

İnşaat sənayesinin ətraf mühitə təsirinin azaldılması yolları və ekoloji tədbirlər

A.A. Guvalov, t.e.d.

Azərbaycan Memarlıq və İnşaat Universiteti

Açar sözlər: tikinti və söküntü tullantıları, karbon emissiyası, ekolojiya, təkrar emal sementi, klinker, sement daşı, möhkəmlik, bərkimə.

e-mail: abbas-guvalov@mail.ru

DOI.10.37474/0365-8554/2023-5-43-48

Пути снижения воздействия строительной промышленности на окружающую среду и природоохранные мероприятия

Ways to reduce the impact of the construction industry on the environment and environmental measures

A.A. Guvalov, d.t.n.

Азербайджанский университет архитектуры и строительства

A.A. Guvalov, Dr. in Tech. Sc.

Azerbaijan Architecture and Construction University

Ключевые слова: отходы строительства и сноса, эмиссия углерода, экология, вторичный цемент, клинкер, цементный камень, прочность, твердение.

Keywords: construction and demolition wastes, carbon emission, ecology, recycled cement, clinker, cement stone, strength, hardening.

Цементная промышленность в настоящее время сталкивается с серьезной проблемой сокращения своего огромного углеродного следа из-за того, что она является вторым по величине источником промышленных парниковых газов. Ожидается, что это значение будет увеличиваться в дальнейшем, поскольку ожидается, что производство цемента вырастет примерно на 20 % до 2050 г. Таким образом, были разработаны более экологически эффективные альтернативы обычному порتلандцементу для обеспечения устойчивой бетонной промышленности. В статье представлены некоторые из последних достижений в области низкоуглеродистых термоактивируемых переработанных цементов, полученных из старых отходов бетона, что привело к значительному сокращению выбросов парниковых газов, а также способствовало повышению ценности повторного использования отходов и сокращению истощения природных ресурсов. Обсуждаются производство и общие характеристики переработанных цементов, включая основные производственные вопросы, поведение при регидратации, фазовое и микроструктурное развитие, а также его включение в материалы на основе цемента. Рассмотрены некоторые из самых последних исследований, основные проблемы и будущие перспективы переработанных цементов.

The cement industry is currently faced by the great challenge of reducing its vast carbon footprint, due to being the second highest industrial greenhouse gases emitter. This value is expected to further increase, since cement production is foreseen to rise by about 20 % until 2050. Therefore, more eco-efficient alternatives to ordinary Portland cement have been developed towards a sustainable concrete industry. This chapter presents some of the latest advances in low-carbon thermo-activated recycled cements obtained from old waste concrete, leading to a significant reduction of the greenhouse gases emissions, while also encouraging the valorization reuse of waste materials and the reduction of natural resource depletion. The manufacture and general performance of recycled cements, including the main production issues, rehydration behavior and phase and microstructure development, as well as its incorporation in cement-based materials are discussed. Some of the most recent research, main challenges and future perspective of recycled cements are addressed.

Tikinti sənayesi xeyli miqdarda xammal istehlakı, bərpə olunmayan resursların tükənməsi, əhəmiyyətli dərəcədə istixana qazlarının (İQ) emissiyaları və külli miqdarda tikinti və söküntü tullantılarının (TST) utilizasiyası ilə qlobal istiləşməyə səbəb olan ən mühüm sektorlardan biridir. Ona

görə də inşaat sənayesinin ətraf mühitə təsirini azaltmaq üçün ciddi ekoloji tədbirlər və müvafiq beynəlxalq müqavilələr müəyyən edilmişdir. Bu kontekstdə dünya üzrə iri şirkətlər təkrar emala, resurs səmərəliyinə və aşağı karbon emissiyalarına əsaslanan həqiqətən dairəvi iqtisadiyyata doğru

alternativ, ekoloji cəhətdən daha səmərəli tikinti materiallarının inkişafını təşviq edərək daha dayanıqlı sahələrə sərməyə qoyurlar [1]. Avropa Şurasının əsas məqsədi 1990-cı ilin baza ili ilə müqayisədə 2050-ci ilə qədər karbon qazı emissiyalarını 60–80 %-ə qədər azaltmaq və əks doldurma əməliyyatlarını nəzərə almadan TST-nin ən azı 70 %-ni yenidən istifadə etməkdir [2].

