

ФОРМИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ИЗВЕСТИ ПРИ ИХ ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ КАРБОНИЗАЦИИ

Любомирский Н.В., к.т.н., доц., Федоркин С.И., д.т.н., проф., Сироджа И.Б., д.т.н., проф., Лукьянченко М.А., к.т.н., доц.

Национальная академия природоохранного и курортного строительства, Симферополь, Украина

На современном этапе развития экономики перед технологами и производственниками ставятся задачи внедрения новых экономичных и экологически безопасных строительных материалов. Материалом, в котором заложены потенциальные возможности ресурсосбережения как энергетических, так и сырьевых запасов, является воздушная известь. Направив усилия на разработку материалов на основе извести, твердение которых осуществлялось бы в искусственно созданных условиях повышенных концентраций углекислого газа, реализуя принцип карбонизационного твердения, можно создать эффективные ресурсосберегающие технологии производства строительных материалов и изделий. Производство изделий на основе извести имеет в своем распоряжении значительный потенциал в виде сырьевой базы и резервов производства.

Одной из основных задач исследователей и разработчиков новых видов строительных материалов является нахождение оптимальных составов и технологических факторов получения их и на их основе изделий и конструкций с требуемыми физико-техническими свойствами, среди которых прочность – важнейшее. При разработке материалов на основе извести карбонизационного твердения вполне естественно полагать, что изменяя условия принудительной карбонизации, будут изменяться прочностные характеристики материала. Многими учеными, изучавшими карбонизационное твердение извести [1 – 6], установлено, что реакция карбонизации извести зависит от множества технологических факторов: водосодержания известкового теста, температуры, концентрации и давления углекислого газа, дисперсности частиц извести, времени карбонизации и т.д.

В настоящей статье приведены результаты исследований формирования прочности при сжатии принудительно карбонизированных образцов гашеной извести в зависимости от степени карбонизации (превращения извести в карбонат кальция). Опытные образцы представля-

ли образцы-цилиндры полусухого прессования диаметром и высотой 30 мм. Водосодержание известковых образцов изменялось в пределах от 1 до 25 % мас., давление прессования составляло 10 МПа. Карбонизацию образцов проводили в среде 100 % концентрации углекислого газа при температуре 293 – 333 К в условиях разрежения и избыточных давлений в интервале давлений CO_2 от 0,02 МПа до 0,5 МПа в течение 1 ч. Варьируемые факторы были выбраны с учетом предыдущих исследований, а также с целью установления оптимальных условий осуществления принудительной карбонизации известкового вяжущего.

Принцип определения степени карбонизации основывался на определении изменения массы известковых образцов в процессе их карбонизации и определялся как отношение количества новообразованного (фактического) CaCO_3 к количеству CaCO_3 , которое должно образоваться при полной карбонизации Ca(OH)_2 по химическому уравнению:



На рис. 1 представлены графики изменения прочности при сжатии ($R_{\text{сж.}}$) образцов-цилиндров и показателей степени карбонизации (α) известки в зависимости от изменяемых условий карбонизации. Экспериментальные данные свидетельствуют, что прочность при сжатии повышается с увеличением показателя α .

Превалирующим фактором, влияющим на $R_{\text{сж.}}$ карбонизированных образцов является их начальное водосодержание. С увеличением начального водосодержания от 1 до 15 – 20 % мас. $R_{\text{сж.}}$ повышается и в зависимости от давления CO_2 и температуры достигает значений 20,0 – 29,0 МПа; с увеличением содержания больше 20 % мас. – прочность опытных образцов снижается.

Эффективным фактором управления прочностными показателями карбонизированных образцов является давление CO_2 в реакторе. Увеличение давления CO_2 способствует повышению прочности опытных образцов. При избыточных давлениях углекислого газа (0,2 – 0,5 МПа) $R_{\text{сж.}}$ образцов возрастает значительно и превышает прочность образцов, закарбонизированных при атмосферном давлении (0,1 МПа) в 1,2 – 1,6 раза.

