

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”**

ІЛЬЧУК НАТАЛІЯ ІЛІВНА

УДК 624.012.25:539.319

**ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ П-ПОДІБНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ РАМ
ПРИ КОРОТКОЧАСНИХ МАЛОЦИКЛОВИХ НАВАНТАЖЕННЯХ**

05.23.01 – Будівельні конструкції, будівлі та споруди

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

ЛЬВІВ – 2007

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Луцькому державному технічному університеті (ЛДТУ) Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник

- доктор технічних наук, професор
Бабич Євгеній Михайлович,
завідувач кафедри “Інженерні конструкції”
Національного університету водного
господарства та природокористування, (м. Рівне)

Офіційні опоненти:

- доктор технічних наук, професор
Барашиков Арнольд Якович,
завідувач кафедри “Залізобетонні
і кам’яні конструкції”,
Київський національний університет
будівництва і архітектури, (м. Київ)

- кандидат технічних наук, доцент
Добрянський Іван Михайлович,
завідувач кафедри “Будівельні конструкції”,
Львівський державний аграрний університет,
(м. Дубляни)

Провідна установа: Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка Міністерства освіти і науки України, кафедра “Залізобетонні і кам’яні конструкції”, м. Полтава.

Захист відбудеться “ 8 ” червня 2007р., о 15⁰⁰ годині, на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.17 при Національному університеті “ Львівська політехніка” за адресою: 79646, м. Львів, вул. С. Бандери, 12, головний корпус, к. 226.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету “Львівська політехніка” за адресою: 79646, Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий “4” травня 2007р.

Учений секретар спеціалізованої
вченої ради, к.т.н., доцент

П.Ф. Холод

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасне промислове та цивільне будівництво характеризується широким використанням залізобетонних конструкцій різної складності. При цьому одним з основних несучих елементів будівель і споруд є рамні конструкції. Залізобетонні рами широко використовуються в каркасах одноповерхових і багатоповерхових будинків. В сучасному будівництві спостерігається тенденція до розширення зведення будівель і споруд за індивідуальними проектами, в яких передбачається використання монолітних залізобетонних рам різної конструкції, в тому числі і П-подібних. Такі рами також використовуються для вбудованих приміщень на перших поверхах житлових будинків, при будівництві спортивних комплексів, виставкових павільйонів і залів, підземних переходів.

В процесі експлуатації на залізобетонні рами, як і на інші будівельні конструкції, діє комплекс зовнішніх навантажень та впливів. Серед цих навантажень переважну частину складають тимчасові короткочасні навантаження, які в реальних умовах експлуатації конструкцій періодично повторюються, тобто змінюються як у часі так і за своїм значенням. Відомо, що повторні малоциклові навантаження можуть впливати на міцнісні і деформаційні характеристики бетону і арматури, на несучу здатність, деформативність і тріщиностійкість залізобетонних конструкцій. Очевидно, що такі навантаження певним чином будуть впливати на роботу залізобетонних рам. Чинні нормативні документи проектування залізобетонних конструкцій не містять в собі методики урахування дії повторних малоциклових навантажень.

Експериментальних досліджень роботи залізобетонних рам навіть при дії одноразових короткочасних навантажень дуже обмежена кількість, а при повторних малоциклових навантаженнях зустрічаються тільки поодинокі дослідження, в які ставились до вирішення різні задачі і узагальнити які неможливо. В зв'язку з наведеним, накопичення експериментальних даних роботи залізобетонних рам при одноразових навантаженнях та встановлення особливостей їх роботи при повторних малоциклових навантаженнях є актуальною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Наукові дослідження виконувались згідно з тематикою науково-дослідних робіт, які проводяться на кафедрі промислового і цивільного будівництва Луцького державного технічного університету та згідно з технічним завданням на виконання теми: «Розробка теоретичних основ розрахунку міцності і напружено-деформованого стану залізобетонних рам при повторних навантаженнях» (номер державної реєстрації 0104U003121), яка включена в плани науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України і виконувалася в Національному університеті водного господарства і природокористування.

