

МЕТОДИ ВРАХУВАННЯ ПЕРЕРОЗПОДІЛУ ЗУСИЛЬ У НЕРОЗРІЗНИХ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛКАХ

Семко О.В.

Гудзь С.А.

Дарієнко В.В.

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

Постановка проблеми в загальному вигляді. Нерозрізні сталезалізобетонні балки, в яких сталеві балки об'єднано із залізобетонною плитою гнучкими анкерами (наприклад, системи Nelson), завдяки своїм перевагам набувають дедалі більшого розповсюдження в практиці будівництва мостів як прогонові будови, а також при будівництві каркасних будівель виробничого і цивільного призначення в ролі конструкцій перекриття і ригелів поперечної рами. Внаслідок зменшення жорсткості конструкції в зоні дії від'ємного згинального моменту на проміжній опорі через виключення з роботи розтягнутого бетону відбувається перерозподіл зусиль по довжині балки. Визначення діючого в небезпечних поперечних перерізах згинального моменту повинно відбуватись з урахуванням цього процесу, яке здійснюється в багатьох випадках досить наближено і умовно, що в кращому випадку призводить до перевитрат будівельних матеріалів, в гіршому – до небезпеки руйнування конструкції. Дані обставини спонукають проектувальників до пошуку точніших методів урахування перерозподілу зусиль, котрі через свою відносну складність не мають значного поширення при проведенні розрахунків, мало висвітлені в джерелах для практичного застосування і тому потребують детального розгляду і вдосконалення.

Аналіз останніх досягнень і публікацій, постановка завдання. Ефективність застосування сталезалізобетонних балок доведена в дослідженнях [1-6], але увага дослідників головним чином приділяється вивченню роботи однопролітних статично визначуваних сталезалізобетонних балок [1, 2, 3] і експериментальній оцінці ефективності конструкцій [4, 5, 6]. Тому метою даної роботи є виявлення особливостей поведінки під навантаженням і розрахунку нерозрізних сталезалізобетонних балок на основі теоретичних досліджень.

Виклад основного матеріалу. Пружний розрахунок внутрішніх зусиль допустимий для всіх поперечних перерізів. Для врахування перерозподілу зусиль використовують загальний метод розрахунку і два наближені методи [7]. При застосуванні загального методу потрібне подвійне визначення внутрішніх зусиль. На першому етапі визначаються внутрішні зусилля, що діють у з'єднаному поперечному перерізі без тріщин в бетоні, для характеристичної комбінації впливів (стан I). В області балки з від'ємним згинальним моментом довжиною $L_{ст}$, де крайове напруження в бетоні приймається рівним подвоєному значенню середньої міцності бетону на розтяг, на другому етапі призначається жорсткість при згині сталеві балки (стан II). З таким наближеним до дійсного розподілом жорсткостей проводиться нове визначення внутрішніх зусиль. Встановлення граничного напруження $\sigma_{ст}$ базується на численних порівняльних розрахунках, при яких розподілення внутрішніх зусиль нерозрізних балок відбувалось з урахуванням роботи бетону між тріщинами.

Загальний метод розрахунку (рис. 1) потрібно застосовувати для несних конструкцій, в яких утворення тріщин призводить до значного переміщення згинального моменту від прольоту до проміжної опори. Це конструкції з попереднім напруженням через планомірно задавані деформації та/або з частковим попереднім напруженням арматури, конструкції з пружними поперечними перерізами, в яких розподілення внутрішніх зусиль суттєво залежить від утворення тріщин в бетоні (наприклад, комбіновані системи зі сталезалізобетонними та чисто залізобетонними чи сталевими перерізами, нерозрізні балки із суттєво відмінними прольотами). Як альтернатива, вплив перерозподілу зусиль може бути врахований наближеними методами (рис. 1).

