

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

УДК 666.94.017:536.712:620.18

*ГНЫРЯ АЛЕКСЕЙ ИГНАТЬЕВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
tsp_tgasu@mail.ru*

*АБЗАЕВ ЮРИЙ АФАНАСЬЕВИЧ, докт. физ.-мат. наук, профессор,
abzaev@tsuab.ru*

*КОРОБКОВ СЕРГЕЙ ВИКТОРОВИЧ, канд. техн. наук, доцент,
korobkov@hotmail.ru*

*БОЯРИНЦЕВ АЛЕКСАНДР ПАВЛОВИЧ, доцент,
plus2001@rambler.ru*

*МОКШИН ДМИТРИЙ ИЛЬИЧ, канд. техн. наук, доцент,
i2ii@bk.ru*

*ГАУСС КСЕНИЯ СЕРГЕЕВНА, аспирант,
gauss.ksyu@mail.ru*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРОГРЕВА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЕЮЩЕГО ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

В работе проведено исследование накопления прочностных свойств цементного камня в зависимости от времени в интервале 0–67 ч при разных температурах изотермического твердения: 40, 50, 70 °С соответственно. Было установлено, что при исследованных температурах предел текучести возрастает практически на порядок. Значительно возрастают также упругие модули. Показано, что с ростом времени твердения значительно сокращается пластическая область, и в конце исследованного интервала 0–67 ч при всех температурах разрушение образцов происходит хрупким образом.

Ключевые слова: предел текучести; предел прочности; упрочнение; упругая деформация.

*ALEKSEY I. GNYRYA, DSc, Professor,
tsp_tgasu@mail.ru*

*YURI A. ABZAEV, DSc, Professor,
abzaev@tsuab.ru*

*SERGEY V. KOROBKOV, PhD, A/Professor,
korobkov@hotmail.ru*

© Гныря А.И., Абзаев Ю.А., Коробков С.В., Бояринцев, Мокшин Д.И.,
Гаусс К.С., 2017

*ALEKSANDR P. BOYARINTSEV, A/Professor,
plus2001@rambler.ru*

*DMITRIY I. MOKSHIN, PhD, A/Professor,
i2ii@bk.ru*

*KSENIYA S. GAUSS, Research Assistant,
gauss.ksyu@mail.ru
Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

THE INFLUENCE OF HEATING TEMPERATURE ON MECHANICAL PROPERTIES OF CEMENT BRICK

The paper presents a study of strength accumulation properties of cement brick depending on 0–67 h time interval and isothermal curing temperatures of 40, 50, 70 °C. It is found that at these temperatures, the yield strength increases almost by an order. The values of Young's modulus increase significantly also. It is shown that with increasing curing time plastic region considerably reduces. And at the end of the studied time interval, the samples fracture in a brittle manner at each temperature.

Keywords: yield strength; ultimate strength; hardening; elastic deformation.

Введение

В бетонах различного типа основным связующим является цементный камень (портландцемент). Под внешней нагрузкой локальные напряжения в бетонах распределяются неоднородно. В тяжелых бетонах заполнители, как правило, обладают высокими прочностными характеристиками. И поэтому прочностные свойства определяются, прежде всего, тяжелыми фракциями бетонов, в приграничных межфазных областях которых сосредоточиваются локальные напряжения, существенно превышающие средние значения по бетону. В бетонах с высокой долей пористой составляющей механические свойства бетонов, наоборот, определяются, прежде всего, упругими свойствами цементного камня [1–10]. Твердение бетонов является многофакторным процессом, на который оказывают влияние водоцементное отношение, температура, влажностные условия, количественное содержание фаз и т. д. И как следствие, достижение бетонами служебных характеристик оказывается индивидуальным. В литературе оценки прочностных характеристик, как правило, ограничиваются нормированными значениями предела прочности деформированных бетонов относительно значений, соответствующих 28 сут твердения [4]. Данная характеристика, по мнению авторов, является недостаточной при детальном исследовании закономерностей прочностных свойств цементного камня. Представляет определенный интерес изучение механических свойств гидратированного цементного камня современными испытательными машинами в зависимости от времени и температуры (изотермическое твердение), образцы которого не осложнены присутствием различных фракций, свойственных бетонам разного типа.