Мета і задачі досліджень. Метою дослідження є: встановити особливості роботи двохшарнірних П-подібних залізобетонних рам при дії короткочасних і повторних малоциклових

навантажень та удосконалити методику їх розрахунку з урахуванням зміни механічних характеристик матеріалів внаслідок повторних навантажень. Для досягнення мети в роботі передбачено вирішити такі задачі:

- на основі результатів власних експериментів та експериментів інших авторів віднайти математичну модель впливу повторних малоциклових навантажень експлуатаційних рівнів на призову міцність і початковий модуль пружності бетону;

- дослідити особливості перерозподілу зусиль в елементах рами при дії одноразових короткочасних та малоциклових повторних навантаженнях та встановити характер руйнування рам після дії таких навантажень:

- встановити вплив різних режимів малоциклових повторних навантажень на ширину розкриття тріщин та деформування рам;

- удосконалити методику визначення напружено-деформованого стану та міцності нормальних перерізів елементів рам, в тому числі з застосуванням деформаційної моделі;

- запропонувати методику розрахунку рам за деформаціями та ширині розкриття тріщин з урахуванням дії повторних малоциклових навантажень.

Об'єктом досліджень є залізобетонні двохшарнірні П-подібні рами, які сприймають одноразові короткочасні та повторні малоциклові навантаження.

Предмет дослідження: міцність та деформування бетону при повторному мало цикловому стисненню; перерозподіл зусиль в рамах; напружено-здеформований стан нормальних перерізів елементів рам; міцність і деформативність рам.

Методи досліджень: аналіз опублікованих наукових праць; експериментальні дослідження бетонних елементів і залізобетонних рам за спеціально розробленою методикою; використання сучасних перевірених практикою моделей; використання методів математичної статистики при обґрунтуванні запропонованих математичних моделей.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукова новизна виконаної дисертаційної роботи полягає в наступному:

- запропоновані експериментально і статистично обґрунтовані математичні моделі для визначення призової міцності і модуля пружнопластичності бетону з урахуванням дії повторних малоциклових навантажень експлуатаційних рівнів;

- отримані нові експериментальні дані про перерозподіл зусиль та напружено-здеформований стан перерізів елементів П-подібних залізобетонних рам. Підтверджено, що перерозподіл зусиль відбувається внаслідок тріщиноутворення в розтягнутій зоні бетону та розвитку пластичних деформацій в розтягнутій арматурі, і в бетоні стиснутої зони, коли він працює на низхідній ділянці діаграми деформування;

- встановлено, що повторні навантаження експлуатаційних рівнів призводять до збільшення деформацій стиснутого бетону і розтягнутої арматури, а також ширини розкриття тріщин і

прогинів ригелів, стабілізація значень яких наступає на п'ятому – сьомому циклах навантаження – розвантаження;

- встановлено, що довантаження рам в процесі повторних навантажень експлуатаційного рівня викликає додаткові залишкові деформації і збільшує їх повні значення;

- запропонована удосконалена методика визначення міцності і напружено-деформованого стану, деформацій рам та ширини розкриття тріщин з урахуванням дії повторних малоциклових навантажень.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблена методика розрахунку залізобетонних П-подібних двохшарнірних рам з урахуванням дії повторних малоциклових навантажень може бути використана в проєктній практиці, а матеріали досліджень – при викладанні для студентів і аспірантів дисциплін з залізобетонних конструкцій. Результати досліджень використані.

Особистий внесок здобувача.

- [1] аналіз деформування бетону при повторних навантаженнях, статистична обробка експериментальних даних власних дослідів та дослідів інших авторів;

- [2] методика визначення площі петлі гістерезису при повторних навантаженнях і розвантаженнях бетонних призм, визначення пружно-пластичних характеристик бетону при повторних розвантаженнях;

- [3] аналіз роботи рами 1Р-1, обчислення теоретичних значень згинальних моментів, складання висновків;

- [4] визначення теоретичних значень міцності елементів рами та порівняння їх з експериментальними даними;

- [5] аналіз перерозподілу зусиль в рамах 2Р-2 і 2Р-3, побудова графіків перерозподілу згинальних моментів, складання висновків;

- [6] аналіз зміни прогинів ригеля рам на циклах навантаження;

- [7] аналіз результатів випробовувань рам другої серії, побудова графіків залежностей згинальних моментів від рівня навантаження, складання висновків;

- [8] обробка експериментальних даних, аналіз ширини розкриття тріщин в рамах 1Р-1 і 1Р-4, складання висновків;

- [9] аналіз впливу можливих довантажень понад експлуатаційний рівень на розвиток прогинів ригеля рам

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень оприлюднені і схвалені на наступних конференціях і семінарах: Четвертій і п'ятій міжнародних науково-технічних конференціях «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі і споруди» (м. Рівне, 2003 р., 2006 р.); шостій науково-технічній конференції «Сталезалізобетонні конструкції: дослідження, проєктування, будівництво, експлуатація» (м. Кривий Ріг, 2004 р.); Четвертій всеукраїнській

