

# Поведение набрызг-бетонов/торкретов при огневом воздействии. Влияние микрофибры на процесс взрывообразного разрушения бетонов

by Peter C. Tatnall

События последних лет вынудили специалистов в индустрии бетона сфокусироваться на влиянии огневого воздействия на бетонные структуры.

Информация о влиянии огня на бетон была в общем доступе с 1950х годов.<sup>1</sup> С другой стороны, информация о поведении прочного и эффективного бетона в огне была представлена относительно недавно, особенно относящаяся к тепловому шоку (резкому увеличению температуры) и воздействию очень высоких температур.<sup>2</sup>

Как правило, высокопрочный бетон более чувствителен к высоким температурам и тепловому шоку, чем обычный, из-за его низкой пористости (меньшего количества взаимосвязанных пор), ведущей к нарастанию давления водяного пара. В процессе увеличения давления в порах, в бетоне появляется напряжение, и когда превышает его прочность, происходит микровзрыв. Части горячего бетона отстреливаются, открывая ещё большее количество материала воздействию огня. Быстрое тепловое расширение нормальных и, в меньшей степени, лёгких агрегатов бетона также может повести к взрыву.

Безусловно, торкрет может быть классифицирован как высокопрочный бетон. В результате совместных разработок относительно метода напыления, структура пор может быть идентичной высокопрочным бетонам, следовательно, торкреты тоже находятся под угрозой разрушения в огне. До недавних времен существовало очень мало исследований влияния пожаров на материал.

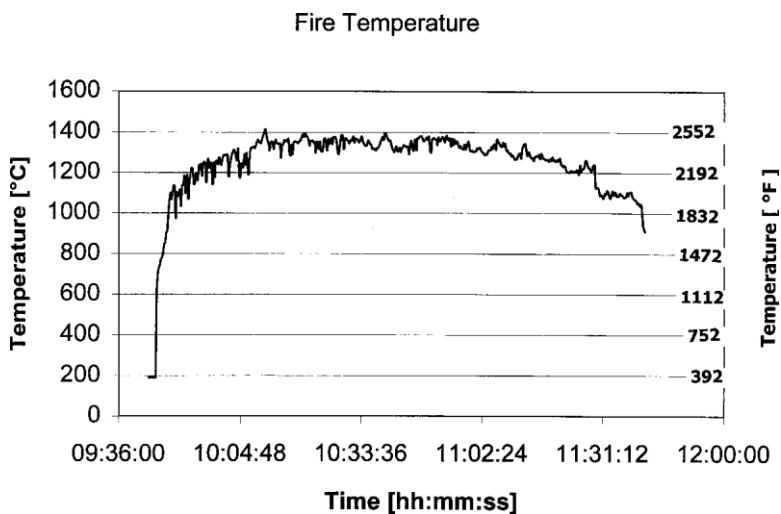
Однако сильные возгорания в тоннелях, таких как Ла-Манш (Евротоннель), Монбланский тоннель и Готтардский тоннель в Европе, привели к новым исследованиям торкрета и влияния на него больших скачков температуры. Приложение 1<sup>3</sup> показывает разрушение бетона в Евротоннеле после возгорания железнодорожного вагона в 1996 году. Пострадали 11 человек и более 600 футов (183 метров) потолочного покрытия 16-километрового Готтардского тоннеля обрушились после столкновения двух грузовиков, ставшего причиной пожара, длившегося более двух суток при температуре, по оценкам достигающей 2200°F (1200°C).

Во время огневых испытаний были разработаны новые кривые времени/температуры, как результат изучения вышеупомянутых и других пожаров. Они помогают моделировать воздействие углеводородных пожаров, вызванных такими топливами, как бензин, дизельное топливо, животные жиры и шины.<sup>4</sup> Печи настроены, чтобы достигать температуры 400°F (200°C) за минуту и 2000°F (1100°C) за 5 минут; максимальные же могут доходить до 2460°F (1350°C). Затем температуры придерживаются ещё два часа. Эта кривая показана в приложении №2.

В целом, повреждения, нанесённые монолитному бетону или торкрету/набрызг-бетону огнём, происходят по причине двух отчётливых воздействий. В первом случае, влага в порах испаряется с горячей поверхности торкрета, и торкретная паста обезвоживается.



Приложение 1: Разрушение бетонной облицовки В Евротоннеле; 1996.<sup>3</sup>



Приложение 2: Кривая температуры/времени в печи (Кривая RWS).

