) и составляет около 5 % от величины коэффициента усадки лукомльской глины без отошителя.

Формовочная масса, получаемая из пресса № 4 (рис. 7, линия 1), в диапазоне абсолютной влажности ( $U_{аб} = 21,0 \dots 11,6 \%$ ) характеризуется значением коэффициента усадки  $\beta_l = 0,637$ . При  $U_{кр} = 10,1 \%$  величина коэффициента линейной усадки уменьшается до  $\beta_l = 0,125$ , что примерно в 5 раз меньше по сравнению с зоной интенсивной усадки при сушке.

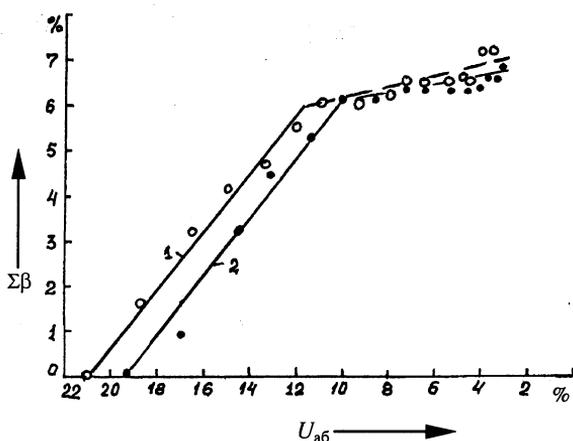


Рис. 7. Графики суммарной усадки смеси 80 % лукомльской глины и 20 % гранитного отсева после вакуумирования: 1 – пресс № 4; 2 – пресс № 5

Вся усадочная зависимость характеризуется двумя зонами. Влияние 20 % отошителя (гранитного отсева) невелико.

Формовочная масса влажностью от 19,3 до 10,0 % (пресс № 5, рис. 7, линия 2) характеризуется значением коэффициента линейной усадки  $\beta_l = 0,65$ . При  $U_{аб} \leq 10,0 \%$  величина коэффициента линейной усадки уменьшается до  $\beta_l = 0,087$ , что в 7,5 раза меньше по сравнению с зоной интенсивной усадки при сушке.

Вся усадочная зависимость характеризуется двумя зонами. Влияние 20 % отошителя (гранитного отсева) отсутствует.

Для удобства анализа полученных результатов исследований усадочных свойств лукомльской глины с отошителем при сушке наиболее значимые данные сведены в табл. 1. Все образцы пластического формования без вакуумирования из лукомльской глины и с добавлением отошителей (гранитный отсев, песок, гранитный отсев с песком) в пределах до 25 % при начальной абсолютной влажности  $U_{0аб} = 23 \%$  имеют трехзонную (стадийную) закономерность усадки при сушке по крайней мере до  $U_{аб} = 10 \%$  и менее.

В связи с наличием трех зон усадки, в первой из которых величины коэффициентов линейной усадки в 1,9...4,5 раза (в среднем около трех раз) выше по сравнению со второй зоной, можно выделить два значения критической влажности вместо одного, описанного в [14, 18]. Диапазон изменения влажности первой зоны составляет 2...5 % и увеличивается с ростом начальной формовочной влажности.

Так, при  $U_{0аб} = 34,6\%$   $\Delta U_1 = 4,7\%$ , при  $U_{0аб} = 31,9\%$   $\Delta U_1 = 3,1\%$ , а при  $U_{0аб} = 25,3$  и  $23,2\%$   $\Delta U_1 = 2,0$  и  $2,3\%$  (рис. 8).

Зависимость величины диапазона влажности первой зоны максимальных значений коэффициентов линейной усадки невакуумированных формовочных масс лукомльской глины с отошителями от начальной влажности имеет параболический, а, возможно, экспоненциальный характер, который свидетельствует о стабильности первой зоны в рабочем диапазоне минимальных влажностей масс пластического формования (20...22%) в условиях Минского завода строительных материалов.

