

УДК 624.073

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.010721.101.772

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ ПЕРЕКРИТТЯ НА ЕТАПІ ЗВЕДЕННЯ СПОРУД

САВИЦЬКИЙ М. В.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
НІКІФОРОВА Т. Д.², *докт. техн. наук, проф.*,
ФРОЛОВ М. О.^{3*}, *асп.*

¹ Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-02-98, e-mail: sav15@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-4515-2457

² Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-02-98, e-mail: nikiforova.tetiana@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-0688-2759

^{3*} Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-02-98, e-mail : templatar1995@gmail.com

Анотація. *Постановка проблеми.* На сьогоднішній день у багатьох спорудах потрібні конструкції перекриття, що відповідають збільшеним вимогам витривалості, прогону, що покривається, і якості поверхні. Часто всім вимогам задовольняють сталезалізобетонні конструкції. Однак ця галузь незважаючи на тривалу історію успіху, все ще не до кінця вивчена, особливо неоднозначна поведінка конструкції на ранніх етапах будівництва. Через неможливість створення композитного перетину відразу виникають різні ефекти і складний напружено-деформований стан на ділянці часу між об'єднанням різних матеріалів у просторі та об'єднанням різних матеріалів у роботі. Так, етап зведення конструкції, до того як вона стала сталезалізобетонною, становить інтерес для повноцінного розуміння механіки роботи композитних перетинів. *Мета дослідження* – вивчення особливостей роботи СЗБК на етапі монтажу та експлуатації як композитної конструкції, що поєднує переваги і недоліки сталі та бетону. *В результаті досліджень* з'ясовано, що вивчення напружено-деформованого стану, обставин, що впливають як на стадії експлуатації, так і на стадії зведення, постає важливим завданням для подальшого розуміння роботи сталезалізобетону і збільшення його довговічності. Зокрема, в момент зведення виникає складний напружено-деформований стан, який може спричинити непередбачувані зміни форми. Цей стан нестабільний аж до включення в роботу бетонної полиці сталезалізобетонного перетину за допомогою твердіння бетону в районі анкерів і його подальшого включення в роботу. Ці питання потребують подальшого вивчення для кращого розуміння роботи бетону та сталі як цілісного композитного матеріалу на різних етапах життєвого циклу споруд.

Ключові слова: *напружено-деформований стан; залізобетон; великопрогонові конструкції; сталезалізобетон; перекриття споруд*

STRESS-DEFORMED STATE OF STEEL-REINFORCED CONCRETE STRUCTURES OF FLOORS AT THE STAGE OF ESTABLISHMENT OF STRUCTURES

SAVYTSKYI M.V.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
NIKIFOROVA T.D.², *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
FROLOV M.O.^{3*}, *Postgraduate Stud.*

¹ Department of Reinforced Concrete and Stone Constructions, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-02-98, e-mail: sav15@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-4515-2457

² Department of Reinforced Concrete and Stone Constructions, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-02-98, e-mail: nikiforova.tetiana@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-0688-2759

^{3*} Department of Reinforced Concrete and Stone Constructions, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-02-98, e-mail: templatar1995@gmail.com

Abstract. Formulation of the problem. Many structures today require floor structures to meet increased requirements for strength, span coverage and surface quality. Steelcrete structures often fit the bill. However, despite a long history of success, the industry is still not fully understood, in particular, the behavior of this structure in the early stages of construction is not unambiguous. Due to the impossibility of creating a composite section, various effects and a complex stress-strain state immediately arise in the time interval between the combination of different materials in space and the combination of different materials in the work. Thus, the stage of erection of a structure before it became reinforced concrete is of interest for a complete understanding of the mechanics of the work of composite sections. **The purpose of the study** is to investigate the features of the operation of the steelcrete sections at the stage of installation and operation, as a composite structure that combines the advantages and disadvantages of steel and concrete. **As a result** of the research, it was found that the study of the stress-strain state, which affects the circumstances, both at the operation stage and at the construction stage, is an important task for further understanding the work of reinforced concrete, and increasing its durability. In particular, at the time of erection, a complex stress-strain state occurs, which can lead to unpredictable changes in shape. This state is unstable up to the inclusion of the concrete shelf of the reinforced concrete section in the work due to the hardening of concrete in the area of the anchors and its subsequent inclusion in work. These issues require further study in order to better understand the work of concrete and steel as a single composite material at various stages of the life cycle of structures.

