

УДК 624.012.25

О.С. Чапюк

**ВПЛИВ ПОВТОРНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА МЕЖУ ЗЧЕПЛЕННЯ
АРМАТУРИ СЕРПОВИДНОГО ПРОФІЛЮ КЛАСУ А500 З БЕТОНОМ**

В статті О.С. Чапюка "Вплив повторних навантажень на межу зчеплення арматури серповидного профілю класу А500 з бетоном" досліджено залежність повторних навантажень різних рівнів на величину залишкового проковзування стержнів відносно бетону та напруження в арматурі у граничному стані.

Ключові слова: арматурний прокат серповидного профілю, зчеплення арматури з бетоном, напруження зчеплення, рівні навантаження, втомленість зчеплення.

Рис. 6. Табл. 2. Літ. 8.

А.С. Чапюк

**ВЛИЯНИЕ ПОВТОРНЫХ НАГРУЗОК НА ГРАНЬ СЦЕПЛЕНИЯ АРМАТУРЫ
СЕРПОВИДНОГО ПРОФИЛЯ КЛАССА А500 С БЕТОНОМ**

Аннотация: В статье А.С. Чапюка "Влияние повторных нагрузок на грань сцепления арматуры серповидного профиля класса А500 с бетоном" исследована зависимость повторных нагрузок различных уровней на величину остаточного проскальзывания стержней относительно бетона и напряжения в арматуре в предельном состоянии.

Ключевые слова: арматурный прокат серповидного профиля, сцепления арматуры с бетоном, напряжение сцепления, уровни нагрузки, усталость сцепления.

O.S. Chapiuk

**INFLUENCE OF REPEATED LOADINGS ON THE LIMIT OF ADHESION OF SICKLE-
SHAPED PROFILE CLASS A500 ARMATURE WITH CONCRETE**

Abstract: The article "Influence of repeated loadings on the limit of adhesion of sickle-shaped profile class A 500 armature with concrete" written by O.Chapiuk investigates the dependence of repeated loadings of various levels on the amount of residual slipping of rods relatively to concrete and tension in the armature in the boundary condition.

Keywords: reinforcing bars of sickle-shaped profile, adhesion of reinforcement with concrete, cohesive stress, levels of stress, tiredness of grip.

Зчеплення арматури з бетоном є визначальним фактором в забезпеченні їхньої спільної роботи в складі залізобетонних конструкцій. Теорія зчеплення арматури з бетоном розроблена в достатній мірі при дії короткочасних навантажень, виконано велику кількість експериментальних досліджень зчеплення бетону з арматурою кільцевого профілю класів А-II, А-III, А-IV та іншою, яка зараз не випускається і не застосовується при виготовленні залізобетонних конструкцій. Але відомо, що переважна більшість конструкцій піддається дії повторних навантажень, які можуть певним чином впливати на механічні характеристики матеріалів. Таким питанням присвячені тільки поодинокі дослідження [1, 2]. Наразі для залізобетону використовується прокат арматурний серповидного профілю [3, 4], зчеплення якого з бетоном мало досліджено, а при дії повторних навантажень майже не розглядалося.

З огляду на наведене, вивчення особливостей зчеплення з бетоном арматури серповидного профілю є важливою задачею, особливо це стосується впливу повторних навантажень різних рівнів на межу зчеплення арматурного прокату класу А500 та А500С (який можна зварювати) з бетоном.

В комплексі досліджень зчеплення з бетоном арматури серповидного профілю поставлене питання вивчалось при дослідженні зразків другої та п'ятої серій, які виготовляли у вигляді бетонних призм квадратного перерізу зі стороною 15 см і висотою призм $5d$, що рівне 8 см і центрально розташованої арматури діаметром 16 мм (табл. 1, рис. 1).

В позначенні зразків цифра перед буквою «П» (призма) означає номер серії, друга цифра – номер зразка, а третя - відносний рівень навантаження. Букви „к” і „п” вказують, що зразки випробувані відповідно короткочасним одноразовим і повторними навантаженнями.