Beton dünyada ən çox istifadə olunan tikinti materialı kimi, əhəmiyyətli dərəcədə xammalın çıxarılması və istixana qazlarının emissiyası və külli miqdarda TST-nin əmələ gəlməsi ilə əlaqədar olaraq ətraf mühit üçün ciddi problemlərə çevrilir [3]. Betonun əsas komponenti olan sementin istehsalı zamanı külli miqdarda karbon qazının ayrılmasını nəzərə alsaq demək olar ki, beton istehsalında ümumi CO₂ emissiyasının 80 %-dən çoxu onun payına düşür. Faktiki olaraq dünyada CO₂ emissiyalarının 5 %-dən çoxu sement sənayesində yaranır [4, 5]. Bu məhsula daim artan tələbat səbəbindən karbon qazı emissiyasının 2050-ci ildə 20 %-dən çox artacağı gözlənilir [5]. Buna görə də, beton sənayesi və elmi ictimaiyyətin istiqaməti daha dayanıqlı, ekoloji cəhətdən səmərəli betonun hazırlanmasına yönəlmişdir. Beton istehsalında təkrar emal edilmiş doldurucudan istifadə geniş şəkildə öyrənilmişdir, lakin tikinti sektorunda hələ səmərəli tətbiq olunmur [6-8]. Digər tərəfdən də mövcud texnologiya çüzi miqdarda sement məhlulu yapışmış yüksək keyfiyyətli ikinci dərəcəli doldurucular əldə etməyə imkan vermir. Doldurucuya yapışmış sement məhlulu doldurucuların fiziki-mexaniki və dağılmaya davamlılıq xüsusiyyətlərini azaldır. Digər tərəfdən, sadəcə olaraq təbii doldurucuların təkrar emal edilmiş doldurucularla əvəz edilməsi artıq qeyd olunduğu kimi, əsasən sement istehsalı ilə bağlı olan istixana qazları emissiyalarının əhəmiyyətli dərəcədə azalmasına gətirib çıxarmır. Buna görə də, sementin ətraf mühitə təsirinin effektiv şəkildə azaldılması ilə bağlı müxtəlif strategiyalar həyata keçirilir, o cümlədən karbon qazının tutulması, yeni və daha səmərəli istehsal texnologiyalarının hazırlanması, alternativ yanacaq və alternativ sementlərdən istifadə edilməsi, sementin tərkibində klinkerin azaldılması və s. Karbon emissiyalarını azaltmaq üçün bu üsullar arasında karbon qazının tutulması ən perspektivli və səmərəli yol olmağına baxmayaraq, onun həyata keçirilməsində hələ də bir çox çətinliklər mövcuddur [9]. Klinkerin qismən əvəz edicisi kimi əlavə materialların istifadəsi uzun illərdən nəzərdən keçirilir, lakin hazırda mövcud olan mineral əlavələrlə istixana qazlarının daha da

azaldılmasına nail olmaq çətindir. Bundan başqa, bu əlavələrin bəzilərinin, yəni sənaye tullantısı olan uçucu kül artıq çətin tapılan bir məhsula çevrilib.

Alternativ aşağı karbonlu sementlər, məsələn, kalsium-alüminat və qələvi ilə aktivləşdirilmiş sementlər üzrə intensiv tədqiqatların aparılmasına baxmayaraq onların tikinti bazarında tətbiqi hələ də iqtisadi cəhətdən məqsədəuyğun hesab olunmur [9].