Keywords: *stress-strain state; reinforced concrete; large-span structures; steelcrete; floors*

Постановка проблеми. Сучасні конструкції вимагають сучасних рішень, одне з яких – сталезалізобетон – композитний матеріал, який об'єднує найкращі з властивостей металу і бетону, проте володіє і більшою частиною їх вразливостей.

Напружено-деформований стан (НДС) сталезалізобетонних конструкцій досі залишається не до кінця вивченим питанням з багатьох причин. Наслідки – відсутність повноцінних нормативних рекомендацій до застосування цього матеріалу. Особливий інтерес становить НДС композитного перетину на етапі зведення, тому що досі немає єдиної думки на цей рахунок. Так, етап зведення конструкції до того, як вона стала сталезалізобетонною, становить інтерес для повноцінного розуміння механіки роботи композитних перетинів.

Аналіз публікацій. Це питання досліджували багато видатних учених як за кордоном, так і в нашій країні. На території України основним ЗВО, що займається просуванням сталезалізобетону, вважається ПолтНТУ ім. Ю. Кондратюка, де питання напружено-деформованого стану сталезалізобетонних конструкцій (НДС СЗБК) вивчали В. О. Сіробаба [6], Д. В. Бібік [2] та ін. Інші вищі тожне відстають у дослідження цієї незвіданої галузі.

Мета досліджень – вивчення особливостей роботи СЗБК на етапі

монтажу та експлуатації, як композитної конструкції, що поєднує переваги і недоліки сталі і бетону.

Основний матеріал. Одна з недооцінених частин роботи сталезалізобетонних конструкцій – процес їх монтажу і набирання міцності. Зокрема, в цей момент відбувається не передбачена ні нормами, ні інженером зміна ваги бетонної суміші. Зокрема, для заливання монолітних перекриттів по профільованих настилах використовується самовирівнювальна бетонна суміш з високою рухливістю і вмістом води для збереження цієї рухливості.

У бетоні вода перебуває у зв'язаному і вільному стані. Зв'язана поділяється на механічно (в капілярах), хімічно (реакція цементу з водою) і адсорбційно (тонкі плівки на поверхні твердих частинок бетонної суміші) зв'язану, вільна ж міститься в порах і пустотах бетону і порівняно швидко випаровується.

Згідно з різними працями [9], швидкість випаровування води з бетонної суміші може досягати вагомих значень. Для розрахунку точних значень створено номограму (рис. 1). Відповідно, за великих площ бетонування, якими і є великопрогонові сталезалізобетонні конструкції, це може бути вагомою проблемою.

Так само, згідно з аналогічними дослідницькими роботами, отримані дані [1] повідомляють, що за первинного

водоцементного співвідношення від 0.47 до практично половину зв'язаної води. 0.52, за 30 років бетони втрачають