В работе было проведено исследование механических характеристик гидратированного цементного камня в зависимости от времени, температуры изотермического твердения с целью количественной оценки вариации предела

текучности, интенсивности накопления прочностных свойств портландцемен-
тами до служебных значений в процессе твердения.

Методика эксперимента и обсуждение результатов

Механические испытания сжатием образцов цементного камня проводились на испытательной машине Instron 3382 при комнатной температуре со скоростью деформации 1 мм/мин. Точность определения нагрузки на Instron составляет 5 Н, максимальная нагрузка равна 100 кН. Размеры прямоугольных образцов были выбраны равными 20×20×20 мм. Изотермические испытания производились в климатической камере. Значения предела текучести, модуля упругости усреднялись по 5 значениям. Схема изотермического твердения приведена на рис. 1.

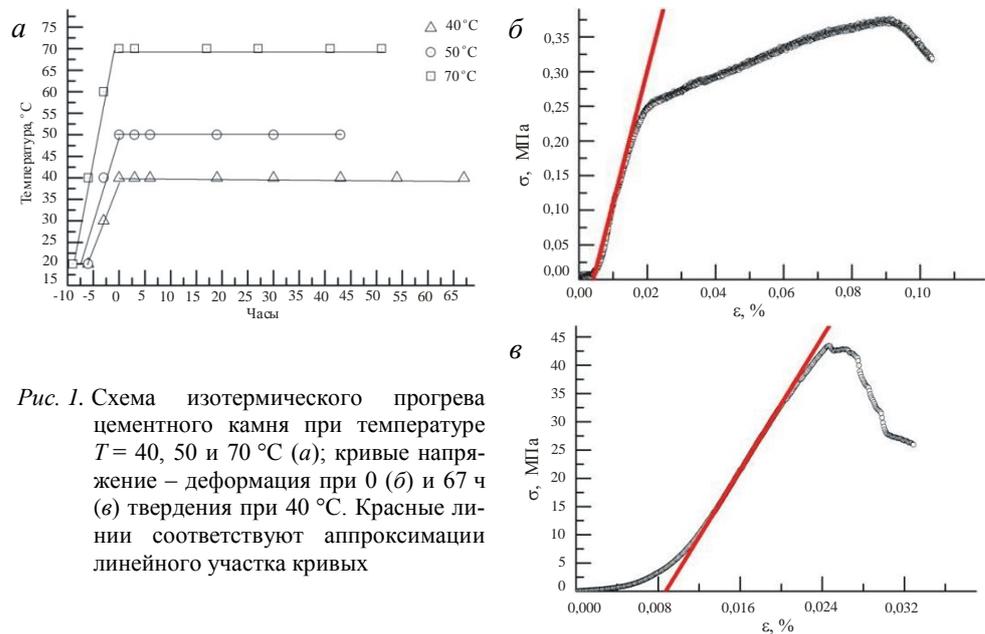


Рис. 1. Схема изотермического прогрева цементного камня при температуре $T = 40, 50$ и 70 °C (а); кривые напряжение – деформация при 0 (б) и 67 ч (в) твердения при 40 °C. Красные линии соответствуют аппроксимации линейного участка кривых

Цементное тесто разогревалось в камере до температуры изотермического прогрева 40, 50 70 °C в течение 3, 5, 8 ч соответственно. И на следующем этапе твердение происходило в камере при постоянной температуре и влажности. При температуре прогрева 40 °C были выбраны следующие значения времени: 0, 3, 6, 19, 30, 43, 54, 67 ч. При температуре прогрева 50 °C – 0, 3, 6, 19, 30, 43 ч. При температуре прогрева 70 °C – 0, 3, 17, 27, 41, 51 ч (рис. 1, а).