Арматурні стержні розташовували в призмах таким чином, щоб їхні поздовжні осі співпадали, а виступаючі частини стержнів дозволяли з одного боку закріплювати їх в захваті преса, а з другого (вільного) - вимірювати переміщення (проковзування) відносно торця призм.

Таблиця 1. Об'єм експериментальних досліджень

Серія	Класс бетону	Діаметр стержнів, мм	Рівень навантаження	Кількість зразків, шт.	Марка зразків
2	С20/25	16	0,6	3	П-к1,2,3
			0,75		2П-0,6п-1,2,3
			0,9		2П-0,75п-1,2,3
5			0,98		2П-0,9п-1,2,3
			0,95		5П-0,98п-1,2,3
			0,93		5П-0,95п-1,2,3
			0,91		5П-0,93п-1,2,3
					5П-0,91п-1,2,3

Для дослідження вибрані стержні діаметром 16 мм ($\emptyset 16A500$), механічні характеристики яких визначали шляхом випробування на розтяг в розривній машині за стандартною методикою. Тимчасовий опір розриву стержнів склав $f_{tk} = 672,2$ МПа, умовна межа текучості - $f_{p0,2k} = 497,3$ МПа і модуль пружності - $E_s = 1,99 \times 10^5$ МПа.



Рис. 1. Загальний вигляд зразків

Бетон використовували проектного класу С20/25, механічні характеристики якого визначали шляхом випробування бетонних кубів з розміром ребер 15 см і призм з поперечним перерізом 15×15 см і висотою 60 см, які виготовлялися одночасно з виготовленням основних зразків. Характеристики бетону: кубкова міцність у віці 28 діб - $f_{ck} = 30,5$ МПа, призмova міцність у віці 57 діб (вік бетону на початку випробувань основних зразків) $f_{cd} = 21,3$ МПа. Випробування серії зразків виконували на протязі 15 діб, а тому можна вважати, що за цей час міцність бетону не змінювалася.



Рис. 2. Загальний вигляд випробування зразків

Дослідження зчеплення арматури з бетоном виконували шляхом висмикування (витягання) стержня з бетонної призми з використанням спеціального натяжного пристрою в розривній гідравлічній машині. Навантаження до стержня прикладали ступенями, рівними 2,0 кН. Під час навантажень вимірювали проковзування (переміщення) вільного кінця стержня відносно торця призми годинниковим індикатором з ціною поділки 0,001 мм (Рис. 2).

Призми 2П-к випробовували одноразовим навантаженням до руйнування, а призми 2П-0,6п, 2П-0,75п і 2П-0,9п піддавалися повторним десятикратним навантаженням до рівнів відповідно $\eta_{\text{сус}} = 0,6$, $\eta_{\text{сус}} = 0,75$, $\eta_{\text{сус}} = 0,9$ ($\eta_{\text{сус}} = P_{\text{сус}}/P_u$; P_u – граничне значення зусилля зчеплення; $P_{\text{сус}}$ – зусилля на циклах повторного навантаження). На одинадцятому циклі ці призми довантажувалися до граничного стану, коли повне проковзування складало $\delta_u = 0,2$ мм.

За граничний стан зчеплення арматури з бетоном згідно з Британським стандартом BS 4449:1997 прийнято стан, коли проковзування (переміщення) вільного кінця стержня відносно торця призми складає $\delta_u = 0,2$ мм.

Результати дослідів засвідчили достатню однорідність бетону в зразках - близнюках. В трьох зразках 2П-к значення $\delta_u = 0,2$ мм було досягнуто при напруженнях в стержнях відповідно $f_{s0} = 136,8$; 134,3; 134,3 МПа при середньому значенні $f_{s0m} = 135,1$ МПа (коефіцієнт мінливості $v = 0,0107$). В усіх трьох зразках проковзування почалося при значенні напруження $f_s = 9,95$ МПа і складало $\delta = 0,001$ мм.