Повышение температуры карбонизации с 293 до 313 и 333 К незначительно снижает прочностные показатели опытных образцов, в среднем не более чем на 10 %.

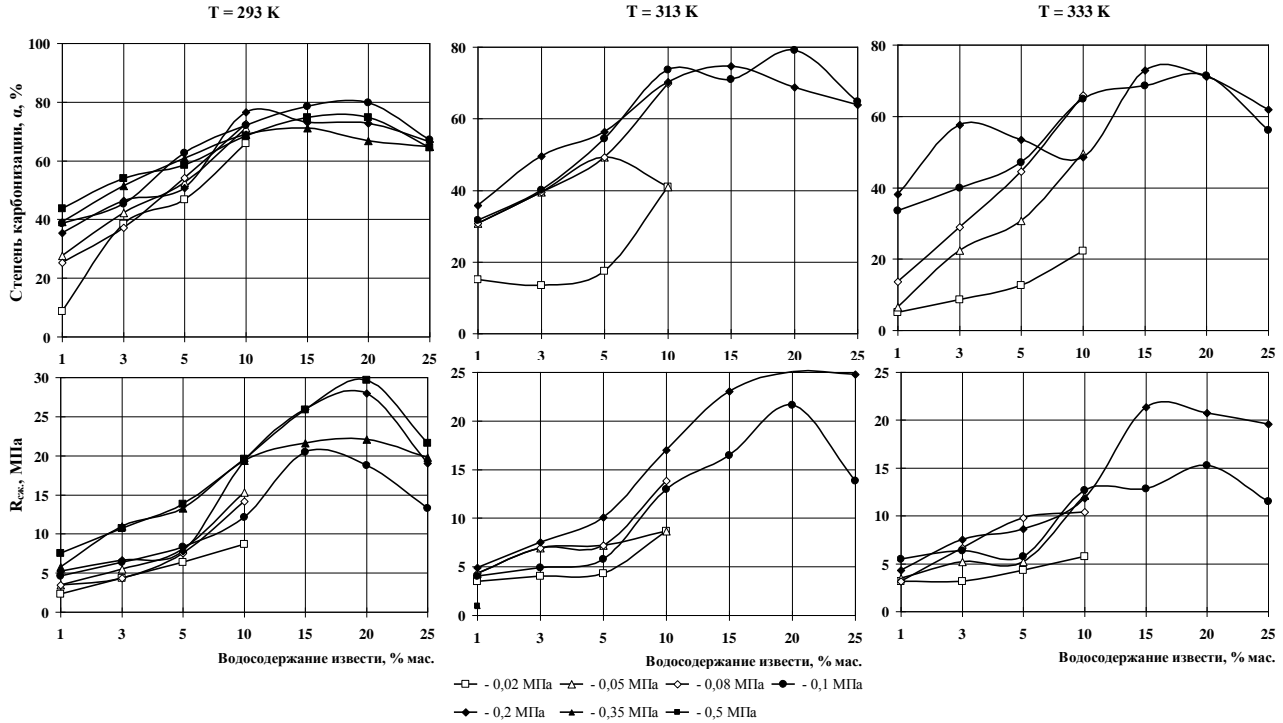


Рис. 1. Изменение степени карбонизации и прочности на сжатие принудительно карбонизированных известковых образцов в зависимости от исследуемых технологических факторов

Комплексная оценка полученных опытных данных прочности на сжатие известковых образцов карбонизационного твердения в зависимости от степени карбонизации показала, что формирование прочностных показателей искусственного каменного материала на основе известки карбонизационного типа твердения зависит от степени карбонизации известкового вяжущего, которая, в свою очередь, зависит от условий принудительной карбонизации. Необходимо отметить, что показатели $R_{сж.}$ выше давления прессования опытных образцов, достигаются при величине $\alpha \geq 50 \%$.