На рис. 1 в качестве иллюстрации приведены типичные кривые напряжение – деформация (σ - ϵ), соответствующие началу твердения при 0 ч (рис. 1, б) и окончанию твердения при 67 ч (рис. 1, в) при температуре 40 °C. На рис. 1, б, в видно, что на кривых выделяются начальная переходная область, протяженный линейный участок (область упругой деформации) и пластическая область. Область упругого деформирования ограничена ли-

нейной зависимостью кривых напряжение – деформация. В пластической области кривые напряжение – деформация имеют сложный вид. На протяженность пластической области оказывает существенное влияние время твердения. На начальных стадиях твердения пластическая область оказывается протяженной, сопоставимой с протяженностью упругой области, и, как правило, обнаруживается монотонный рост напряжений течения до значений предела прочности образцов, за которым наблюдается также протяженная область падения напряжений. Указанная последовательность стадийности кривых σ – ε характерна для начальных стадий твердения при всех исследуемых температурах прогрева. Температура оказывает влияние только на количественные характеристики: предел текучести, прочность и интенсивность упрочнения на кривых σ – ε . С увеличением времени твердения и температуры пластическая область существенно сокращается, на кривых за пределом текучести наблюдается, как правило, высокая плотность изломов. Предел прочности в некоторых случаях практически совпадает с пределом текучести, т. е. разница на кривых σ – ε составляет доли процентов деформирования. Не представляется возможным выделить закономерности влияния температуры и времени твердения на напряжения течения в пластической области на поздних стадиях твердения. На кривых течения наблюдается как скачкообразный рост напряжений, так и скачкообразное снижение. С увеличением времени твердения наблюдается склонность к хрупкому разрушению. Образцы портландцемента в пластической области деформируются индивидуально. Переходная область в процессе изотермического прогрева мало меняется на начальных стадиях твердения. Повышение температуры прогрева и увеличение времени прогрева приводят к существенному сокращению переходной области на кривых течения.

В работе анализировались модуль упругости, предел текучести на кривых напряжение – деформация. Модуль упругости характеризует интенсивность накопления прочности образцов в области упругих деформаций. Предел текучести σ_0 на кривых σ – ε соответствует напряжению перехода от линейного участка зависимости к пластической области. Для оценки модуля упругости линейный участок аппроксимировался зависимостью (рис. 1, красная линия)

$$\sigma = A + G \cdot \varepsilon, \quad (1)$$

где σ – приложенное напряжение; ε – деформация; A – константа. Параметр G соответствует оценке модуля упругости. Коэффициент линейной корреляции для всех исследуемых образцов был близок к единице (не менее 0,998). На рис. 2 приведены зависимости предела текучести и модуля упругости твердеющего цементного камня от времени твердения (времени накопления прочности) при различных температурах. Так при температуре 40 °С (рис. 2, а, б) за исследуемый промежуток времени (0–67) ч и при температуре 50 °С (рис. 2, в, г) за исследуемый промежуток времени (0–43) ч с момента начала изотермического прогрева предел текучести возрастет более чем на порядок, в то время как при температуре изотермического прогрева 70 °С (рис. 2, д, е) за исследуемый промежуток времени (0–51) ч предел текучести возрастает почти на порядок. Наблюдается также значительный рост модуля упругости.