Треба зазначити, що усі призми при збільшенні навантаження після досягнення $\delta_u = 0,2$ мм крихко руйнувалися, при цьому спостерігалось їхнє розколювання вздовж стержнів. Величина проковзування вільного кінця стержня в бетоні, рівна $\delta_u = 0,2$ мм, може бути прийнята за критерій визначення граничного стану зчеплення з бетоном арматури серповидного профілю.

На першому циклі в призмах 2П-0,6п середні (по трьом зразкам-близнюкам) зміщення арматури відносно бетону при максимальному рівні повторних навантажень ($f_s = 79,6$ МПа) становили 0,015 мм, а величина залишкового проковзування після першого циклу склала 0,003 мм (рис. 3). На другому циклі навантаження-розвантаження максимальне проковзування становило 0,017 мм, а залишкове збільшилися до 0,004 мм (23,5 % від максимального). В подальшому зі збільшенням циклів максимальне і залишкове проковзування дещо збільшувалися і після п'ятого циклу відбулася їхня стабілізація на рівні: максимальне проковзування склало 0,02 мм, а залишкове – 0,006 мм. На 11-му циклі зміщення вільного кінця стержня відносно торця призми на 0,2 мм відбулось при напруженні $f_{s0m} = 134,3$ МПа, при цьому ж навантаженні зразок зруйнувався.

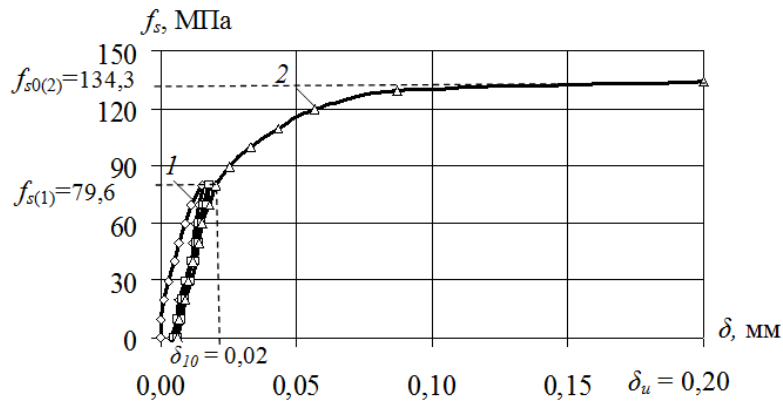


Рис. 3. Зміна проковзування стержня δ залежно від напруження f_s в призмах 2П-0,6п:
1 – перший цикл; 2 – одинадцятий цикл (в проміжку третій і сьомий цикли)

На першому циклі в зразках 2П-0,75п середні зміщення арматури відносно бетону при максимальному рівні повторних навантажень ($f_s = 99,45$ МПа) становили 0,019 мм, а величина залишкового проковзування після першого циклу склала 0,003 мм (рис. 4). На другому циклі навантаження-розвантаження максимальне проковзування становило 0,022 мм, а залишкове збільшилися до 0,005 мм.

В подальшому зі збільшенням циклів максимальне і залишкове проковзування збільшувалися всередньому на 0,001 мм з кожним циклом і після десятого циклу максимальне проковзування склало 0,033 мм, що на 6,5 % більше ніж в зразках 2П-0,6п, а залишкове – 0,010 мм.

На 11-му циклі зміщення вільного кінця стержня відносно торця призми на 0,2 мм відбулось при такому ж напруженні $f_{s0m} = 134,26$ МПа, як і в зразках 2П-0,6п.