Son dövrlərdə çox perspektivli yanaşma bərkimiş sement tullantılarının termik emalı ilə aşağı karbonlu təkrar emal edilmiş sementlərin (TES) istehsalına əsaslanır. İdeya, aşağı temperaturda termik aktivləşdirilmə yolu ilə istifadə edilmiş sementin bağlayıcı xüsusiyyətlərini bərpa etmək, klinker istehsalının istilik enerjisini azaltmaq və yandırma prosesində karbon emissiyalarının təxminən 60 %-ni təşkil edən əhəngdaşının dekarbonizasiya mərhələsinin qarşısını almaqdır [9, 10].

Yüksək temperaturlara məruz qalan betonun dehidrasiya qabiliyyəti çoxdan sübut edilmişdir. Bu yanğından sonra beton üzərində aparılan tədqiqatlarda özünü göstərmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, köhnə betonun tərkibində qalan reaksiyaya girməmiş müəyyən qədər sementin olmasına baxmayaraq, yapışdırıcılıq qabiliyyətinin bərpa edilməsi hidrasiya məhsullarının regenerasiyası ilə bağlıdır [11].

Bərkimiş sementin yenidən aktivləşdirilməsinin mümkünlüyünün müəyyən edilməsi mühüm addım idi və bir çox tədqiqatçılar bunu təkrar emal edilmiş yapışdırıcı istehsalı ilə bağlı innovativ ideya kimi araşdırmağa başlamışlar. Artıq qeyd edildiyi kimi, termoaktivləşdirmə sement istehsalındakı dekarbonizasiya prosesindən aşağı temperaturda həyata keçirilsə, CO₂ emissiyaları əhəmiyyətli dərəcədə azaldıla bilər və aşağı karbonlu bağlayıcı əldə edilə bilər [12]. Bundan əlavə, beton tullantılarının istifadəsi TST-nin təkrar istifadəsinin əhəmiyyətinin artmasına, təbii ehtiyatların tükənməsinin və müvafiq olaraq poliqrunun azalmasına böyük imkan verir. Bununla belə, təkrar emal edilmiş sement hələ yeni tədqiqat sahəsidir və bu perspektivli ekoloji cəhətdən səmərəli işləri tikinti sənayesinə təqdim etməzdən əvvəl onun istehsal prosesi və sement əsaslı materiallara daxil edildikdə davranışı ilə bağlı müxtəlif aspektlər daha dərinlən araşdırılmalıdır.

Hazırkı tədqiqat işinin məqsədi termik aktivləşdirilmiş regenerasiya olunmuş sementlər sahəsində aparılan ən mühüm tədqiqatların və əsas töhfələrin bəzilərinin nəzərdən keçirilməsi və təbii

resurslara qənaət məqsədi ilə tikinti-söküntü tullantılarının təkrar istifadəsi ilə ətraf mühitin mühafizəsinin təmin edilməsidir.

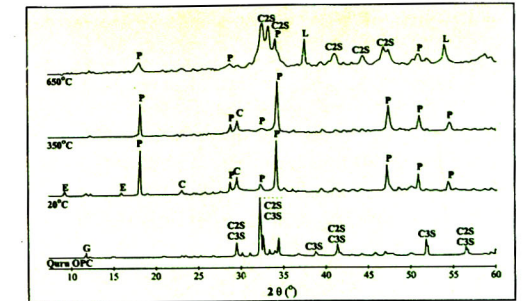
Bir çox tədqiqatçılar yanğına məruz qalmış betonun tərkibindəki sement daşının dehidrasiyası ilə bağlı araşdırmalara əsaslanaraq qeyd edirdi ki, termik aktivləşdirmə sementin hidrasiya məhsullarını klinker fazalarına oxşar xüsusiyyətlərə malik susuzlaşdırılmış birləşmələrin istehsalı ilə geri dönmə prosesə çevirir [13]. Termik aktivləşdirmə sement daşının müxtəlif temperaturlarda baş verən kimyəvi çevrilmələrini, o cümlədən dehidrasiya, dehidroksilləşmə və dekarbonizasiya mərhələlərini əhatə edir. Təkrar emal edilmiş sement istehsalı mahiyyətə üç müvafiq addımı əhatə edir: sement fraksiyasının beton tullantılarının digər tərkib hissələrindən ayrılması; adi portlandsementin (PS) xüsusi səthinə qədər üyüdülməsi; termik aktivləşdirilməsi.