При вакуумировании формовочной смеси с влажностью 19...21%

(табл. 1) первая зона повышенных значений коэффициентов усадки при сушке отсутствует, что должно благоприятно сказываться на трещиностойкости кирпича-сырца во время сушки.

Так, при перепаде влажности между поверхностью полнотелого кирпича и его центральной частью в размере даже 2% без вакуумирования усадка рабочей смеси после начала сушки составляет около 4,0% (рис. 5, линия 1), тогда как после вакуумирования усадка составит только 2,2% (рис. 6, линия 1), что почти в 2 раза меньше.

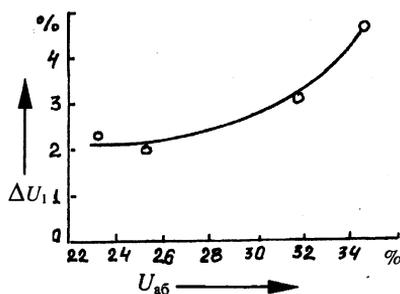


Рис. 8. Зависимость диапазона по влажности первой зоны максимальных значений коэффициентов усадки невакуумированных формовочных масс от начальной влажности (одинцовская глина,  $\Delta U_{кр} = 7\%$  при  $U_0 = 26\%$ )

Таблица 1

Наименование ингредиентов исследуемой смеси	Состав смеси, %	Диапазон изменения абсолютной влажности, %	$\beta_1, \%/%$	$K_ч$
Невакуумированная смесь глины с отошителями				
Лукомльская глина	100	34,6...29,9	1,120	
— " —	— " —	29,9...22,7	0,278	
— " —	— " —	22,7...18,5	0,024	
— " —	— " —	34,6...22,7	0,650	0,52
Лукомльская глина + гранитный отсев	80 + 20	31,9...28,8	1,290	
— " —		28,8...10,5	0,410	
— " —		10,5...4,3	0,097	
— " —		31,9...10,5	0,540	2,04
Лукомльская глина + гранитный отсев + песок	80 + 10 + 10	23,2...20,9	0,870	
— " —		20,9...13,0	0,420	
— " —		13,0...7,5	0,055	
— " —		23,2...13,0	0,005	0,79

Наименование ингредиентов исследуемой смеси	Состав смеси, %	Диапазон изменения абсолютной влажности, %	$\beta_1, \%/%$	$K_u$
Лукомльская глина + песок	75 + 25	25,3...23,3	0,900	
— " —		23,3...13,6	0,474	
— " —		13,6...7,8	0,052	
— " —		25,3...13,6	0,540	0,86
Вакуумированная смесь глины с отощителем				
Лукомльская глина + гранитный отсев (пресс № 2)	80 + 20	20,0...10,2	0,632	0,97
— " —		10,2...3,2	0,110	
Лукомльская глина + гранитный отсев (пресс № 3)	80 + 20	19,2...10,1	0,615	0,90
— " —		10,1...3,4	0,060	
Лукомльская глина + гранитный отсев (пресс № 4)	80 + 20	21,0...11,6	0,637	0,81
— " —		11,6...3,6	0,125	
Лукомльская глина + гранитный отсев (пресс № 5)	80 + 20	19,3...10,0	0,655	0,93
— " —		10,0...3,1	0,087	

Можно отметить уменьшение максимальных коэффициентов усадки формовочных смесей в первой зоне с понижением начальной формовочной влажности (рис. 9). Если предположить протекание этого процесса в соответствии с прямой 1 (рис. 9), то для формовочной массы с абсолютной влажностью менее 18 % влияние повышенных значений коэффициентов усадки может быть ликвидировано. Однако для получения такой формовочной влажности глиняной смеси необходимо использовать более мощные формовочные прессы.

