УДК 666.972:532.135

© Ю. В. Пухаренко, д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент РААСН

© Г. М. Хренов, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: g.khrenov@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-6-152-157

© Yu. V. Pucharenko, Dr. Sci. Tech., Professor,
Correspondent Member of RAACS

© G. M. Khrenov, post-graduate student
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: g.khrenov@mail.ru

ЗАДАЧИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ В РАЗВИТИИ СПОСОБОВ БЕЗОПАЛУБОЧНОГО ФОРМОВАНИЯ

PROBLEMS OF TECHNOLOGICAL MECHANICS IN DEVELOPMENT OF TECHNIQUES OF FORMLESS MOLDING

Рассматривается применимость современных технологических моделей к новым способам формирования бетонных и железобетонных изделий и конструкций. Поднимаются новые актуальные вопросы технологии бетонов и формулируются задачи перед технологической механикой с оглядкой на историю их развития. На основе теоретических и экспериментальных изысканий обосновывается важность изучения пластичности бетонных смесей в результате активного развития технологий непрерывного безопалубочного формования. Формулируются пути дальнейших исследований в области пластических свойств малоподвижных бетонных смесей.

Ключевые слова: технологическая механика, безопалубочное формование, бетонная смесь, реология, пластичность.

The article deals with application of modern technological models for new methods of forming concrete and reinforced concrete products and structures. New topical issues of concrete technology are raised and technological mechanics tasks are formulated taking into account the history of their development. On the basis of theoretical and experimental studies, the importance of researching the plasticity of concrete mixtures as a result of the active development of continuous formless molding technologies is substantiated. The ways of further research in the field of plasticity of low-workability concrete mixtures are formulated.

Keywords: technological mechanics, formless molding, concrete mixture, rheology, plasticity.

Введение

Современные способы формования бетонных и железобетонных изделий отличаются широким многообразием и многозадачностью, по мере их развития возникают различные задачи, решать которые должны ученые, инженеры, технологи, экономисты и т. д. К числу наиболее активно развивающихся технологий относится непрерывное безопалубочное формование, которое диктует новые технические вопросы, на некоторые из которых должна отвечать технологическая механика.

Задачи технологической механики в традиционных способах бетонирования

В настоящее время технологическая механика по Б. С. Мосакову [4] решает две группы задач: первая, связанная с временным изменением

свойств бетонных смесей (например, увеличение подвижности под вибрационным воздействием); вторая, связанная с сопротивлением бетонных смесей внутренним воздействиям (например, сопротивление усадке). При решении данных задач бетонная смесь, как правило, представляется в виде реологической модели Шведова–Бингама или ее частным случаем. Стоит отметить, что такая необходимость вызвана сложностью применения феноменологической макрореологии.

Модель Шведова–Бингама, как отмечено в [1], справедлива лишь для подвижных невибрируемых смесей. В случае наличия вибрации бетонную смесь лучше описывает уравнение Ньютона, а в случае существенного увеличения сопротивления сдвигу за счет повышения концентрации

заполнителя и снижения расхода воды поведение бетонной смеси лучше описывается уравнением Кулона.

Как видно, классические реологические подходы применимы лишь к некоторым частным случаям и, более того, описывают поведение бетонных смесей во вполне определенных условиях. Такие условия, как правило, присущи классическим технологиям формирования бетонных смесей и не отражают особенности поведения малоподвижных бетонных смесей вне опалубки.

С другой стороны, при решении технологических вопросов не обязательно обращаться к реологии, ведь существует ряд технологических параметров бетонной смеси: осадка конуса, распыл конуса, жесткость и т. д. На сегодняшний день все технологические параметры отражают технологические свойства (например, формуемость, подвижность и т. д.). И технологические параметры, и технологические свойства позволяют контролировать и изменять свойства бетонных смесей в условиях реального производства. Использование на практике технологических параметров обусловлено невозможностью использования реологических моделей и подходов. Из этого и формируется одна из функций технологической механики: формирование применимых на практике технологических моделей на основе фундаментальных реологических законов и представлений.