Sənaye miqyasında təkrar emal olunmuş sement istehsalının qarşısında duran əsas maneələrdən biri beton tullantılarının komponentlərinin fərdiləşdirilməsi və ayrılması ilə bağlıdır. Bu, təkcə TES istehsalı üçün deyil, həm də yüksək keyfiyyətli təkrar emal edilmiş aqreqatlar üçün bir problemdir. Əslində, doldurucuların sement məhlulunun yapışması ilə çirklənməsi onların məsələliyini də artırır, bu da təzə betonun dayanıqlığına, yığılmasına və işləmə qabiliyyətinə mənfi təsir göstərir. Bu səbəbdən, hazırkı təkrar beton tullantıları əsasən aşağı keyfiyyətli betonlar üçün aşağı keyfiyyətli təkrar emal edilmiş doldurucular kimi və ya yol əsasının tikilməsində dolğu kimi və landşaftın bərpası üçün təkrar istifadə olunur. Buna görə də, TES-in dəyərini artırmaq və konkret istehsal üçün dairəvi iqtisadiyyatı təşviq etmək üçün səmərəli ayırma prosesini inkişaf etdirmək prioritetdir.

Xüsusi səthinin artırılması hidrasiya zamanı onun reaktivliyini artırır, bu da su ilə qarışdırılan zaman daha sıx mikroquruluşa malik sement daşının yaranmasına səbəb olur. Ona görə də, ən azı PS ilə eyni narınlıqda TES istehsal etmək tövsiyə olunur. Bununla belə, laboratoriya dəyirmanlarında bu məqsədə nail olmaq asan deyil, xüsusən də böyük miqdarda TES tələb olunduqda. Bu səbəbdən əksər tədqiqatçılar 150 µm-ə qədər üyüdülməni nəzərə alıb. Tədqiqatçılar tullantı sementinin narınlığını yaxşılaşdırmaq üçün onun mineral əlavələrlə birgə üyüdülməsini təklif etmişdir [14].

Termik aktivləşdirmədən sonra susuzlaşdırılmış TES hissəcikləri məsələli quruluş və PS hissəciklərindən xeyli dərəcədə kobud olan aşağı

səth sahəsinə malik xüsusiyyətlərə malikdir [15]. Əksinə, adi PS hissəcikləri məsələli deyil və hamar səthə malikdir [16]. TES hissəciklərinin sıxlığı, bir qayda olaraq, PS-dən bir qədər aşağıdır və emal temperaturundan asılı olaraq təxminən 2400–3200 kq/m³ təşkil edir. Dehidrasiya olunmuş tullantı sementi, adətən üçkalsiumlu silikatın (C₃S) olmaması və həmçinin sərbəst əhəng (CaO) və ya kalsitin əhəmiyyətli dərəcədə olması ilə xarakterizə olunur (şəkil) [1]. Əslində, kalsium silikat birləşmələrinin əsas hidrasiya reaksiyasını nəzərə alsaq PS-in hidrasiya məhsullarında (C-S-H) CaO/SiO₂ nisbətini təxminən 1.7 olduğunu güman etmək olar. Nəticədə hidrasiya məhsullarının termik emalı zamanı dehidrasiyasını nəzərə alaraq, yəni kalsium-silikat üçün C/S nisbətini 2-dən aşağı olması, həmçinin sərbəst əhəngin (CaO) olması gözlənilir. 750 °C-də termik emal edilmiş tullantı sementinin tərkibinin analizi göstərdi ki, C/S nisbətini 1.78 olaraq C₂S tərkibinə uyğun gəlir.