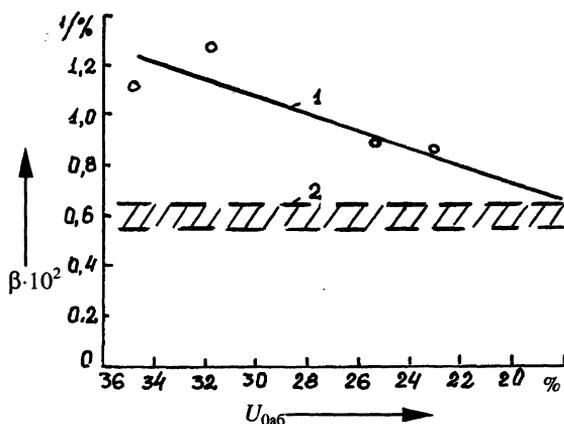


Рис. 9. Зависимость максимальной величины коэффициента усадки невакуумированной формовочной смеси от начальной абсолютной влажности: 1 — до вакуумирования; 2 — после вакуумирования

Для всех изученных смесей диапазон влажности интенсивной усадки  $\Delta U = U_0 - U_{кр}$  достаточно слабо зависит от начальной влажности. Как свидетельствуют исследования [21], зависимость  $\Delta U = f(U_0)$  носит линейный характер, а величина  $\Delta U_{кр}$  увеличивается с ростом  $U_0$ .

Как показывает оценка чувствительности исследованных формовочных смесей к сушке на основе первого метода [22], при котором коэффициент чувствительности составляет  $K_{ч} = \Delta U_{yc}/U_{кр}$ , при высокой начальной влажности (31,9 и 34,6 %) добавка к лукомльской глине 20 % гранитного отсева резко увеличивает  $K_{ч}$  (с 0,52 до 2,04, табл.1), что переводит глиняную массу из малочувствительной ( $K_{ч} < 1, 2$ ) в высокочувствительную ( $K_{ч} > 1,8$ ). При начальной влажности 23,2...25,3 % даже без вакуумирования формовочная масса на основе лукомльской глины с добавками гранитного отсева и песка в качестве отошителей относится к малочувствительным к сушке при  $K_{ч} = 0,79$  и 0,86 (табл. 1).

После вакуумирования чувствительность кирпича-сырца к сушке несколько повышается (величина  $K_{ч}$  увеличивается с 0,82 до 0,90), но остается в пределах малой чувствительности. Такой небольшой рост величины коэффициента чувствительности формовочной смеси хорошо коррелируется с увеличением средней величины коэффициентов усадки.

Особенно важный результат исследования заключается в установлении факта нейтрализации в результате вакуумирования положительного влияния отошителя на уменьшение среднего коэффициента линейной усадки формовочной массы при сушке. При этом, благодаря вакуумированию, ликвидируется первая зона повышенных значений коэффициентов усадки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лундина М. Г. Применение дегидратированной глины для сокращения длительности сушки // Сушка керамических изделий. – М.: Профиздат, 1958. – С. 50–63.
2. Еременко В. В., Долгина Л. В. Новая методика определения чувствительности глин к сушке // Стекло и керамика. – М., 1961. – № 7. – С. 26–29.
3. Смолякова З. А. Определение оптимального режима сушки кирпича по структурно-механическим свойствам // Сушка керамических изделий. – М.: Профиздат, 1958. – С. 34–50.
4. Веселовский В. С., Селлев И. В. Влияние капиллярного давления на усадку глины // Коллоидный журнал. – 1936. – № 12. – С. 16–18.
5. Нохратян К. А. Сушка и обжиг в промышленности строительной керамики. – М.: Госстройиздат, 1962. – 562 с.
6. Остриков М. С., Виткевич Н. Д., Свирская О. Д. О кинетике роста усадочных напряжений на высыхающих системах // Коллоидный журнал. – 1961. – № 1. – С. 122–124.
7. Герцаги К. Д. Основы механики грунтов. – М.: Изд-во иностр. лит., 1931. – 153 с.
8. Чудинов Б. С. Современное состояние теории сушки коллоидных капиллярно-пористых тел // Тр. Всесоюз. конф. по дальнейшему совершенствованию теории, техники и технологии сушки. – Мн.: АН БССР, июнь 1981. – С. 29–31.
9. Книгина Г. И., Симонова В. П. Оценка шликеров по структурно-механическим свойствам // Стекло и керамика. – 1979. – № 1. – С. 30–33.
10. Эйтель В. Физическая химия силикатов. – М.: Изд-во иностр. лит., 1962. – 456 с.
11. Пиевский И. М., Гречина В. В., Чернышева Р. А. Сушка капиллярно-пористых коллоидных тел в парах ПАВ // Тр. Всесоюз. конф., Симферополь, ноябрь 1978. – Киев: Наук. думка, 1978. – С. 17–18.