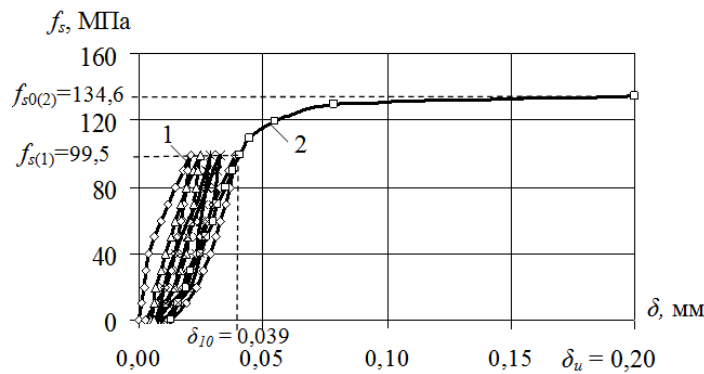


Рис. 4. Зміна проковзування стержня δ залежно від напруження f_s в призмах 2П-0,75п: 1 – перший цикл; 2 – одинадцятий цикл (в проміжку третій, п’ятий сьомий і десятий цикли)

На першому циклі в призмах 2П-0,9п середні зміщення арматури відносно бетону при максимальному рівні повторних навантажень ($f_s = 120,83$ МПа) становили 0,045 мм (22,5 % від руйнівного), а величина залишкового проковзування після першого циклу склала 0,024 мм (рис. 5). На другому циклі навантаження-розвантаження максимальне проковзування становило 0,055 мм, а залишкове збільшилося до 0,030 мм. В подальшому зі збільшенням циклів максимальне і залишкове проковзування збільшувалися значно інтенсивніше і після десятого циклу максимальне проковзування склало 0,096 мм, що на 38 % більше, ніж у зразках 2П-0,6п, а залишкове – 0,063 мм. На 11-му циклі зміщення вільного кінця стержня відносно торця призми на 0,2 мм відбулось при напруженні в стержнях $f_{s0m} = 134,76$ МПа, при цьому ж навантаженні зразок зруйнувався.

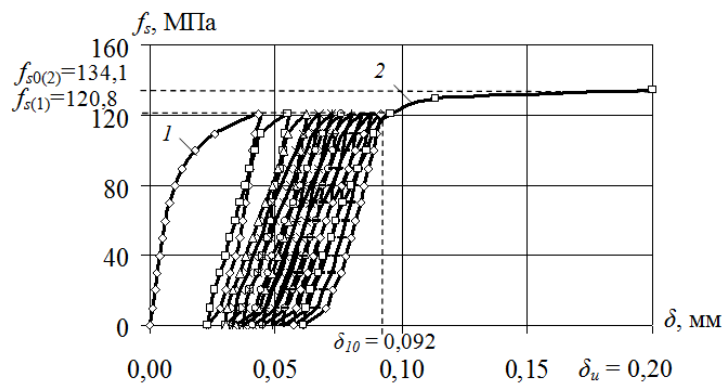


Рис. 5. Зміна проковзування стержня δ залежно від напруження f_s в призмах 2П-0,9п: 1 – перший цикл; 2 – одинадцятий цикл (в проміжку з другого по десятий цикли)

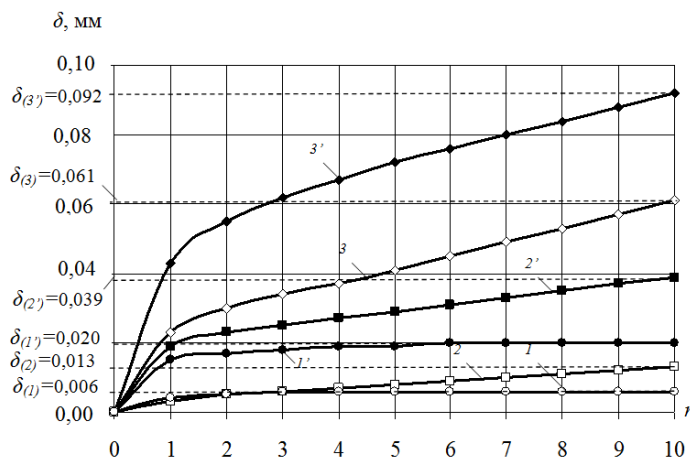


Рис. 6. Зміна проковзування стержня δ на циклах: 1, 2, 3 – залишкові, 1', 2', 3' – повні в зразках 2П-0,6п, 2П-0,75п і 2П-0,9п

Повторні навантаження до рівнів 0,6, 0,75 та 0,9 призводять до виникнення залишкового проковзування стержнів і практично не впливають на величину напружень в арматурі в граничному стані порівняно з одноразовим навантаженням (рис. 7).