Portlandsementin (PS), hidrasiya olunmuş sementin (HPS) və 350, 650 °C-də yandırılmış təkrar emal sementinin (TES) rentgen faza analizi

Söküntü betonun Azərbaycan Memarlıq və İnşaat Universiteti "İnşaat materiallarında nanotexnologiyalar" elmi-tədqiqat laboratoriyası sınaqları aparılmışdır. Betonun laboratoriyaya daşqırığında xırdalanmasından alınan material ələkdən keçirilmiş daş ələntisi, qırılmaz və toz hissələrinə ayrılmışdır. Toz hissəcikləri laboratoriyaya dəyirmanında sement narınlığına qədər üyüdülmüşdür. Üyüdüldükdən sonra 700 °C-də 80 dəq. ərzində termik emal edilmişdir.

Aparılmış tədqiqat nəticələri göstərmişdir ki, 700 °C-də yandırılmış təkrar emal sementi 200–300 marka möhkəmlik verir. Bu onu göstərir ki, termik emal nəticəsində sementin hidrasiya məhsulları dehidrasiya edərək ilkin sement mineralına çevrilir.

Cədvəl 1

№	Qruntun plastikliliyi AASHTO T89; T90; M145 Plastik adədi	Los Angeles Aşınma testi (ASTM C131), %	Şaxtaya davamlılıq testi Maqnezium sulfat (AASHTO T104)	Xüsusi çəki və suhopma (BS-EN 1097-6)		
				Quru, q/sm ³	Suyla doymuş, q/sm ³	Su hopma, %
1	Plastik deyil	47.0	<4.75 mm = 60.8% >4.75 mm = 46.0%	2.283	2.387	4.58
2	Plastik deyil	23.8	<4.75 mm = 11.7% >4.75 mm = 4.4%	2.357	2.455	4.16

Cədvəl 2

№	Ələk analizi kombinasiyası yol əsasının alt qatı (Subbase) (ASTM D1241-00)	Ələk analizi kombinasiyası yol əsası (Base) (ASTM D1241-00)	95 % kipləşmədə Kaliforniya Yük Götürmə Nisbəti/Şişmə % (AASHTO T193)	95 % kipləşmədə öncədən yol yapışdırıcısı ilə qarışdırılmış nümunənin Kaliforniya Yük Götürmə Nisbəti/Şişmə % (AASHTO T193)	Maksimum quru sıxlıq/Optimum rütubətin təyini (AASHTO T180) (q/sm ³)(%)
1	Limit çərçivəsində	Limit çərçivəsində	36.0/0.00	241.0/0.00	1.973/7.2
2	Limit çərçivəsində	Limit çərçivəsində	45.0/0.00	241.0/0.00	1.705/6.9

Söküntü betonlarının kimyəvi tərkibinin analizi göstərdi ki, onun oksid tərkibi sement istehsalında tətbiq olunan xammal qarışığının tərkibinə yaxındır. Bunu nəzərə alaraq Avstriyanın Mannersdorf sement zavodunda xammal komponenti kimi 60 %-ə qədər söküntü betonundan istifadə edirlər. Bu da təbii resurslara (əhəng daşına) qənaət etməklə bərabər ətraf mühitə yayılan karbon emissiyasını xeyli dərəcədə aşağı salır. Bu təcrübənin Respublikada tətbiqi ekoloji tarazlığı yaratmaq istiqamətində çox vacib məsələlərdən biri hesab olunur.