12. В е р е з о в с к а я А. Л., К а з а н с к и й М. Ф. Некоторые особенности усадки глин разных материалов при сушке // ИФЖ. – 1962. – № 2. – С. 104–107.
13. Б е л о п о л ь с к и й М. С. Изменение структуры коллоидного капиллярно-пористого тела (глины) // ИФЖ. – 1961. – № 4. – С. 49–54.
14. Л ы к о в А. В. Теория сушки. – М.: Энергия, 1986. – 472 с.
15. Н и ч и п о р е н к о С. П., П а н а с е в и ч А. А., Б е д н о ш е я М. А. Усадочные свойства дисперсий каолинов // Структурообразование в дисперсиях слоистых силикатов. – Киев: Наук. думка, 1978. – С. 172–178.
16. К о в а л е н к о А. Д. Основы термоупругости. – Киев: Наук. думка, 1970. – 308 с.
17. О с и п о в С. Н., К а л и н и ч е н к о Е. С. Использование некоторых закономерностей термоупругости для оценки условий трещинообразования в начальном периоде сушки изделий строительной керамики // Сб. тр. ГП НИПТИС. – Мн., 1998. – С. 177–189.
18. Н и ч и п о р е н к о С. П. Физико-химическая механика дисперсных структур в технологии строительной керамики. – Киев: Наук. думка, 1968. – 76 с.
19. С о к о л о в П. В. Новые методы скоростной сушки керамических плиток и изделий санитарно-строительного фаянса // Сушка керамических изделий. – М.: Профиздат, 1958. – С. 3–34.
20. Б е р е н ш т е й н П. И. Исследование процессов сушки кирпича-сырца полусухого прессования: Автореф. дис. / ВНИИ стекла, 1954. – 22 с.
21. К а л и н и ч е н к о Е. С. Влияние формовочной влажности глиняной массы на основной интервал усадки при сушке // Матер. межвузовской науч.-техн. конф. БГПА, 54, ч.1. – Мн., 2000. – С. 84.
22. Ч и ж с к и й А. Ф. Сушка керамических материалов и изделий. – М.: Стройиздат, 1971. – 176 с.

Представлена кафедрой  
теплотехники и вентиляции

Поступила 8.11.2001

УДК 621.396.677

## **ИНФОРМАЦИОННО-ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ТУРБОГЕНЕРАТОРА Т-100-130 САМАРСКОЙ ТЭЦ**

**Докт. физ.-мат. наук, проф. КУДИНОВ В. А., канд. техн. наук ДИКОП В. В.,  
асп. СТЕФАНЮК С. А., инж. ИСАЕВ А. Е.**

*Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
«Самарский государственный технический университет»*

В 1999 г. на Самарской ТЭЦ введена в эксплуатацию информационно-диагностическая система (ИДС) турбогенератора Т-100-130, предназначенная для автоматизированного сбора, обработки, отображения и архивирования информации с использованием современных персональных компьютеров. К таким данным относятся около 180 параметров: температура, давление, расход и уровень жидкости, деформации корпуса и вала, показатели вибрации, число оборотов ротора турбины и пр.