С оглядкой на историю технологической механики [3] можно сказать, что при переходе от фундаментальной реологии к применимым на практике технологическим моделям вводились граничные условия, связанные с технологическими процессами при формировании бетонных смесей, в результате чего удалось существенно упростить и сделать более доступными технологические модели, но в то же время пришлось «заточить» их под конкретные технологии формирования. Это также видно из некоторых исследований, например в исследовании [9] Британского общества реологии (The British Society of Rheology) установлено, что при одинаковых технологических параметрах бетонные смеси могут отличаться по реологическим характеристикам. В работе Aminul Islam Laskar [10] приведена наглядная схема связи реологии и технологии, из которой видно, что технологические модели

учитывают только два реологических параметра: вязкость и предел текучести. Это подтверждает ограниченность технологических моделей.

Наибольшее развитие получили технологии формирования бетонной смеси с использованием опалубки, внутри которой и происходит схватывание и твердение бетонной смеси. Соответственно, все современные технологические модели позволяют управлять свойствами бетонных смесей, имеющими значение при формировании в опалубке, но не учитывают свойства, играющие роль при формировании специфичным способом, например, непрерывным безопалубочным.

Обобщая вышеизложенное, можно заключить, что современные технологические модели применимы на практике не во всех случаях. В частности, при непрерывном безопалубочном формировании возникают вопросы, которые современная технологическая механика оставляет без внимания.

Некоторые проблемы непрерывного безопалубочного формирования

Технологии непрерывного безопалубочного формирования зародились в СССР под названием «комбайн-настил» [7], и за свою богатую историю получили сильное развитие и распространение по всему миру. Уже в 2000-х годах по технологиям непрерывного безопалубочного формирования можно было выпускать изделия очень широкой номенклатуры, а с учетом активного развития технологий трехмерной печати, в обозримом будущем станет возможным изготовление изделий и конструкций любой сложности [7]. Однако несмотря на успешное применение данных технологий, их потенциал реализован лишь в малой степени по ряду технических и экономических причин.

С учетом современных тенденций в технологии бетона можно выделить следующие проблемы указанных технологий: повышенный расход цемента, ярко выраженная экзотермия при схватывании и твердении бетонной смеси, недостаточное качество поверхности, недостаточная удобоукладываемость. Некоторые вопросы не без успеха решаются применением современных добавок, другие входят в компетенцию технологической механики. Однако есть вопросы, которым вообще не уделяется внима-

ние ни в нормативно-технической литературе, ни в научных публикациях [5, 6].

К числу наиболее актуальных проблем при непрерывном безопалубочном формовании можно отнести процесс растрескивания свежесформованных изделий в результате механических воздействий. На примере дорожного бетонного отбойника на участке Киевского шоссе в Ленинградской области (рис. 1) хорошо видно, что при одинаковых условиях формования и при одинаковых технологических параметрах бетонных смесей данные дефекты могут образоваться или не образовываться в зависимости от состава бетонной смеси.

В соответствии с комментариями специалиста, сопровождавшего бетонирование, данные дефекты образовывались после выхода бетонной смеси из формующей машины, но до начала схватывания. При этом дефекты, как правило, возникали при изменении скорости и (или) траектории перемещения формующей машины. Другими словами, в процессе бетонирования возникали внешние механические воздействия, которые вынуждали свежесформованное несхватившееся изделие деформироваться. В результате деформации нарушалась сплошность бетонной смеси и возникали трещины. Вместе с тем при переходе на другой тип пластифицирующей добавки и сохранении как условий формования, так и технологических параметров бетонной смеси удалось избежать растрескивания, что также согласуется с некоторыми исследованиями [6].

Рис. 1. Свежесформованный дорожный отбойник по технологии непрерывного безопалубочного формования: а — с ярко выраженными трещинами; б — без дефектов

Анализируя данный пример, а также множество других, можно заключить, что существует проблема растрескивания свежесформованных изделий в результате внешних механических воздействий, которую невозможно решить, используя существующие технологические модели. Складывается ситуация, при которой технологи вынуждены «вслепую» бороться с процессом трещинообразования, подбирая состав бетонной смеси и ее компоненты практически наугад. При этом данному вопросу не уделяется должного внимания в научном сообществе, несмотря на то что специалисты с ним сталкиваются повсеместно.