Ağdam şəhərinə səfər zamanı təqribən 700 hektar ərazidə dağıdılmış binalar müşahidə edilmişdir. Beton panellərdən tikilmiş bir beşmərtəbəli bina və bir sənaye binası istisna olmaqla əsasən qarışıq materiallardan, çay və əhəngdaşından tikilmiş təxminən 8000-dən çox dağıdılmış bir və ya iki mərtəbəli evlər mövcuddur. Söküntülərdən əldə edilməsi gözlənilən materialların həcmi təqribən 700000 m³-ə yaxın olar. İlk müşahidələrə və təhlillərə əsasən söküntülərdən alınan bütün materiallar beton qarışıqları, yolun alt qatları və dolğular üçün dənəvər materialların istehsalı üçün daşqırınlarda xırdalanaraq müvafiq fraksiyalara ayrılabilir.

Ağdam şəhərindən gətirilmiş nümunələr Holcim şirkətinin laboratoriyasında xırdalandıqdan sonra iki partiyaya ayrılmışdır. Birincisi doğranmış, fraksiyalara ayrılmış əhəngdaşı və çay yatağı daşlarının qarışığı, ikincisi isə betonun xırdalanaraq fraksiyalara ayrılmış təkrar emal qırımaşları. Hər iki partiya üzərində tədqiqat Holcim şirkətinin beton və tikinti materiallarının sınağı laboratoriyasında aparılmışdır. Sınaq nəticələri cədvəl 1 və 2-də verilmişdir. Göründüyü kimi, hər iki nümunə plastik olmayıb, su hopmaları 4.58 % və 4.16 %

təşkil edir. Los-Anjeles testinə görə ikinci nümunə birinciyə nisbətən daha möhkəmdir. İkinci nümunənin xüsusi çəkiləri də birinci nümunədən yüksəkdir. Bu onu göstərir ki, ikinci nümunəni beton istehsalında doldurucu kimi istifadə etmək olar. Hər iki nümunə ələk analizinin nəticələrinə görə yol əsasının alt qatına qoyulan tələbləri ödəyir. Bundan başqa hər iki nümunənin Kaliforniya yükəgötürmə nisbəti 95 % kipləşmədən sonra standartların tələbləri çərçivəsindədir.

Tədqiqat nəticələri göstərdi ki, birinci partiya doğranmış, fraksiyalara ayrılmış əhəngdaşı və çay yatağı daşlarının qarışığı yol tikintisi zamanı yol örtüyünün alt qatlarında və ya xüsusi hidravlik yol yapışdırıcılarının tətbiqi ilə yol geyiminin üst qatlarında istifadə edilə bilər [17].

İkinci partiya betonun xırdalanaraq fraksiyalara ayrılmış təkrar emal qırımaşları beton istehsalında müvəffəqiyyətlə tətbiq oluna bilər.

Nəticə

Tədqiqat işində aşağı karbonlu eko-səmərəli termoaktivləşdirilmiş təkrar emal edilmiş sementin istehsalı ilə bağlı ən aktual tədqiqatlardan bəziləri və əsas problemlər müzakirə edilmişdir. Təkrar emal edilmiş sementin dünya miqyasında əmələ gələn böyük miqdarda beton tullantılarının səmərəli şəkildə təkrar istifadəsi və ilk dəfə söküntü betonun istehsalı üçün həqiqətən dairəvi iqtisadiyyata doğru böyük potensiala malik olduğu göstərilir. Müəyyən edilmişdir ki, aşağı markalı portlandsement (32.5) ilə müqayisə edilə bilən təkrar emal edilmiş sement əldə edilə bilər və hətta onların yüksək su/sement nisbətləri nəzərə alınmaqla belə, 20 MPa-dan yuxarı 28 günlük sıxıl-

mada möhkəmlik həddi asanlıqla əldə edilə bilər. Həll olunmalı əsas problemlər TES-in yüksək suya tələbatı və qeyri-standart tutma vaxtlarıdır. TES 40 %-ə qədər əlavə material kimi istifadə edilərsə, bu problem həll edilir. Bundan əlavə, istilik emal prosesinin optimallaşdırılması, betonun tərkib hissələrinə effektiv ayrılması, dehidratasiya və hidratasiya prosesinin daha dərinə başa düşülməsi, həmçinin təkrar emal edilmiş sement əsaslı materialların fiziki, mexaniki xassələri ilə bağlı digər məsələlər də həll edilməlidir. Bununla belə, əlavə tədqiqatlara ehtiyac olsa da, sement sənayesinin yol xəritəsinin çox ciddi ekoloji məqsədlərinə cavab verə bilən daha eko-səmərəli təkrar emal edilmiş yapışdırıcı ilə irəliləyən doğru əhəmiyyətli bir