Когда это происходит, теряется связь между пастой и остальными частями (из-за различной температуры); торкрет теряет все свои структурные характеристики. Этот тип изнашивания характерен для несильных изменений температуры; он описан в испытании ASTM E119.<sup>5</sup> Как только жидкость в порах превращается в пар, она испаряется с поверхности торкрета.

Во втором случае, скачок температуры настолько резкий, что жидкость не успевает удалиться с поверхности торкрета; образуется давление пара в микропорах, которое приводит к разрушению торкрета. Как следствие, слои торкрета сильно смещаются/взрываются, новая часть попадает под огонь, и взрывные повреждения затрагивают ещё большее количество материала. Описанное далее исследование иллюстрирует этот феномен.

В 2001 году «SI Concrete Systems» заключил контракт с «Hagerbach Test Gallery» в Швейцарии, чтобы исследовать влияние огня с кривой RWS на фибро-железобетонный торкрет; причиной было беспокойство, выраженное владельцами и проектировщиками туннелей. Квадратные плиты размерами 4 фута на 9 дюймов (1,45 м) и толщиной 6 дюймов (15 см) были полимеризованы на протяжении 28 дней. Базовый состав торкрета, использовавшийся в эксперименте, показан в таблице 1. Одна плита была усилена не фиброй, а стальной сеткой, которую обычно используют в облицовке туннелей в Европе; сетка была укреплена в центре плиты. В другую плиту добавлялись стальные волокна (40 кг/м<sup>3</sup>), которые могут быть использованы в укреплении туннелей. В третью плиту были добавлены стальные волокна (40 кг/м<sup>3</sup>) и тонкая полипропиленовая фибра (1,8 кг/м<sup>3</sup>). В четвёртую плиту была добавлена крупная высокопрочная полимерная фибра, идентичная по размерам и форме стальной фибре, добавленной во вторую плиту.

Все плиты подвергались действию огня согласно кривой RWS (приложение 2) в специально построенной печи, как видно на приложении 3. Огонь от горения дизельного топлива распределялся по плитам, которые, как показано, были расположены горизонтально на верху печи. Термопары находились около панелей в печи и в самих торкретных плитах на глубине 30 и 70 мм

Таблица 1: Состав бетона, кг/м<sup>3</sup>.

Цемент	449,7
Вода	205,87
Совокупность	2396,84
Стальная фибра	39,16
Соотн. вода/цемент	0,27
Прочность на сжатие	6525 psi

и были соединены с компьютером; температуры отображались на дисплее в реальном времени.

Укрепленная стальной сеткой панель была протестирована первой. После пары минут воздействия огня исследователи услышали громкие хлопки и увидели куски торкрета, отскакивающие от пола в печи. Через 15 минут они потушили огонь, так как забеспокоились, что взрывы повредят оборудование для огневых испытаний. Укреплённая сеткой панель после испытания показана на приложении 3. Примерно половина толщины, 3 дюйма (7,5 см), была утрачена в течение 15 минут взрывов, как показано в приложении 4.

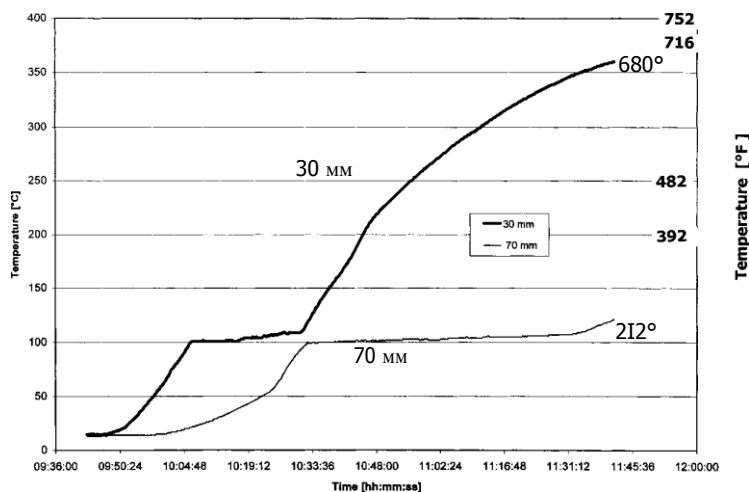
Третья плита со стальными волокнами и микропропиленовой фиброй (1,8 кг/м<sup>3</sup>) тестировалась на протяжении всех двух часов. График времени и температуры для термопар, встроенных в торкрет, находится в приложении 5; внешняя часть плиты после 2-х часов тестирования показана в приложении 6. Маленькая часть на верхней грани обезвожилась и сошла; помимо этого, панель выдержала испытание без взрывов.