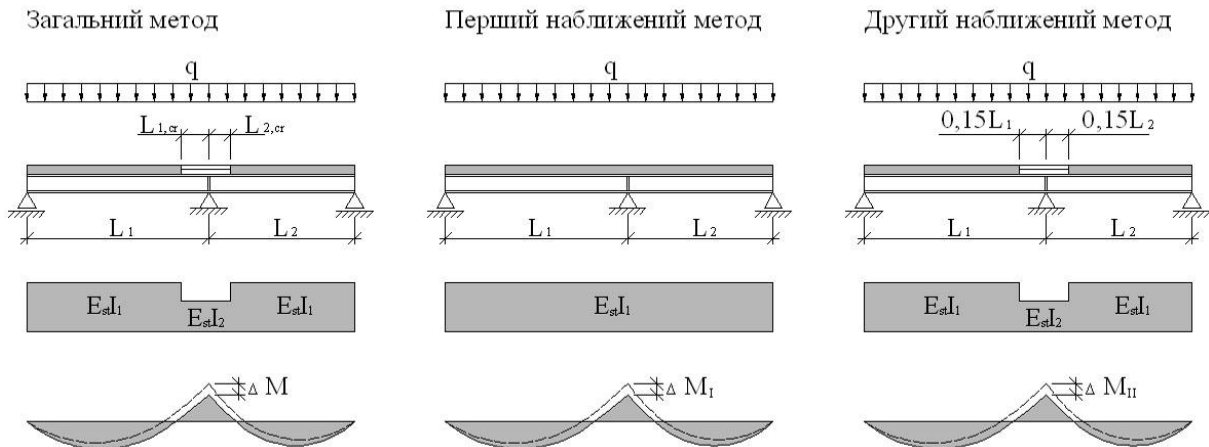
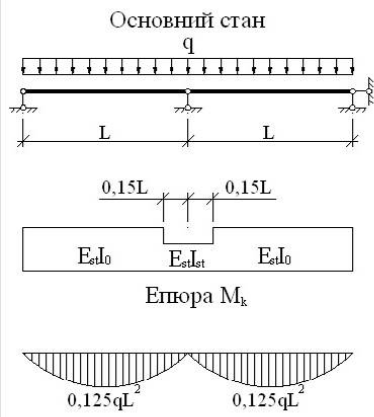


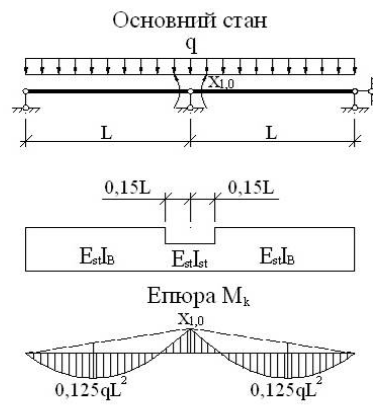
Рис. 1. Пружні методи врахування перерозподілу зусиль

При першому наближеному методі по всій довжині балки призначається жорсткість на згин з'єднаного поперечного перерізу без тріщин. Визначені таким чином згинальні моменти у з'єднаних балках зі сталим поперечним перерізом можуть бути переміщені в граничному стані залежно від класу поперечного перерізу з дотриманням умов рівноваги від опори до прольоту. При другому, найпоширенішому, наближеному методі (рис. 2, таблиця 1) вплив утворення тріщин в бетоні на розподілення згинального моменту враховується наближено введенням зменшеної жорсткості на згин в області проміжної опори. Довжина області балки з тріщинами в бетоні приймається рівною 15 % відповідного прольоту в кожную сторону від проміжної опори. При визначенні жорсткості приведенного перерізу потрібно підставляти відповідні моменти інерції (при врахуванні утворення тріщин – для короткочасних навантажень, при врахуванні повзучості й усадки – для постійних навантажень і усадки). Цей метод допускається застосовувати при відношенні сусідніх прольотів, яке задовольняє умову $L_{\min}/L_{\max} \geq 0,6$. При виборі наближеного методу слід враховувати, що хоча перший метод і не вимагає значних витрат на розрахунок, але для граничного стану придатності до застосування інколи потрібен точніший розрахунок з урахуванням утворення тріщин в бетоні. Подвійне визначення внутрішніх зусиль при застосуванні другого методу виключається.