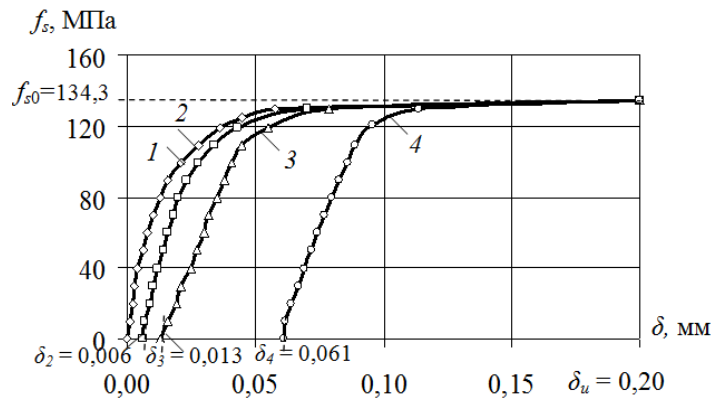


Рис. 7. Зміна проковзування стержня δ залежно від напруження σ_s в зразках 1 – 2П-к, 2 – 2П-0,6п, 3 – 2П-0,75п, 4 – 2П-0,9п на одинадцятих циклах

Зразки п'ятої серії піддавалися повторним навантаженням з відносним рівнем $\eta_{cyc} = f_{s,cyc}/f_{s0}$, який змінювався: 0,98, 0,95, 0,93, 0,91. Повторні навантаження прикладалися до тих пір, коли проковзування стержнів складало $\delta_{u,cyc} = 0,2$ мм.

Для чотирьох зразків (5П-0,98/1п ... 5П-0,98/4п) рівень повторних навантажень був прийнятий, рівним $\eta_{cyc} = 0,98$. Два зразки досягли граничного стану на другому циклі, два інших – відповідно на третьому і четвертому циклах. Таким чином, можна вважати, що при $\eta_{u,cyc} = 0,98$ для згаданих зразків наступила втомленість на 2 ... 4 циклах ($\eta_{u,cyc} = \eta_{cyc}$ на циклі руйнування). Взагалі малоциклова втомленість матеріалів визначається як їхня втомленість, за якої руйнування або пошкодження відбуваються при пружно-пластичному деформуванні [5, 6, 7]. Зважаючи на це, під малоцикловою втомленістю зчеплення арматури з бетоном будемо розуміти його втомлене порушення при пружно-пластичному проковзуванні арматурного стержня в бетоні. При зменшенні рівня повторних навантажень до $\eta_{u,cyc} = 0,95$ прогнозовано збільшилась кількість циклів до настання руйнування: два зразки зруйнувалися на третьому циклі і один на сьомому. Треба зазначити, що на циклах навантаження спостерігалось поступове збільшення залишкових деформацій проковзування, що свідчить про те, що втомленість наступила при пружно-пластичному проковзуванні арматурного стержня.

Таблиця 2. Результати експериментальних досліджень втомленості зчеплення бетону з арматурними стержнями