Используя массив экспериментальных данных, с помощью знание-ориентированной методологии обнаружения эмпирических закономерностей [7 – 9], выведены эмпирические закономерности в виде баз tk-знаний $Btk3(Z) = tk_2 \bar{\Sigma}_Z$, определяющих устойчивые зависимости прочности на сжатие и степени карбонизации, а также $R_{сж.}$ от α полученного материала от исследуемых факторов:

- закономерность формирования $R_{сж.}$ карбонизированных образцов:

$$Btk3 = tk_2 \bar{\Sigma}_Z = x_4 \cdot x_9 \cdot \bar{x}_{18} \vee x_5 \cdot x_9 \cdot \bar{x}_{18} \vee x_6 \cdot x_9 \cdot x_{18} \vee x_7 \cdot x_9 \cdot x_{18} \vee x_4 \cdot x_{10} \cdot \bar{x}_{18} \vee x_5 \cdot x_{10} \cdot \bar{x}_{18} \vee x_6 \cdot x_{10} \cdot x_{18} \vee x_7 \cdot x_{10} \cdot x_{18} \vee x_2 \cdot x_{11} \cdot x_{18} \vee x_2 \cdot \bar{x}_{11} \cdot \bar{x}_{18} \vee x_3 \cdot x_{11} \cdot x_{18} \vee x_3 \cdot \bar{x}_{11} \cdot \bar{x}_{18} \vee x_4 \cdot x_{11} \cdot x_{18} \vee x_5 \cdot x_{11} \cdot x_{18} \vee x_{11} \cdot \bar{x}_{16} \cdot x_{18} \vee x_1 \cdot \bar{x}_{18} \vee x_8 \cdot \bar{x}_{18} \vee x_{12} \cdot x_{18} \vee x_{13} \cdot x_{18} \vee x_{14} \cdot x_{18}; \quad (2)$$

- зависимость степени карбонизации известки:

$$Btk3 = tk_2 \bar{\Sigma}_Z = x_2 \cdot x_9 \cdot \bar{x}_{18} \vee x_4 \cdot x_9 \cdot \bar{x}_{18} \vee x_6 \cdot x_9 \cdot x_{18} \vee x_7 \cdot x_9 \cdot x_{18} \vee x_5 \cdot x_{10} \cdot x_{18} \vee x_6 \cdot x_{10} \cdot x_{18} \vee x_7 \cdot x_{10} \cdot x_{18} \vee x_7 \cdot x_{10} \cdot x_{18} \vee x_3 \cdot x_{11} \cdot x_{18} \vee x_4 \cdot x_{11} \cdot x_{18} \vee x_3 \cdot x_{15} \cdot x_{18} \vee x_{11} \cdot \bar{x}_{15} \cdot x_{18} \vee x_9 \cdot x_{16} \cdot \bar{x}_{18} \vee x_2 \cdot x_{17} \cdot \bar{x}_{18} \vee x_1 \cdot \bar{x}_{18} \vee x_8 \cdot \bar{x}_{18} \vee x_{12} \cdot x_{18} \vee x_{13} \cdot x_{18} \vee x_{14} \cdot x_{18}; \quad (3)$$

- закономерность формирования $R_{сж.}$ образцов от показателя α :

$$Btk3 = tk_2 \bar{\Sigma}_Z = x_4 \cdot x_{10} \cdot \bar{x}_{19} \vee x_5 \cdot x_{10} \cdot \bar{x}_{19} \vee x_7 \cdot x_{10} \cdot x_{18} \vee x_3 \cdot \bar{x}_{11} \cdot \bar{x}_{19} \vee x_2 \cdot x_{15} \cdot \bar{x}_{19} \vee x_9 \cdot x_{17} \cdot \bar{x}_{19} \vee x_{11} \cdot x_{17} \cdot x_{19} \vee x_6 \cdot x_{18} \cdot x_{19} \vee x_7 \cdot x_{18} \cdot x_{19} \vee x_{11} \cdot x_{18} \cdot x_{19} \vee \bar{x}_{11} \cdot \bar{x}_{18} \cdot \bar{x}_{19} \vee x_1 \cdot \bar{x}_{19} \vee x_{12} \cdot x_{19} \vee x_{13} \cdot x_{19} \vee x_{14} \cdot x_{19}, \quad (4)$$