Урахування утворення тріщин у розтягнутому бетоні



Урахування повзучості й усадки бетону



Перерозподіл згинального моменту

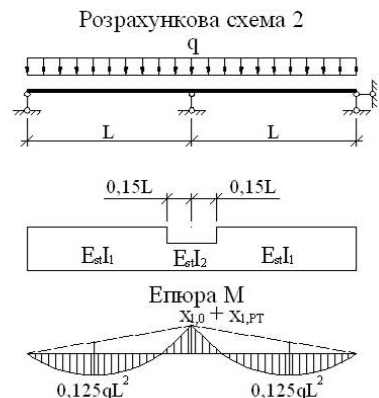
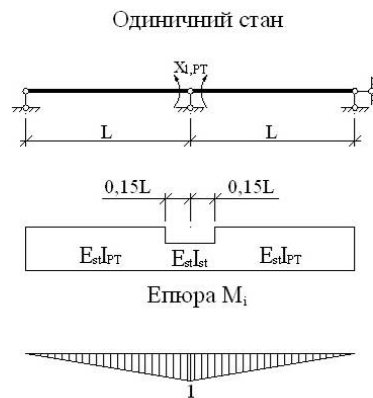
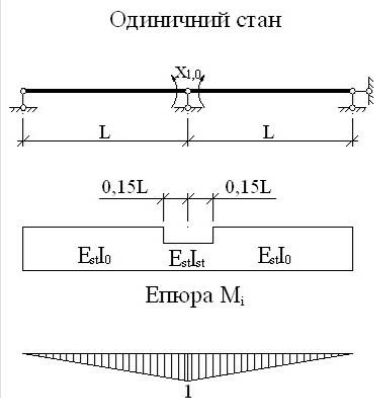
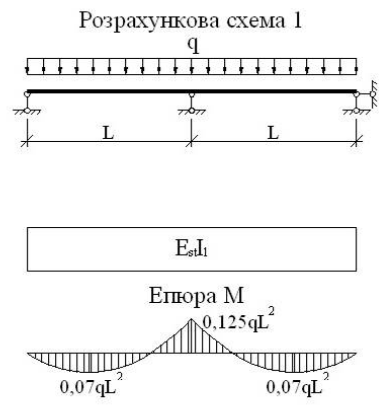


Рис. 2. Визначення внутрішніх зусиль у двопролітній нерозрізній сталезалізобетонній балці за другим наближенням методом

Таблиця 1 – Визначення згинального моменту, що діє на проміжній опорі

$x_{1,0} = \frac{\delta_{10}}{\delta_{11}}$	$\delta_{i,k} = \frac{1}{E_{st} I_0} \int M_i(x) M_k(x) dx = \frac{1}{E_{st} I_0} M_i M_k L c$			
Значення коефіцієнта c:				
	$0,294 + 0,039 \frac{I_0}{I_{st}}$	$0,230 + 0,020 \frac{I_0}{I_{st}}$	0,361	$0,204 + 0,129 \frac{I_0}{I_{st}}$

В граничному стані несної здатності встановлюються максимально допустимі переміщення згинального моменту, котрі враховують нелінійну поведінку матеріалів і утворення тріщин (при першому наближеному методі). Максимальні переміщення згинального моменту можуть бути застосовані для нерозрізних балок без небезпеки втрати стійкості при згині та крученні, для балок з порожнинами, заповненими бетоном, які мають достатньо сталу жорсткість поперечного перерізу.

Переміщення згинального моменту від впливу текучості сталеві балки здійснюється в балках, які завантажені переважно рівномірно розподіленим навантаженням. В цьому випадку пластична зона утворюється в області проміжної опори. У випадку значного зосередженого навантаження пластичні зони виникають майже одночасно в прольоті та на опорі, так що суттєвого переміщення згинального моменту в прольоті не відбувається. В нерозрізних сталезалізобетонних балках із сильно відмінними прольотами ($L_{\min}/L_{\max} < 0,6$) при пружних поперечних перерізах на проміжній опорі та при пластичних поперечних перерізах в прольоті несна здатність від дії згинального моменту використовується неповністю. В граничному стані несучої здатності через утворення зони текучості в прольоті відбуваються значні переміщення згинального моменту в напрямку проміжної опори балки. При нелінійному розрахунку, на відміну від пружного, максимальному моменту в прольоті відповідає більший момент на проміжній опорі. Тому для таких випадків у [7] встановлене обмеження максимального згинального моменту в прольоті на величину 0,9 від повністю пластичної несучої здатності балки за згинальним моментом.

Для балок з порожнинами, заповненими бетоном, внутрішні зусилля повинні бути визначені за другим наближеним методом. При цьому потрібно додатково враховувати вплив утворення тріщин в бетоні заповнення. Як показали випробування балок, ефективна жорсткість на згин в прольоті визначається як середнє значення жорсткостей на згин поперечних перерізів без тріщин і з тріщинами. Висота стиснутої зони в бетоні заповнення визначається наближено від положення пластичної нульової лінії. При дії від'ємного згинального моменту поперечні перерізи балок з порожнинами, заповненими бетоном через відсутність експериментальних даних стосовно стиснутого бетону заповнення не зараховуються до пластичних перерізів. Тому при визначенні несної здатності бетон заповнення не враховується.