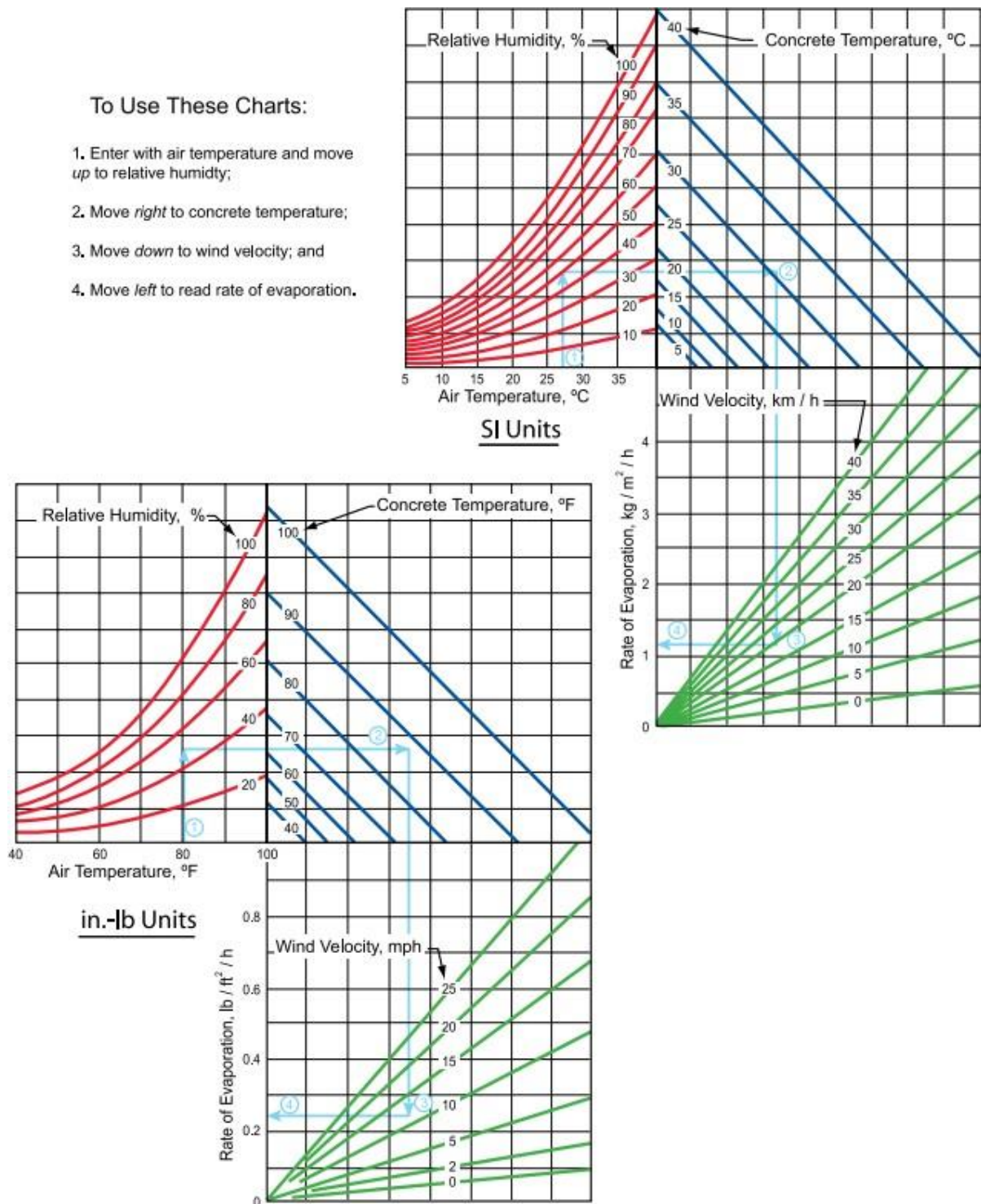


Рис. 1. Номограма для оцінювання швидкості випаровування води з бетонної поверхні : стрілки показують приклад для дня, коли температура навколишнього повітря становить 27 °С, відносна вологість – 50 %, температура бетону – 31 °С і швидкість вітру – 19 км/год.. Результуюча швидкість випаровування складас близько 1,2 кг /м²/год.

(Рисунок надала Асоціація Портландцементу)

Вигідно відрізняються від монолітів збірні плити, виготовлені на заводах, за рахунок якісного ущільнення, технологій висушування бетонів, що дозволяють прибрати більшу частину вільної води і зменшити кількість зв'язаної (зокрема, механічно зв'язаної – за температури вище 200 °С вона випаровується практично вся), і твердіння у вологому теплому приміщенні, забезпечуючи більш стабільну роботу збірних плит. Так само варто зазначити, що, згідно з експериментальними дослідженнями [3], під час твердіння бетонної суміші відбувається зменшення деформацій, за рахунок включення в роботу бетонної частини перерізу і перенесення нейтральної осі. Фактично відбувається певний зворотний вигин несних елементів перекриття.

Наразі аналіз жорстких дисків залізобетонних перекриттів демонструє перерозподіл значних моментів на краю балок [8] саме під час включення в роботу

жорсткого диска перекриття, як монолітного, так і по збірних залізобетонних плитах, що являє собою додаткове свідчення активного перерозподілу зусиль у сталезалізобетонних конструкціях.

Ця теорія перевірена та проаналізована таким методом: була взята модель балки з бетонною полицею, і за різних значень модуля Юнга бетонної полиці від 10 до проектних 30 000 МПа перевірена на деформації. Основні результати дослідження вказані в таблиці 1.

Відповідно, це означає, що монтажні деформації можуть виявитися вищими за розрахункові, адже на даному етапі бетонна частина конструкції ще не включається в роботу, а проектні деформації менші. Застосування збірних залізобетонних плит частково вирішує цю проблему, адже, по-перше, значно нижчими стають водовтрати бетону, а, по-друге, менший обсяг бетону швидше набирає міцність.