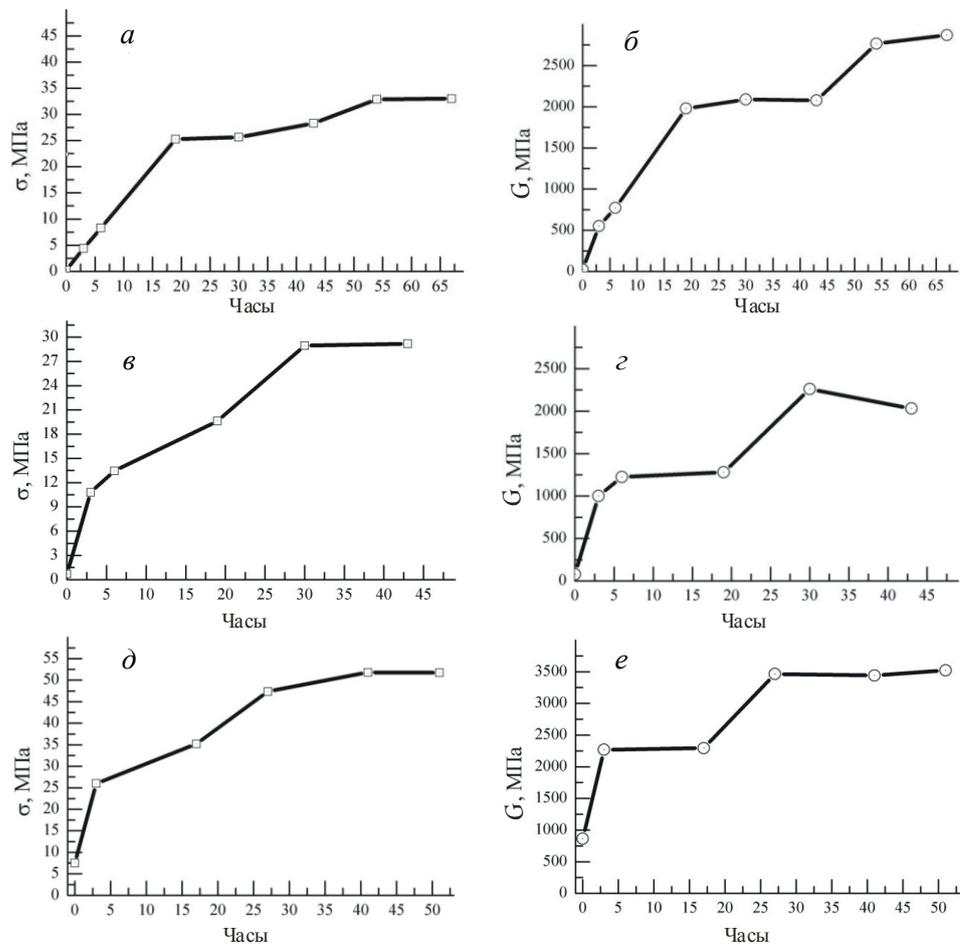


Рис. 2. Зависимости предела текучести (σ) и модуля упругости (G) от времени твердения при температурах 40 °C (а, б), 50 °C (в, г), 70 °C (д, е)

Температура прогрева оказывает существенное влияние на интенсивность роста прочности, а также на значения предела текучести (рис. 3). Для иллюстрации приведены температурные зависимости предела текучести, модуля упругости для 0, 3, 30 и 43 ч твердения. Хорошо видно, что с ростом температуры интенсивность накопления предела текучести, модуля упругости возрастает. За сравнительно небольшой промежуток времени (не более 67 ч) цементный камень набирает значительную долю прочности твердеющего камня относительно 28 сут твердения при комнатной температуре. В работе были получены значения предела текучести, модуля упругости после 28 сут, которые соответствуют проектным характеристикам. Было установлено, что модуль упругости равен $\sim 3630,6$ МПа, предел текучести – 51,75 МПа. Очевидно, что после 67 ч твердения прочностные характеристики составляют не менее 75 % прочности от проектных значений. С повышением температуры испытания указанная доля достигается при существенно меньшем времени твердения.

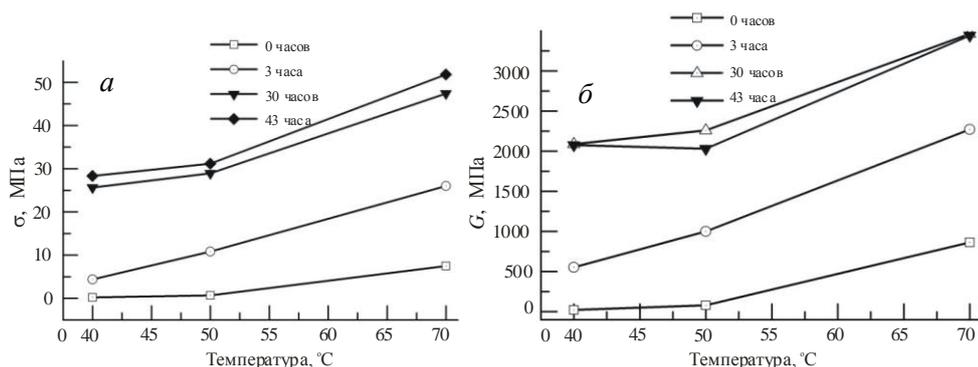


Рис. 3. Температурная зависимость предела текучести (а) и модуля упругости (б)