Розрахунок внутрішніх зусиль в нерозрізних сталезалізобетонних балках за допомогою кінематичного методу граничної рівноваги (теорії пластичного шарніру) можливий лише при пластичних поперечних перерізах. Кінематичний метод граничної рівноваги ґрунтується на принципі можливих (віртуальних) переміщень Лагранжа, згідно з яким для системи, що перебуває в рівновазі, сума робіт усіх діючих на систему сил на можливих малих переміщеннях дорівнює нулю. Застосування методу граничної рівноваги можливе при певних передумовах з припущенням необмеженої обертальної здатності шарніру пластичності. При розрахунку потрібно забезпечувати, щоб наявна обмежена обертальна здатність завжди була більше обертальної здатності, потрібної для утворення шарніра пластичності, котра при нерозрізних балках залежить від виду навантаження, співвідношення прольотів і співвідношення моментів на опорі та в прольоті. Умови можна вважати виконаними, якщо в області пластичного шарніра наявні пластичні поперечні перерізи, а в інших – компактні поперечні перерізи, сталева балка має симетричний поперечний переріз і виключає відмову через втрату стійкості при згині та крученні.

В нерозрізних балках при дії рівномірно розподіленого навантаження перші пластичні шарніри утворюються зазвичай на проміжній опорі. В такому випадку обертальна здатність визначається не тільки місцевою стійкістю стиснутої частини сталевих перерізів, але і поведінкою розтягнутого бетонного поясу, тому для арматури повинна застосовуватись високопластична сталь. При значних зосереджених навантаженнях пластичні шарніри можуть виникати в прольоті. В цьому випадку обертальна здатність поперечного перерізу обмежується досягненням граничних деформацій в стиснутому бетонному поясі.

Для методу граничної рівноваги існують певні межі застосування. Це обмеження для співвідношення прольотів і для зосередженого навантаження. Згідно з [8] крайній проліт нерозрізної балки повинен бути меншим від збільшеного на 15 % проміжного прольоту, а максимальний проліт балки не повинен перевищувати мінімальний більше ніж у півтора рази. Якщо на 1/5 прольоту балки сконцентровано більше половини розрахункового навантаження, то відстань від крайнього волокна бетонного поясу до пластичної нульової лінії повинна становити не більше 15 % загальної висоти поперечного перерізу.

Пластичні згинальні моменти, що діють в прольоті, а також на проміжній опорі, для крайніх і проміжних прольотів нерозрізних балок, завантажених рівномірно розподіленим навантаженням, визначаються за допомогою принципу можливих переміщень. Використовуючи цей принцип, складають умови рівноваги для кінематично можливого механізму руйнування. Можливими механізмами руйнування в багатопрілітних балках є балкові механізми, обумовлені появою в проміжному прольоті трьох пластичних шарнірів, а в крайніх прольотах, які закінчуються шарнірною опорою, – двох (рис. 3).