Механизм трещинообразования в процессе безопалубочного формования

Как говорилось ранее, при создании технологических моделей на основе реологических представлений производится упрощение, при котором частью фундаментальных реологических свойств намеренно пренебрегают. Совершенно очевидно, что неприменимость современных технологических моделей к некоторым вопросам непрерывного безопалубочного формования обусловлена вышеуказанными упрощениями. Другими словами, технологические модели не учитывают некоторые фундаментальные реологические свойства вязко-пластичных систем, которые могут отвечать за процесс растрескивания свежесформованных изделий. Важным этапом на пути определения «потерянных» реологических свойств является анализ и формулирование механизма трещинообразования.

Для анализа процесса трещинообразования свежесформованного изделия при помощи лабораторного бетоноукладчика использовались бетонные смеси различного типа (мелкозернистые бетонные смеси, тяжелые бетонные смеси, фибробетонные смеси, легкие бетонные смеси) и состава (составы отличались расходом вяжущего, отношением расхода заполнителей, расходом фибры, типом и расходом пластифицирующей добавки). Необходимо отметить, что прослеживаемые в ходе экспериментов тенденции и механизмы схожи для всех типов бетонных смесей, поэтому рассмотрим и проанализируем процесс трещинообразования только на одном типе бетонной смеси.

Рассмотрим процесс трещинообразования свежесформованных образцов, изготовлен-

ных из мелкозернистых бетонных смесей с различным Ц/П (цементнопесчаное соотношение) и В/Ц, но одинаковой подвижностью (табл.).

1. Стоит отметить, что водоцементное отношение отличалось для каждого состава и подбиралось исходя из расплыва конуса на встряхивающем столе (185 ± 5 мм при 15 встряхиваниях по ГОСТ 310.4–81 «Цементы. Методы определения прочности при изгибе и сжатии»).

Рассмотрим влияние состава смеси на процесс трещинообразования (рис. 2).

Как видно на рис. 2, а, в процессе формовки в теле свежееотформованного изделия образуется множество трещин, образующиеся после выхода смеси из бетоноукладчика, но до начала схватывания. Процесс формовки на лабораторном бетоноукладчике сопровождается ярко выраженными изменениями скорости и траектории перемещения паллеты. Другими словами, в процессе формовки возникают деформации свежееотформованной бетонной смеси, в результате которых происходит разрыв сплошности среды и образуются поперечные трещины.

Из рис. 2, б видно, что, в отличие от предыдущего случая, количество трещин значительно сократилось при сохранении условия формования. То есть имели место те же изменения скорости и траектории перемещения паллеты, возникали те же деформации смеси, но трещины образовывались только при сильнейших деформациях. Как видно из таблицы, используемые в первых двух случаях составы отличаются лишь расходом цемента и обладают одинаковой подвижностью.

На примере, показанном на рис. 2, в, видно, что с сохранением прежних условий формования, но использованием состава 3, который отличается от состава 2 наличием пластифицирующей добавки, в процессе формования на лабораторном бетоноукладчике в теле образца не образуется видимых трещин. То есть существующие в результате условий формования деформации смеси не приводят к разрыву сплошности среды.

Анализируя все три примера, можно заключить, что бетонные смеси одного типа, одной подвижности, но разного состава могут обладать существенным различием свойств, от которых и будет зависеть процесс трещинообразования свежееотформованного изделия. С учетом представлений, полученных в результате наблюдений

на лабораторном бетоноукладчике, а также общеизвестных знаний о структуре и свойствах бетонных смесей [1, 2, 4], не вызывает сомнений, что способность бетонной смеси деформироваться без разрыва сплошности среды обеспечивается за счет свойств цементного теста. Именно цементное тесто способно к ярко выраженным бездефектным деформациям. При деформации бетонной смеси деформируется именно цементное тесто, а не заполнитель или другие твердые фазы.