Заключение

Таким образом, исследование механических свойств портландцемента показало, что на кривых напряжение – деформация выделяются следующие стадии: переходная, упругая и пластическая области. Температура и время изотермического твердения оказывают существенное влияние на накопление прочности портландцемента в области пластической деформации. На кривых σ – ε в конце изотермического твердения предел прочности практически совпадает с пределом текучести, деформирование не является монотонным, наблюдается высокая плотность изломов, и образцы разрушаются хрупко. Во временном интервале твердения 0–67 ч предел текучести возрастает практически на порядок, существенно увеличиваются упругие модули. Установлено, что с повышением температуры твердения указанные характеристики возрастают, наблюдается более интенсивное накопление прочности. Основной характеристикой оценки прочностных свойств при разных температурах оказывается предел текучести. В исследуемом интервале времени твердения портландцемент достигает не менее 75 % прочностных проектных характеристик, соответствующих 28 сут твердения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Берг, О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона / О.Я. Берг. – М. : Госстройиздат, 1962. – 96 с.
2. Берг, О.Я. Высокопрочный бетон / О.Я. Берг, Е.Н. Щербаков, Г.Н. Писанко. – М. : Стройиздат, 1971. – 208 с.
3. Ахвердов, И.Н. Основы физики бетона / И.Н. Ахвердов. – М. : Стройиздат, 1981. – 644 с.
4. Акимова, Т. Н. Цементный бетон / Т.Н. Акимова, Ю.Э. Васильев. – М. : МАДИ (ГТУ), 2007. – 146 с.
5. Миронов, С.А. Температурный фактор твердения бетонов / С.А. Миронов. – М.: Стройиздат, 1948. – 46 с.
6. Баженов, Ю.М. Технология бетона / Ю.М. Баженов. – М. : Ассоциация строительных вузов, 2007. – 528 с.
7. Невиль, А.М. Свойства бетона / А.М. Невиль. – М. : Стройиздат, 1972. – 343 с.
8. Теория цемента / под ред. А.А. Пашенко. – Киев : Будивельник, 1991. – 168 с.
9. Адамцевич, А.О. Использование калориметрии для прогнозирования роста прочности цементных систем ускоренного твердения / А.О. Адамцевич, С.А. Пашкевич, А.П. Пуствовгар. – М. : Инженерно-строительный журнал. – 2013. – № 3. – С. 36–42.

10. Степанова, В.Ф. Долговечность бетона / В.Ф. Степанова. – М. : Ассоциация строительных вузов, 2014. – 126 с.

REFERENCES

1. Berg O.Ya. Fizicheskie osnovy teorii prochnosti betona i zhelezobetona [Physical basics of concrete and reinforced concrete strength theory]. Moscow: Gosstroyizdat Publ., 1962. 96 p. (rus)
2. Berg O.Ya, Shcherbakov E.N., Pisanko G.N. Vysokoprochnyi beton [High-strength concrete]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1971. 208 p. (rus)
3. Akhverdov I.N. Osnovy fiziki betona [Basics of concrete physics]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1981. 644 p. (rus)
4. Akimova T.N., Vasil'ev Yu.E. Tsementnyi beton [Cement concrete]. Moscow: MADI Publ., 2007. 146 p. (rus)
5. Mironov S.A. Temperaturnyi faktor tverdeniya betonov [Temperature factor of concrete hardening]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1948. 46 p. (rus)
6. Bazhenov Yu.M. Tekhnologiya betona [Concrete technology]. Moscow: ASV Publ., 2007. 528 p. (rus)
7. Nevil', A.M. Svoistva betona [Concrete properties]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1972. 343 p. (rus)
8. Pashenko A.A. Teoriya tsementa [Cement theory]. Kiev: Budivel'nik, 1991. 166 p. (rus)
9. Adamtsevich A.O., Pashkevich S.A., Pustovgar A.P. Ispol'zovanie kalorimetrii dlya prognozirovaniya rosta prochnosti tsementnykh sistem uskorennogo tverdeniya [Calorimetry for forecasting strength growth in cement systems of accelerated hardening]. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*. 2013. No. 3. Pp. 36–42. (rus)
10. Stepanova V.F. Dolgovechnost' betona [Durability of concrete]. Moscow: ASV Publ., 2014. 126 p. (rus)