Марка зразків	$f_{u0,cyc}$, МПа	$\eta_{u,cyc}$	$\tau_{u0,cyc}$, МПа	$n_{u,cyc}$	$\eta_{u,cyc,th}$	$\frac{\eta_{u,cyc}}{\eta_{u,cyc,th}}$
5П-0,98/1п	131,6	0,98	6,58	2	0,989	0,991
5П-0,98/2п	131,6	0,98	6,58	2	0,989	0,991
5П-0,98/2п	131,6	0,98	6,58	3	0,979	1,001
5П-0,98/4п	131,6	0,98	6,58	4	0,971	1,009
5П-0,95/5п	127,5	0,95	6,38	3	0,979	0,970
5П-0,95/6п	127,5	0,95	6,38	3	0,979	0,970
5П-0,95/7п	127,5	0,95	6,38	7	0,954	0,996
5П-0,93/8п	124,8	0,93	6,24	9	0,945	0,983
5П-0,93/9п	124,8	0,93	6,24	10	0,942	0,987
5П-0,93/10п	124,8	0,93	6,24	12	0,936	0,993
5П-0,91/11п	122,4	0,91	6,12	35	0,906	1,006
5П-0,91/12п	122,4	0,91	6,12	41	0,903	1,009
5П-0,91/13п	122,4	0,91	6,12	44	0,903	1,010

В наступних зразках рівень повторних навантажень був зменшений до $\eta_{cyc} = 0,93$, що збільшило кількість циклів до втомленого руйнування порівняно з попередніми зразками (див. табл. 2). Зразки 5П-0,93/8п, 5П-0,93/9п і 5П-0,93/10п досягли граничного стану на дев'ятому, десятому і дванадцятому циклах. В усіх зразках до цього стану спостерігалось пружно-пластичне проковзування стержнів. В зразку 5П-0,93/10п [8], який зруйнувався на 12-му циклі, повне проковзування стержня на 10-му і 11-му циклах відповідно склало $\delta_{cyc} = 0,154$ і $0,162$ мм, що становить 77 і 81 % від граничного значення, яке було досягнуто на 12-му циклі. До останнього циклу також спостерігалось збільшення залишкового проковзування, яке на 11-му циклі склало 55% від максимального. При цьому тут проковзування збільшилося на $0,005$ мм, що значно менше, ніж в зразку 5П-0,95/7п, в якому на передостанньому циклі збільшення залишкового проковзування склало $0,027$ мм. Це свідчить про те, що подальший зменшений рівень повторних навантажень буде наближатися до межі малоциклової витривалості.

Для зразків 5П-0,91/11п, 5П-0,91/12п і 5П-0,91/13п рівень повторних навантажень був зменшений до $\eta_{cyc} = 0,91$ ($f_{s,cyc} = 122,4$ МПа). Це призвело до збільшення кількості циклів до настання втомленого руйнування: зразки витримали відповідно 35, 41 і 44 цикли. В зразку 5П-0,91/12п на перших п'яти циклах повне проковзування змінилося з $\delta_{cyc} = 0,049$ на першому до $\delta_{cyc} = 0,081$ на п'ятому. В подальшому проковзування поступово зростало і 20-го по 25-й цикл змінилося з $0,136$ до $0,151$. Тобто, на 25-тому циклі проковзування склало 75,5 % від граничного значення. З 35-го по 40-й цикл проковзування монотонно збільшувалося і на 40-му циклі склало $\delta_{cyc} = 0,199$, що практично рівне граничному, але зразок ще працював на 41-му циклі, на якому і зруйнувався (див. рис. 8).

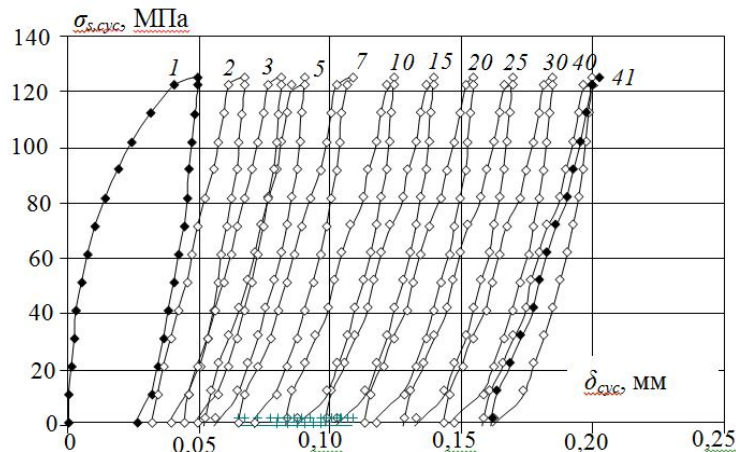


Рис. 8. Проковзування стержня при випробуваннях зразка 5П-0,91/12п (цифрами указані номери циклів)