где $x_1 \dots x_7$ – давление CO_2 , соответственно, 0,02, 0,05, 0,08, 0,1, 0,2, 0,35, 0,5 МПа;

$x_8 \dots x_{14}$ – начальное содержание воды, соответственно, 1, 3, 5, 10, 15, 20, 25 % мас.;

$x_{15} \dots x_{17}$ – температура карбонизации соответственно, 293, 313, 333 К;

x_{18} – степень карбонизации, $\geq 50 \%$;

x_{19} – предел прочности при сжатии образцов, ≥ 10 МПа.

Аналитические выражения (2 – 4) описывают обобщённый запрет, объединяющий элементарные запреты в виде конъюнкций пар комбинаций предикатных признаков $x_1 - x_{18(19)}$ системного объекта принятия решения (ОПР). Комбинации Σ_Z не существуют, т.к. запрещены природой процесса карбонизации. Логико-математический смысл каждого принимаемого решения, состоит в отрицании запретного результата для определения противоположного возможного, т.е. искомого результата $\bar{\Sigma}_Z$.

Кроме этого, полученные выражения являются характеристической функцией области запретов найденной $Btk3(Z)$ и правилом принятия знаниеориентированных решений относительно интересуемых 4-х категорий событий: 1-я – «не знаю»; 2-я – «противоречие»; 3-я – «ОПР обладает допустимым значением целевого признака» ($x_{11} = x_{18(19)}$) и 4-я – «ОПР не обладает допустимым значением целевого признака» ($x_{11} = \bar{x}_{18(19)}$). Оценка выражений запретов по 3-й (содержащих $X_{18(19)}$) и 4-й (содержащих $\bar{x}_{18(19)}$) категориям позволила установить закономерности как общего, так и частного влияния исследуемых факторов на достижение искомого результата.

База знаний (2) формирования $R_{сж.}$ карбонизированных образцов закономерно устанавливает, что порог целевой характеристики ОПР $x_{11}^{доп. R_{сж.}} \geq 10$ МПа гарантировано достигается при давлениях CO_2 0,35 МПа и выше (x_6, x_7) при начальном водосодержании известкового вяжущего в интервале 3 – 5 % мас. Достижение $R_{сж.} \geq 10$ МПа при давлениях CO_2 близких к атмосферному возможно при увеличении начального содержания воды не меньше 10 % мас. Основным фактором, который более всего влияет на формирование $R_{сж.}$ материала на основе известки карбонизационного твердения, является начальное водосодержание известкового вяжущего (x_{12}, X_{13}, x_{14}). Соответствующие конъюнкции $[x_{12} \cdot \bar{x}_{18}]$, $[x_{13} \cdot \bar{x}_{18}]$ и $[x_{14} \cdot \bar{x}_{18}]$ машина отдельно выносит в оптимизированную базу знаний (2). А такие факторы, как давление CO_2 0,02 МПа (x_1) и водосодержание 1 % мас. (x_8), т.е. минимальные из исследуемых значений факторов, однозначно отрицаются закономерностью. Замечательным является то, что температурный фактор является менее значимым относительно других, однако компьютер указывает, что требуемый показатель прочности достижим при 313 К (x_{16}).

Степень карбонизации прессованных известковых образцов (3) аналогично зависит от тех же факторов, что и $R_{сж.}$, кроме того, показатель α значительно зависит от температуры. Порог целевой характеристики $x_{ц\alpha}^{доп.} \geq 50\%$ гарантировано достигается при температуре 293 К (x_{15}), с увеличением температуры вероятность более полного превращения $Ca(OH)_2$ в $CaCO_3$ уменьшается.