В соответствии с общепринятыми представлениями [1, 2, 4], цементное тесто является системой с высокоразвитой поверхностью раздела твердых и жидких фаз. Эта поверхность раздела насыщена различными межмолекулярными и капиллярными взаимодействиями, благодаря которым цементное тесто, а соответственно и бетонная смесь приобретают свою связность. Поверхность раздела можно условно охарактеризовать по двум параметрам: величина поверхности, характер взаимодействий на поверхности. На примере вязкости можно наблюдать влияние этих параметров на реологию цементного теста. С увеличением поверхности увеличивается и количество связей, что приводит к большей структурной прочности, то есть большей вязкости. С изменением характера взаимодействия между фазами, например, при введении пластификатора, величина поверхности сохраняется, однако вязкость системы уменьшается. Но вязкость характеризует лишь структурную прочность системы, она не характеризует то, насколько можно удлинять связи на поверхности раздела фаз, прежде чем они разорвутся.

Резюмируя вышесказанное, можно заключить, что механизм образования трещин в бетонной смеси сводится к следующему: в результате внешних механических воздействий, деформирующих бетонную смесь, происходит удлинение межмолекулярных и капиллярных связей в цементном тесте, при достижении критического удлинения которых и происходит разрыв сплошности цементного теста, а соответственно и бетонной смеси.

Сформулированный механизм образования и раскрытия трещин, а также установленные факторы влияния полностью согласуются с общепринятыми представлениями о структуре и свойствах бетонной смеси и цементного теста,

Рис. 2. Процесс трещинообразования при непрерывном безопалубочном формировании с использованием: а — состава 1; б — состава 2; в — состава 3

Используемые составы бетонных смесей

Показатель	Величина показателя		
	Состав 1	Состав 2	Состав 3
Ц/П	1/3	1/2	1/2
Расход добавки, %	0	0	0,4
Распływ конуса, мм	186	181	183

а также с полученными на лабораторном бетоноукладчике данными.

Анализируя полученные представления о процессе трещинообразования, можно с уверенностью сказать, что за процесс растрескивания бетонной смеси вне опалубки отвечает пластичность бетонной смеси — фундаментальное реологическое свойство.

Роль пластичности в технологии бетона

Известно, что пластичность — это способность тела безвозвратно деформироваться без разрыва сплошности. Как видно из определения, пластичность можно условно поделить на две составляющие: способность к безвозвратным деформациям, способность деформироваться без образования трещин. С этой точки зрения пластичность уже частично нашла отражение в технологии бетона. Способность бетонной смеси к безвозвратным деформациям выражается в технологическом свойстве «формуемость», которое характеризуется технологическим параметром «жесткость» [8]. С учетом особенностей классических технологий формирования этого достаточно, поскольку не имеет значения процесс растрескивания при деформациях в процессе укладки, так как все трещины

и несплошности могут быть устранены путем вибрирования. При непрерывном безопалубочном формировании невозможно подвергать вибрации уже отформованное изделие, так как нарушится его геометрия. С этой точки зрения необходимо учитывать и способность бетонной смеси деформироваться без разрыва сплошности, то есть учитывать пластичность в полной мере. Это также видно на примере других технологий.

2. В технологии керамики при формировании массива-сырца, например, на ленточном прессе, важнейшим параметром оценки пригодности глины является число пластичности. Число пластичности напрямую характеризует пластичность и определяется различными способами (например, при помощи прибора Васильева). Способы определения пластичности глины отражены в нормативной документации (ГОСТ 21216–2014 «Сырье глинистое. Метод определения пластичности»), в научных работах уделяется большое внимание вопросам пластичности и ее зависимости от различных факторов. При этом стоит отметить, что технологии формирования глины, за исключением шликерного способа, очень схожи с технологиями непрерывного безопалубочного формирования бетонных и железобетонных изделий.

Обобщая вышеизложенное, можно заключить, что пластичность в технологии бетона может иметь огромное значение. В отличие от схожих технологий получения различных материалов, в технологии бетона пластичность учитывается в недостаточной степени, в частности, не учитывается способность бетонной смеси к бездефектным деформациям. При этом, как установлено ранее, это может иметь огром-

ное значение при непрерывном безопалубочном формировании.