Заслуговує на увагу аналіз залишкового проковзування стержня, яке після першого циклу навантаження склало $0,026$ мм, що становить 13 % від граничного значення $\delta_{u,cyc} = 0,2$ мм. Після 25-го циклу залишкове проковзування збільшилося до $0,117$ мм (58,5 % від граничного), а після 40-го — $0,159$ мм (79,5 % від граничного). Короточасні повні проковзування під час навантаження після першого циклу дещо зменшилися, а потім до 11-го циклу стабілізувалися і були сталими аж до руйнування. Але частка пластичного проковзування в таких деформаціях постійно збільшувалася.

Приріст залишкового проковзування зі збільшенням кількості циклів зменшувалася і на 38-му ... 40-ому циклах складав $0,003$ мм, що менше ніж в зразках з $\eta_{cyc} = 0,93$. Тобто, зразки з $\eta_{cyc} = 0,91$ досягали мало циклової втомленості, але вони вже були близькими до межі багатоциклової витривалості.

Аналізуючи результати, можна припустити, що межа малоциклової витривалості складе $\eta_{u,cyc} = 0,88 \dots 0,9$. Оскільки малоциклова втомленість настає за пружно-пластичного проковзування стержнів, певно, для уточнення значення $\eta_{u,cyc}$ необхідно провести дослід з бетонами різних класів, які б мали різні пружно-пластичні характеристики. Експериментально підтверджено, що при повторних навантаженнях до рівня $0,6$ стабілізація деформацій відбувається на п'ятому-шостому циклах, а при навантаженнях до рівня $0,75$ деформації помірно зростають на $0,001$ мм з кожним циклом.

1. Барашиков А.Я., Мурашко Л.А., Георгиев Г.Д. Методика экспериментальных исследований сил сцепления арматуры с керамзитобетоном при периодическом нагружении / Сопротивление предварительно напряженных элементов железобетонных конструкций с арматурой без сцепления с бетоном. – Владивосток, 1982. – С. 55-57.
2. Сайдахмедов А.Ш. Сцепление арматуры периодического профиля с бетоном при кратковременных малоцикловых нагрузках / Новые исследования в области бетонных и железобетонных конструкций. – Ташкент, 1985. – С. 80-84.
3. Прокат арматурний для залізобетонних конструкцій. Загальні технічні умови. ДСТУ 3760:2006 .- Київ: Держспоживстандарт України, 2007. – 28 с.
4. Худик Ю.Т., Рыбалка Е.М., Кекух А.В., Жильцов Н.П., Климов Ю.А. Производство и применение арматурного проката класса А500С / Будівельні конструкції: Збірник наукових праць. – Київ: НДІБК, 2003, - Випуск 59. – Книга 1. – С. 22-25.
5. ГОСТ 23207-78. Сопротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения.- Москва: Издательство стандартов, 1978. – 48 с.
6. Бабич Є.М., Крусь Ю.О. Бетонні і залізобетонні елементи в умовах малоциклових навантажень.- Рівне: Видавництво Рівненського державного технічного університету, 1999. – 119 с.
7. Бабич Є.М. Дослідження малоциклової втомленості зчеплення бетону з арматурою серповидного профілю / Чапюк О.С / Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць. – Рівне: НУВГП, 2008. – Випуск 17. – С. 105-113.
8. Чапюк О.С. Зчеплення арматури з арматурним прокатом серповидного профілю при короткочасних одноразових і повторних навантаженнях / Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: 05.23.01. – Луцьк: ЛНТУ, 2009. – 169 с.

Стаття надійшла до редакції 24.09.2013.