Оптимизированная база знаний, описывающая влияние степени карбонизации известкового вяжущего и других варьируемых факторов на $R_{сж.}$, представленная в виде эмпирической обобщённой закономерности (4) указывает на существование связи между степенью карбонизации извести и прочностью получаемого каменного материала и подтверждает наблюдение, сделанное при рассмотрении опытных данных, что целевая характеристика $R_{сж.}$ $x_{цR_{сж.}}^{доп.} \geq 10$ МПа, достигается при величине показателя степени превращения $Ca(OH)_2$ в $CaCO_3$ более 50 % (вводимый порог целевой характеристики α $x_{18} \geq 50\%$). Все конъюнкции, содержащие в своем составе параметр, характеризующий степень карбонизации известкового вяжущего (x_{18}) показывают, что «ОПР ($R_{сж.}$) обладает допустимым значением целевого признака», т.е. $x_{ц} = x_{19}$.

Заключение

Проведенные исследования и анализ опытных данных степени карбонизации известкового вяжущего и прочности получаемого материала средствами методики знаниеориентированного обнаружения эмпирических закономерностей на базе использования компьютерной техники научно и экспериментально обосновывают правомерность использования комбинаторно-логических полиномов инженерии квантов знаний для установления причинно-следственных связей между входными и выходными факторами эмпирических зависимостей. Данная методология обеспечивает установление закономерностей формирования прочной структуры искусственного камня на основе известкового вяжущего карбонизационного типа твердения, позволяет однозначно качественно и количественно установить технологические факторы гарантирующие достижение требуемого установленного порога свойств. Так полученные закономерности устанавливают, что оптимальными факторами, гарантирующие получение карбонизируемого известкового камня с $R_{сж.}$ более 10 МПа и высокой степенью карбонизации ($\alpha \geq 50\%$), являются: начальное водосодержание известкового вяжущего – $\geq 5\%$ мас.,

давление углекислого газа – атмосферное и выше, температура – 293 К.

Summary

Studies of the formation of the compressive strength of the force carbonated samples slaked lime depending on the degree of carbonization. Regularities of the formation of strength of the carbonization artificial stone and technological factors guaranteeing the achievement of the required threshold properties.

Литература

1. Воробьев А.А. Влияние карбонизации на физико-механические свойства автоклавного газобетона с тонкомолотыми карбонатными добавками / Воробьев А.А. // Строительные материалы. – 1971. – №2. – С. 32 – 33.

2. Зацепин К.С. Известковые карбонизированные строительные материалы / Зацепин К.С. // Сборник материалов Московского научно-технического совещания по жилищно-гражданскому строительству, строительным материалам и проектно-исследовательским работам.– М.: Московская правда. – 1952. – Том II. – С. 283 – 290.

3. Кржеминский С.А. О взаимодействии газосиликата с углекислым газом / [Кржеминский С.А., Земцов Д.Г., Кройчук Л.А. и др.] // Строительные материалы. – 1969. – №9. – С. 23 – 25.

4. Михайлов Н.Н. Искусственная карбонизация как способ повышения активности доломитового вяжущего / Н.Н. Михайлов, А.М. Кузнецов // Строительные материалы. – 1960. – №9. – С. 28 – 30.

5. Розенфельд Л.М. Исследования пенокарбоната / Розенфельд М.Л. – М.: Госстройиздат, 1955. – 52 с.

6. Zalmanoff N. Carbonation of Lime Putties To Produce High Grade Building / Zalmanoff N. // Rock Products. – 1956. – August. – P. 182 – 186.

7. Сироджа И.Б. Знаниеориентированная информационная технология для компьютерной поддержки принятия решений при создании сборочных приспособлений в самолетостроении. / Сироджа И.Б., Бабушкин А.А., Бабушкин А.И. // Вісник інженерної академії України. – 2011. – Вип. 1.– С. 8 – 14.

8. Сироджа И.Б. Квантовые модели и методы искусственного интеллекта для принятия решений и управления / Сироджа И.Б. – К.: Наукова думка, 2002. – 423 с.

9. Сироджа И.Б. Оценивание качества идентификационных и прогнозных решений в инженерии знаний / Сироджа И.Б. // Бионика интеллекта. – 2008. – №2 (69). – С. 77 – 83.