Заключение

Одним из вопросов непрерывного безопалубочного формирования, требующих внимания, является вопрос пластичности бетонных смесей. За ним скрыто много задач: создание способа оценки пластичности бетонных смесей, определение влияния свойств и расходов сырьевых компонентов на пластичность, влияние пластичности на пригодность бетонных смесей к той или иной технологии, создание нормативной базы и т. д. Другими словами, существует совокупность взаимосвязанных проблем, которым, несмотря на их актуальность и важность, в современной технологии бетона не уделяется достаточного внимания и решать которые должна технологическая механика.

Библиографический список

1. Баженов Ю. М. Технология бетонов. М.: АСВ. 2007. 528 с.
2. Блещик Н. П. Структурно-механические свойства и реология бетонной смеси и прессвакуумбетона. Минск: Наука и техника, 1977. 232 с.
3. Мосаков Б. С. Основы технологической механики тяжелых бетонов. Новосибирск: СГПУС, 2017. 186 с.
4. Мосаков Б. С., Пухаренко Ю. В. Задачи технологической механики как составной части строительного материаловедения // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 2 (55). С. 127–131.
5. Рыжов Д. И. О долговечности бетонов из наномодифицированных смесей // Вестник гражданских инженеров. 2013. № 2 (37). С. 146–151.
6. Рыжов Д. И. Применение наномодифицированных добавок для железобетонных изделий // Строительные материалы и изделия. 2015. № 6 (53). С. 146–150.
7. Уткин В. В., Чумерин Ю. Н. Современная технология строительной индустрии. М.: Русский издательский дом, 2008. 100 с.
8. Хренов Г. М. Исследование технологических и физико-технических свойств наномодифицированных бетонных смесей и бетонов: дис. ... магистра техники и технологии. СПб., 2017. 96 с.
9. Banfill P. F. G. Rheology of fresh cement and concrete // Rheology review, 2006. Pp. 61–130.
10. Laskar A. I. Study of rheological behavior of high-performance concrete. PhD Thesis. Indian Institute of Technology Guwahati, 2008.

References

1. Bazhenov Yu. M. *Tekhnologiya betonov* [The technology of concrete]. Moscow, ASV Publ., 2007, 528 p.
2. Bleshchik N. P. *Strukturno-mekhanicheskie svoystva i reologiya betonnoy smesi i pressvakuumbetona* [Structural and mechanical properties and rheology of concrete mix and press vacuum concrete]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1977, 232 p.
3. Mosakov B. S. *Osnovy tekhnologicheskoy mekhaniki tyazhelykh betonov* [Fundamentals of technological mechanics of heavy concrete]. Novosibirsk, SGPUS Publ., 2017, 186 p.
4. Mosakov B. S., Pukharenko Yu. V. *Zadachi tekhnologicheskoy mekhaniki kak sostavnoy chasti stroitel'nogo materialovedeniya* [Tasks of technological mechanics as part of construction materials science]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2016, no. 2 (55), pp. 127–131.
5. Ryzhov D. I. *O dolgovechnosti betonov iz nanomodifitsirovannykh smesey* [Producing gas concrete with high operational properties]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2013, no. 2 (37), pp. 146–151.
6. Ryzhov D. I. *Primenenie nanomodifitsirovannykh dobavok dlya zhelezobetonnykh izdeliy* [Use of the nanomodified additives for concrete products]. *Stroitel'nye materialy i izdeliya – Construction materials and products*, 2015, no. 6 (53), pp. 146–150.
7. Utkin V. V., Chumerin Yu. N. *Sovremennaya tekhnologiya stroitel'noy industrii* [Modern technology of construction industry]. Moscow, Russkiy izdatel'skiy dom Publ., 2008, 100 p.
8. Khrenov G. M. *Issledovanie tekhnologicheskikh i fiziko-tekhnicheskikh svoystv nanomodifitsirovannykh betonnykh smesey i betonov. Diss. magistra tekhniki i tekhnologii* [Research of technological and physics and technology properties of the nanomodified concrete mixes and concrete. MSci in Tech. diss.]. St. Petersburg, 2017, 96 p.
9. Banfill P. F. G. Rheology of fresh cement and concrete. *Rheology Review*, 2006, pp. 61–130.
10. Laskar A. I. *Study of rheological behavior of high-performance concrete*. PhD Thesis. Indian Institute of Technology Guwahati, 2008.