Приложение 3: углеводородная печь «Hagerbach».



Приложение 4: укрепленная сеткой плита: 15-мин испытание огнём.



Приложение 5: Данные термонапар для стальных + полипропиленовых плит торкрета.



Приложение 6: Стальная + микропропиленовая плита после 2 часов испытания.

Вторая и четвертая плиты, содержащие либо сталь, либо макропропиленовую фибру, но не содержащие микропропиленовую, показали обширное количество взрывов. Панель с макропропиленовой фиброй «разорвалась» на 5 частей.

Было наглядно продемонстрировано, что использование тонкой микропропиленовой фибры смягчает последствия углеводородных пожаров для торкрета.<sup>8,9</sup> Различные тепловые характеристики полипропиленовых волокон и матрицы торкрета ведут к образованию маленьких пор и капилляров в матрице.<sup>8</sup> Эти маленькие капилляры/поры помогают избежать образования давления пара. Результаты исследования торкрета, проводимого Hagerbach, показали, что материал можно сделать огнестойким при использовании этой технологии. Более того, исследование выявило, что макро-фибры из стали или полипропилена не оказывают влияния на взрывы, происходящие в результате возгорания. Это и другие исследования стали результатом использования

и стальных, и микропропиленовых волокон на отдельных участках и футеровках торкрета в тоннеле Хай Спид 1 (Channel Tunnel Rail Link) длиной 25 миль (40 км), строительство которого происходит в настоящее время в Англии. Восприимчивость высокопрочного бетона к огню и его взрывоопасность могут быть устранены при помощи рационального использования микропропиленовой фибры. Это недорогое страхование может защитить множество жизней, как тех, кто пытается спастись от огня, так и тех, кто пытается его потушить.

#### ССЫЛКИ:

1. Malhotra, H. L., "Effect of Temperature on the Compressive Strength of Concrete," *Magazine of Concrete Research*, V.8, No. 23, 1956, pp. 85-94.
2. Wu, B.; Su, X.; Li, H.; and Yuan, J., "Effect of High Temperature on Residual Mechanical Properties of Confined and Unconfined High-Strength Concrete," *ACI Materials Journal*, V.99, No. 4, July-Aug., 2002, pp.399-407.
3. "Researchers Explain Concrete Damage in Tunnel Fires," *Civil Engineering*, July 1999, p. 24.
4. TNO Fire Research Centre, Rijkswaterstaat (RWS) Curve, Netherlands.
5. ASTM, "Standard Methods of Fire Tests of Building Construction and Materials," *Annual Book of ASTM Standards*, V. 04.07, ASTM International, West Conshohocken, PA.
6. Versuchsstollen Hagerbach AG, *Report No. 2001.302.1-5*, Jan. 15, 2001.
7. Personal correspondence with Professor P. J. E. Sullivan, Mar. 2001.
8. Sullivan, P. J. E.; Connelly, R.; and Ali, F. A., "Spalling of High Strength Concrete at Elevated Temperatures," *Journal of Applied Fire Science*, V.6, No. 1, 1996-1997, pp. 3-14.
9. Bilodeau, A.; Chevrier, R.; Malhotra, M.; and Hoff, G. C., "Mechanical Properties, Durability and Fire Resistance of High-Strength Lightweight Concrete," *Report of CANMET*, 1995, 12 pp.
10. Shuttleworth, Peter, "Fire Protection of Concrete Tunnel Linings," *Proceedings of the Third International Conference on Tunnel Fires*, Oct. 9-11, 2001, Washington, DC, pp. 157-165.



*Peter C. Tatnall is a Founding Member and Past President of ASA. He is a Fellow of ACI and is past Chair of ACI Committee 544, Fiber Reinforced Concrete, and a member of ACI Committee 506, Shotcrete. Tatnall serves as Chair of ASTM Subcommittee C09.46, Shotcrete, and is past Chair of Subcommittee C09.42, Fiber Reinforced Concrete. Tatnall also serves as a member of Working Group 12, Shotcrete, of the International Tunneling Association (ITA). He is Director of Underground Construction for S I Concrete Systems, Chattanooga, TN.*