addım artıq atılmışdır. Məqsəd, resursların daha səmərəli istifadəsini, tullantıların utilitizasiyası problemini, beton sənayesini perspektivli karbon emissiyası az olan yapışdırıcı ilə təmin etməkdir.

Dünyada ən çox istifadə olunan tikinti materialı kimi beton əhəmiyyətli dərəcədə xammalın çıxarılması, istixana qazlarının emissiyası, külli miqdarda TES-in əmələ gəlməsi ilə əlaqədar olaraq ətraf mühit üçün ciddi problemə çevrilir.

Aparılmış tədqiqatlar göstərdi ki, tikinti sənayesində təbii resurslara qənaət, əhəmiyyətli dərəcədə istixana qazlarının emissiyalarının azaldılmasını təmin etmək üçün külli miqdarda yaranmış tikinti və söküntü tullantılarının səmərəli utilitizasiyası təmin edilməlidir.

Ədəbiyyat siyahısı

1. Real S, Carriço A, Bogas JA, Guedes M. Influence of the treatment temperature on the microstructure and hydration behavior of thermoactivated recycled cement. *Materials* (Basel) 2020;13. <https://doi.org/10.3390/ma.13183937>
2. European Union. Directive 2018/851 amending Directive 2008/98/EC on waste Framework. *Off J Eur Union* 2018;L-150/109-140
3. Schneider M, Romer M, Tschudin M, Bolio H. Sustainable cement production-present and future. *Cem Concr Res* 2011;41:642-650. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.019>
4. WBCS, IEA. Cement Technology Roadmap 2009: Carbon emissions reductions up to 2050. 2009
5. Kajaste R, Hurme M. Cement industry greenhouse gas emissions – management options and abatement cost. *J Clean Prod* 2016; 112:4041-4052. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.055>
6. Ефименко А.З. Бетонные отходы – сырье для производства эффективных строительных материалов // *Материалы. Технологии бетонов*, 2014, № 2, с. 17-21.
7. Селиверстова А.В. Исследование процесса проведения демонтажа промышленных сооружений и технологий разрушения строительных конструкций с целью повышения эффективности переработки и утилизации железобетонных демонтированных изделий // *Технические науки*. 2016, № 4, с. 107-110.
8. Курочка П.Н., Мирзалиев Р.Р. Бетоны с заполнителем из продуктов дробления вторичного бетона // *Вестник РГУПС*, 2012, № 3, с. 140-147.
9. Chen W, Jin R, Xu Y, Wanatowski D, Li B, Yan L et al. Adopting recycled aggregates as sustainable construction materials: A review of the scientific literature. *Constr Build Mater* 2019;218:483-496. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.130>
10. Gartner E, Hirao H. A review of alternative approaches to the reduction of CO₂ emissions associated with the manufacture of the binder phase in concrete. *Cem Concr Res* 2015;78. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.04.012>
11. Mineral Products Association. MPA 2050 strategy Plan 2013:1-6. <http://cement.mineralproducts.org>
12. IEA, WBCSD. Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry. 2018. https://doi.org/10.1007/1-4020-0612-8_961
13. Carriço A., Bogas JA, Guedes M. Thermo-activated cementitious materials - a review. *Constr Build Mater* 2020;250:118873. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118873>
14. Serpell R., Lopez M. Reactivated cementitious materials from hydrated cement paste wastes. *Cem Concr Compos* 2013;39:104-114. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.020>
15. He Z, Zhu X, Wang J, Mu M, Wang Y. Comparison of CO₂ emissions from OPC and recycled cement production. *Constr Build Mater* 2019;211:965-973. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.289>
16. Splittgerber F, Mueller A. Inversion of the Cement Hydration As a New Method for Identification and/or Recycling? 11th Int. Congr. Chem. Cem., 2003, pp. 1282-91. <https://doi.org/10.13140/2.1.2201.3766>
17. Романенко И.И., Романенко М.И. Вторичное использование в дорожном строительстве щебня, полученного из дробленого бетона // *Науковедение*, 2015, № 1, с. 1-12.