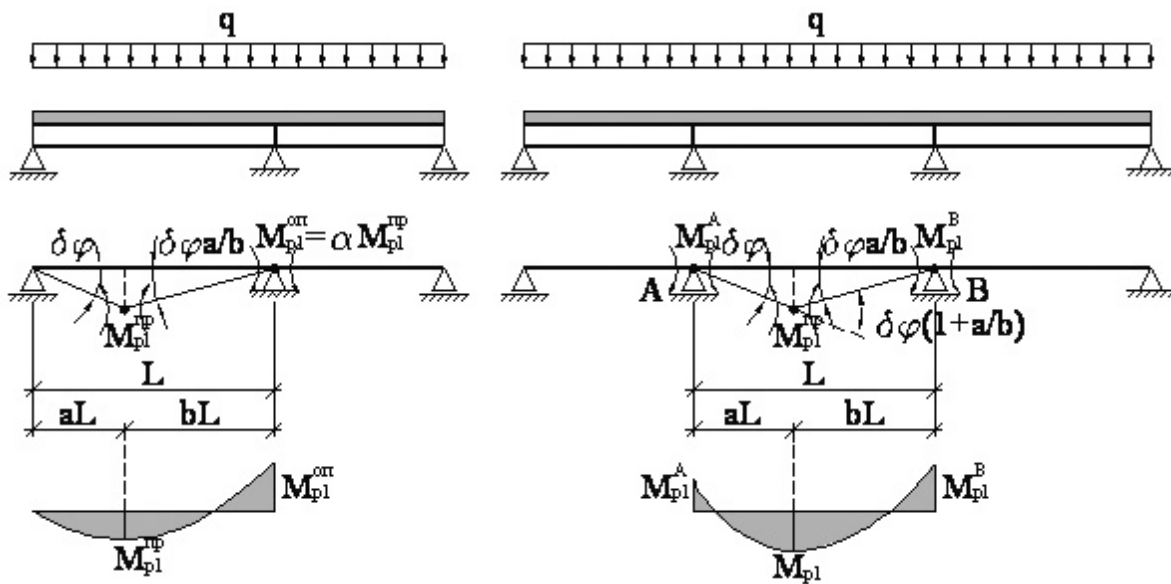


Рис. 3. Визначення внутрішніх зусиль у нерозрізних сталезалізобетонних балках за допомогою кінематичного методу граничної рівноваги

Для відшукування пластичного згинального моменту використовується умова рівності нулю суми елементарних можливих робіт внутрішніх і зовнішніх сил. Елементарна можлива робота внутрішніх сил для крайнього прольоту запишеться у вигляді:

$$\delta A_i = -M_{pl}^{np} \delta\varphi \left(1 + \frac{a}{b}\right) - \alpha M_{pl}^{np} \delta\varphi \frac{a}{b} = -M_{pl}^{np} \delta\varphi \frac{1 + \alpha a}{1 - a}, \quad (1)$$

де M_{pl}^{np} – внутрішній пластичний момент (несна здатність сталезалізобетонної балки) в прольоті;

$\alpha = M_{pl}^{on} / M_{pl}^{np}$ – коефіцієнт, який дорівнює співвідношенню внутрішніх згинальних моментів на опорі та в прольоті.

Вираз для елементарної можливої роботи зовнішніх сил матиме вигляд:

$$\delta A_o = qaL \frac{1}{2} \delta \varphi aL + qbL \frac{1}{2} \delta \varphi \frac{a}{b} bL = q \delta \varphi \frac{1}{2} aL^2, \quad (2)$$

де q – рівномірно розподілене навантаження.

З умови рівності нулю суми елементарних можливих робіт внутрішніх і зовнішніх сил ($\delta A_i + \delta A_o = 0$) знаходиться вираз для пластичного моменту, що діє в прольоті:

$$M_{pl,\delta}^{np} = qL^2 \frac{a - a^2}{2(1 + \alpha a)} = \frac{qL^2}{\mu}, \quad (3)$$

де $\mu = \frac{2(1 + \alpha a)}{a - a^2}$ – умовний коефіцієнт.

Вираз для пластичного моменту, що діє в проміжному прольоті, отримується аналогічно. Елементарна можлива робота внутрішніх сил для проміжного прольоту запишеться у вигляді:

$$\delta A_i = -M_{pl}^{np} \delta \varphi \left(1 + \frac{a}{b} + \alpha + \beta \frac{a}{b} \right), \quad (4)$$

де $\alpha = M_{pl}^A / M_{pl}^{np}$, $\beta = M_{pl}^B / M_{pl}^{np}$ – коефіцієнти, які дорівнюють співвідношенню внутрішніх згинальних моментів на відповідних опорах і в прольоті.

Пластичний момент, що діє в проміжному прольоті, визначатиметься за формулою:

$$M_{pl,\delta}^{np} = qL^2 \frac{a}{2 \left(1 + \alpha + \frac{a}{b} + \beta \frac{a}{b} \right)} = \frac{qL^2}{\mu}, \quad (5)$$

де $\mu = \frac{2 \left(1 + \alpha + \frac{a}{b} + \beta \frac{a}{b} \right)}{a}$ – умовний коефіцієнт.

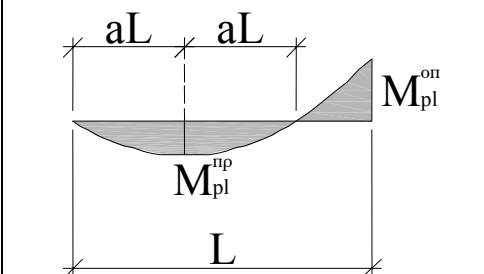
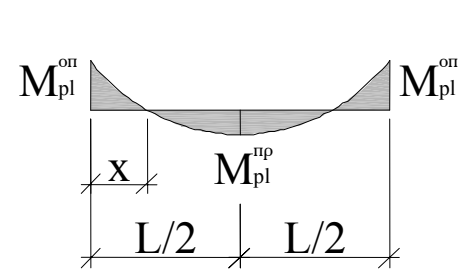
Положення пластичного шарніра в прольоті отримується з умови рівності нулю першої похідної від функції пластичного моменту:

$$a = -k \pm \sqrt{k^2 + k} < 1,0, \quad (6)$$

де $k = \frac{1}{\alpha}$ для крайнього прольоту; $k = \frac{1+\alpha}{\beta-\alpha}$ для середнього, якщо $\alpha = \beta$, то $a = 0,5$.