Таблиця 1

Таблиця вигинів та напружень у бетонній полиці від модуля Юнга, МПа

Модель	Модуль Юнга, МПа	% від макс E, МПа	Вигин, см	Нормальні напруження, МПа		
				опорне, в. пояс	опорне, н. пояс	пролітне, н. пояс
Моноліт	10	0,033	1,416	264,81	245,46	74,479
	50	0,167	1,325	251,62	242,31	73,553
	100	0,333	1,31	246,66	239,15	72,239
	500	1,667	1,165	198,46	223,81	66,555
	1 000	3,333	1,066	167,27	218,03	62,038
	5 000	16,670	0,72	68,496	184,05	48,562
	10 000	33,330	0,581	42,173	162,89	42,117
	15 000	50,000	0,506	28,403	148,88	38,145
	20 000	66,660	0,457	21,342	137,65	35,173
	25 000	83,330	0,422	16,758	130,12	33,439
	30 000	100,000	0,387	11,795	123,74	31,622
Плити	10	0,033	0,7246	107,46	131,46	55,876
	50	0,167	0,7242	106,23	129,82	55,983
	100	0,333	0,7266	105,66	128,46	56,276
	500	1,667	0,7224	101,77	133,39	56,374
	1 000	3,333	0,7178	99,017	129,47	56,111
	5 000	16,670	0,686	88,354	123,91	53,917
	10 000	33,330	0,659	80,965	120,33	51,889
	15 000	50,000	0,636	76,181	117,55	50,364
	20 000	66,660	0,617	71,978	115,26	49,141
	25 000	83,330	0,594	68,663	113,372	48,207
	30 000	100,000	0,576	65,348	111,49	47,273

Питання деформацій все ще не до кінця вивчене і загальне рішення не знайдене – так, одні норми [4] рекомендують в остаточному прогині враховувати дію усадки, а інші для визначення підсумкового прогину настійно проти врахування розвантажувального впливу усадки бетону [7].

Так чи інакше, початковий прогин від водонасиченої бетонної суміші, зворотний вигин і усадка спричиняють комплекс невідомих напружень у балці до моменту стабілізації бетону, яка настає, згідно з різними дослідженнями, приблизно через добу.

Інше важливе питання ПДВ СЗБК – це робота анкерів і перерозподіл зсувних зусиль. Згідно з висновками Є. В. Кондратюка [4], спільність роботи залізобетонної плити і сталевих балки сприяє перерозподілу значних і здебільшого невизначених зусиль.

Висновки. Напружено-деформований стан сталезалізобетонних великопрогонових конструкцій досі не вивчений досконально – існує величезна кількість умов, обсяги

впливу яких на конструкції так і не відомі, і лише кілька згадано в нашій статті.

Сталезалізобетон – це порівняно нова галузь, яка потребує ретельного вивчення і розуміння. Порушені питання лише частково стосуються проблем композитного матеріалу, і щодо них у наші дні немає єдиної думки. Вивчення напружено-деформованого стану як на стадії експлуатації, так і на стадії зведення – важливе завдання для подальшого розуміння роботи сталезалізобетону і збільшення його довговічності.

Зокрема, в момент зведення виникає складний напружено-деформований стан, який може спричинити непередбачувані зміни форми перекриття. Цей стан нестабільний аж до включення в роботу бетонної полиці сталезалізобетонного перетину за допомогою твердіння бетону в районі анкерів і його подальшого включення в роботу.

Проблема потребує подальшого вивчення для кращого розуміння роботи бетону та сталі як цілісного композитного матеріалу на різних етапах життєвого циклу споруд.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бродер Д. Л., Зайцев Л. Н., Комочков М. М., Мальков В. В., Сычен В. С. Бетон в защите ядерных установок. Москва : АТОМИЗДАТ, 1960. 216 с.
2. Бирик Д. В., Нестеренко Т. М., Магас Н. М., Лещенко В. В. Анализ напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций с внешним ленточным армированием. *Галузеве машинобудування, будівництво*. Полтава : ПолтНТУ, 2013. Вып. 4. С. 45–52.
3. Замалиев Ф.С. Напряженно-деформированное состояние сталежелезобетонной конструкции на этапе возведения. *Известия КазГАСУ*. Казань, 2011. Вып. 1. С. 18–25.
4. Кондратюк Е. В. Особенности конструирования и расчета сталежелезобетонных балок при свободном опирании плит. *Збірник наукових праць*. Київ : УкрНДПСК ім. В. М. Шимановського, 2013. Вып. 11. С. 34–38.
5. Перекрытия сталежелезобетонные с монолитной плитой СТО 0047. Москва : ЗАО ЦНИИПСК им. Мельникова, 2005. 138 с.
6. Сиробаба В. О. Несущая способность и деформативность сталежелезобетонных конструкций из легких бетонов : дис. канд. техн. наук : 05.23.01. Полтава, 2018. 156 с. URL : <https://pntu.edu.ua/uploads/files/0/main/page/specializovani-vcheni-radi/4405202/disertacii/2018-SirobabaVO.pdf>
7. Свод правил СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Москва : МинРегРаз РФ, 2011. 216 с.
8. Фролов М. О., Савицький М. В. Великопрольотні балкові клітки. Урахування жорсткого диска сталезалізобетонного перекриття. *Вісник ПДАБА*. № 4. 2019. С. 64–69.
9. Snell L., Radnaabazar K. Estimating evaporation rates to prevent plastic shrinkage cracking. *Concrete Q&A. Concrete international*. 2007. Вып. March 2007. Pp. 127–135. URL: https://www.sefindia.org/forum/files/Evaporation_rates_to_prevent_Plastic_shrinkage_cracking_322.pdf