References

1. Real S, Carriço A, Bogas JA, Guedes M. Influence of the treatment temperature on the microstructure and hydration behavior of thermo-activated recycled cement. *Materials (Basel)* 2020;13. <https://doi.org/10.3390/ma.13183937>
2. European Union. Directive 2018/851 amending Directive 2008/98/EC on waste Framework. *Off J Eur Union* 2018:L-150/109-140
3. Schneider M, Romer M, Tschudin M, Bolio H. Sustainable cement production-present and future. *Cem Concr Res* 2011;41:642-650. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.019>
4. WBCS, IEA. Cement Technology Roadmap 2009: Carbon emissions reductions up to 2050. 2009
5. Kajaste R, Hurme M. Cement industry greenhouse gas emissions – management options and abatement cost. *J Clean Prod* 2016; 112:4041-4052. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.055>
6. Yefimenko A.Z. Betonnye otkhody – sir'yo dlya proizvodstva effektivnykh stroitel'nykh materialov // *Materialy. Tekhnologii betonov*, 2014, No 2, s. 17-21.
7. Seliverstova A.V. Issledovanie protsessa provedeniya demontazha promyshlennykh sooruzheniy i tekhnologiy razrusheniya stroitel'nykh konstruksiy s tsel'yu povysheniya effektivnosti pererabotki i utilizatsii zhelezobetonnykh demontirovannykh izdeliy // *Tekhnicheskie nauki*, 2016, No 4, s. 107-110.
8. Kurochka P.N., Mirzaliyev R.R. Betony s zapolnitelem iz produktov drobleniya vtorichnogo betona // *Vestnik RGUPS*, 2012, No 3, s. 140-147.
9. Chen W, Jin R, Xu Y, Wanatowski D, Li B, Yan L et al. Adopting recycled aggregates as sustainable construction materials: A review of the scientific literature. *Constr. Build Mater.* 2019; 218:483-496. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.130>
10. Gartner E, Hirao H. A review of alternative approaches to the reduction of CO₂ emissions associated with the manufacture of the binder phase in concrete. *Cem. Concr. Res.* 2015;78. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.04.012>
11. Mineral Products Association. MPA 2050 strategy Plan 2013:1-6. <http://cement.mineralproducts.org>
12. IEA, WBCSD. Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry. 2018. https://doi.org/10.1007/1-4020-0612-8_961
13. Carriço A., Bogas JA, Guedes M. Thermo-activated cementitious materials - a review. *Constr. Build Mater* 2020;250:118873. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118873>
14. Serpell R., Lopez M. Reactivated cementitious materials from hydrated cement paste wastes. *Cem Concr Compos* 2013;39:104-114. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.020>
15. He Z, Zhu X, Wang J, Mu M, Wang Y. Comparison of CO₂ emissions from OPC and recycled cement production. *Constr. Build Mater.* 2019; 211:965-973. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.289>
16. Splittergerber F, Mueller A. Inversion of the Cement Hydration As a New Method for Identification and/or Recycling? 11th Int. Congr. Chem. Cem., 2003, pp. 1282-91. <https://doi.org/10.13140/2.1.2201.3766>
17. Romanenko I.I., Romanenko M.I. Vtorichnoe ispol'zovanie v dorozhnom stroitel'stve shchebnya poluchennogo iz droblennogo betona // *Naukovedenie*, 2015, No 1, s. 1-12.