Коефіцієнти, необхідні для визначення пластичних моментів, що діють у крайньому і проміжному прольотах нерозрізної сталезалізобетонної балки, завантаженої рівномірно розподіленням навантаженням, зведені до таблиці 2.

Таблиця 2 – Визначення пластичних моментів, що діють у крайньому і проміжному прольотах нерозрізної балки, завантаженої рівномірно розподіленням навантаженням

				
$\alpha = \frac{M_{pl}^{on}}{M_{pl}^{np}}$	$M_{pl,\delta}^{np} = \frac{qL^2}{\mu}$		$M_{pl,\delta}^{on} = \alpha \frac{qL^2}{\mu}$	
	μ	a	μ	x_0/L
0,00	8,000	0,500	8,0	0,000
0,05	8,199	0,494	8,4	0,012
0,10	8,395	0,488	8,8	0,023
0,15	8,590	0,483	9,2	0,034
0,20	8,782	0,477	9,6	0,044
0,25	8,972	0,472	10,0	0,053
0,30	9,161	0,467	10,4	0,061
0,35	9,348	0,463	10,8	0,070
0,40	9,533	0,458	11,2	0,077
0,45	9,717	0,454	11,6	0,085
0,50	9,899	0,449	12,0	0,092
0,55	10,080	0,445	12,4	0,098
0,60	10,260	0,442	12,8	0,105
0,65	10,438	0,438	13,2	0,111
0,70	10,615	0,434	13,6	0,117
0,75	10,792	0,431	14,0	0,122
0,80	10,967	0,427	14,4	0,127
0,85	11,141	0,424	14,8	0,132
0,90	11,314	0,420	15,2	0,137
0,95	11,486	0,417	15,6	0,142
1,00	11,657	0,414	16,0	0,146

Висновки

Наведені методи врахування перерозподілу зусиль дозволяють точніше визначити найбільші згинальні моменти, що діють у небезпечних поперечних перерізах нерозрізної сталезалізобетонної балки, чим досягається економічний і надійний розрахунок конструкції.

Література

1. Хаютин И.Л. и др. Эффективность применения сталежелезобетонных балок в перекрытиях производственных зданий / Промышленное строительство, 1979. – № 5. – С. 7-9.
2. Фабрика Ю.М. Переваги використання сталезалізобетону на основі практики застосування / Збірник матеріалів конференції. – Львів, 1996. – С. 118-119.
3. Клименко Ф.С., Фабрика Ю.М., Шпиг Р.А. Характер розвитку деформацій в сталезалізобетонних балках, що працюють на згин /Зб. „Дороги і мости”, вип. 7, в 2-х т., т.1. – К.: ДерждорНДІ, 2007. – С. 230-237.
4. Семко О.В. Експериментальні дослідження сталезалізобетонних конструкцій / Будівельні конструкції. Зб. наук. праць. – К.:НДІБК, 2005. – Вип. 62. – С. 298-304.
5. Шагин А.Л., Избаш М.Ю., Шемет Р.Н. Экспериментальная оценка эффективности локального предварительного напряжения неразрезных сталежелезобетонных балок / Науковий вісник будівництва. – Вип. 35. – Харків: ХДТУБА ХОТВ АБУ, 2006. – С. 106-114.
6. Шагин А.Л., Избаш М.Ю., Шемет Р.Н. Оценка несущей способности двухпролетных сталежелезобетонных локально предварительно напряженных балок / Науковий вісник будівництва. – Вип. 38. – Харків: ХДТУБА ХОТВ АБУ, 2006. – С. 81-89.
7. prEN 1994-1-1: Eurocode 4 – Design of composite steel and concrete structures – Part 1.1: General rules and rules for Buildings, 2004.
8. Stahlbau Kalender 2005, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, Berlin, 2005.