REFERENCES

1. Broder D.L., Zaytsev L.N., Komochkov M.M., Mal'kov V.V. and Sychen V.S. *Beton v zashchite yadernykh ustanovok* [Concrete in the protection of nuclear installations]. Moscow : ATOMIZDAT Publ., 1960, 216 p. (in Russian).
2. Bibik D.V., Nesterenko T.M., Magas N.M. and Leshchenko V.V. *Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zhelezobetonnykh konstruksiy s vneshnim lentochnym armirovaniyem* [Analysis of the stress-strain state of reinforced concrete structures with external strip reinforcement]. *Galuzeve mashinobuduvannya, budivnitstvo* [Industry engineering, construction]. Vol. 4, Poltava : PolNTU Publ., 2013, pp. 45–52. (in Ukrainian).
3. Zamaliyev F.S. *Napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye stalezhelezobetonnoy konstruksii na etape vozvedeniya* [Stress-strain state of a steel-reinforced concrete structure at the construction stage]. *Izvestiya KazGASU* [News of KazGASU]. Vol. 1, Kazan`, 2011, pp. 18–25. (in Russian).
4. Kondratyuk Yev.V. *Osobennosti konstruirovaniya i rascheta stalezhelezobetonnykh balok pri svobodnom opiranii plit* [Features of the design and calculation of steel-reinforced concrete beams with free support of slabs]. *Zbírnik naukovikh prats'* [Collection of Science Works]. Vol. 11, Kyiv : UkrNDPÍSK ім. V.M. Shimanovs'kogo, 2013, pp. 34–38. (in Russian).
5. *Perekrytiya stalezhelezobetonnyye s monolitnoy plitoy STO 0047* [Steel-reinforced concrete slabs with a monolithic slab STO 0047]. Moscow : ZAO TsNINPSK im. Mel'nikova Publ., 2005, 138 p. (in Russian).
6. Sirobaba V.O. *Nesushchaya sposobnost' i deformativnost' stalezhelezobetonnykh konstruksiy iz legkikh betonov : dis. kand. tekhn. Nauk : 05.23.01* [Load-bearing capacity and deformability of steel-reinforced concrete structures made of lightweight concrete : PhD dissertation]. Poltava, 2018, 156 p. URL: <https://pntu.edu.ua/uploads/files/0/main/page/specializovani-vcheni-radi/4405202/disertacii/2018-SirobabaVO.pdf> (in Ukrainian).
7. *Svod pravil SP 35.13330.2011. Mosty i truby* [Code of rules SP 35.13330.2011. Bridges and pipes]. Moscow : MinRegRaz RF Publ., 2011, 216 p. (in Russian).
8. Frolov M.O., Savits'kiy M.V. Velikoprol'otní balkoví klítki. Urakhuvannya zhorstkogo diska stalezalizobetonного perekrittya. // *Vísnik PSACEA №4*, 2019, p.64-69
9. Snell L. and Radnaabazar K. Estimating evaporation rates to prevent plastic shrinkage cracking. *Concrete Q&A*. Concrete international. 2007. Vol. March, 2007, pp. 127–135. URL: [https://www.sefindia.org/forum/files/Evaporation rates to prevent Plastic shrinkage cracking 322.pdf](https://www.sefindia.org/forum/files/Evaporation%20rates%20to%20prevent%20Plastic%20shrinkage%20cracking%20322.pdf)

Надійшла до редакції : 04.06.2021.