науково-технічній конференції «Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону» (м. Суми, 2005 р.); Шостому міжнародному симпозиумі «Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій» (м. Ужгород, 2005 р.); науково-технічному семінарі «Структурообразование, прочность и разрушение композиционных строительных материалов и конструкций» (м. Одеса, 2005 р.); міжнародному науково-методичному міжвузівському семінарі «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь» (м. Могильов, 2005 р.); науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу і студентів Національного університету водного господарства та природокористування (м. Рівне, 2003 ... 2005 рр.); науково-технічних конференціях Луцького державного технічного університету (м. Луцьк, 2003 ... 2005 рр.); розширеному засіданні кафедри промислового та цивільного будівництва Луцького державного технічного університету (м. Луцьк, 2005р), розширеному засіданні кафедри міського будівництва та господарства Луцького державного технічного університету (м. Луцьк, 2007 р.).

Публікації. За матеріалами досліджень опубліковано 11 статей у фахових виданнях, дві з яких опубліковані одноосібно:

Структура та обсяг дисертації. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 131 найменування та трьох додатків. Загальний обсяг роботи становить 231 сторінку, зокрема: 173 сторінки основного тексту, 67 рисунків, 76 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **вступі** подана загальна характеристика дисертації, обґрунтована актуальність теми, викладені мета та задачі досліджень, наукова новизна та практична цінність роботи.

У **першому розділі** висвітлена область застосування двошарнірних П-подібних залізобетонних рам, існуючі методи їх розрахунку, зроблено огляд опублікованих результатів експериментальних досліджень двохшарнірних залізобетонних рам при короткочасних і повторних навантаженнях.

Відомі дослідження В.Х. Гленвіля і Ф.Д. Томаса, А.Є. Кузьмичова, А.С. Щепотьєва і В.С. Булгакова, дослідження, виконані під керівництвом А.Я.Барашикова. Аналізу роботи рам різних конструкцій присвячені роботи низки німецьких вчених. В їхніх роботах більш докладно аналізуються методи статичного розрахунку П-подібних і замкнутих рам та наведені деякі експериментальні дані.

Аналіз теоретичних і експериментальних досліджень дозволяють зробити такі висновки: залізобетонні рами широко використовуються в будівництві і можуть піддаватись в процесі експлуатації короткочасним малоцикловим навантаженням експлуатаційних рівнів (приблизно 60 % від руйнівного навантаження), а в окремих випадках на них можуть діяти короткочасні повторні

навантаження і більшого рівня; експериментально встановлено, що малоциклові короткочасні навантаження можуть по різному впливати на міцнісні і деформаційні характеристики бетону, але таких дослідів недостатньо, а аналітичних залежностей для врахування таких впливів не запропоновано; особливості роботи залізобетонних рам (перерозподіл зусиль, міцність, деформаційність, тріщиностійкість) при дії малоциклових короткочасних навантаженнях не досліджувалися, а рекомендації щодо розрахунку рам з врахування таких впливів відсутні.

Отже, вивчення роботи бетону і залізобетонних конструкцій при дії короткочасних малоциклових навантажень є важливим для удосконалення методів їх розрахунку і є актуальним.

З огляду на вище наведене в дисертаційній роботі сформульовані мета досліджень та задачі для її досягнення.

У **другому розділі** наведені обсяг та програма експериментальних досліджень, конструкція дослідних рам та механічні характеристики бетону та арматури. Для дослідження роботи залізобетонних рам було виготовлено дві серії зразків. В обох серіях монолітні рами мали П-подібну форму з такими розмірами в осях: прольот складав 200 см; висота – 60 см. Розміри поперечного перерізу стійок та ригеля прийняті однаковими і рівними 10 x 16 см (рис. 1). Прийняті розміри експериментальних рам уявляють собою моделі найбільш поширених реальних рам в житловому та промисловому будівництві.

Армування поперечних перерізів ригеля в прольоті і у вузлах обох серій рам прийнято однаковим, тобто передбачалась можливість перерозподілу зусиль під час навантаження рам. Ригелі армовано одним звареним каркасом з поздовжньою робочою арматурою $\varnothing 14\text{AIII}$ ($A_{sup} = A_{sp} = 1,539 \text{ см}^2$), а стійки – просторовими каркасами з симетрично розташованими чотирма стержнями $\varnothing 10\text{AIII}$ ($A_s = A_s' = 1,57 \text{ см}^2$). Віддаль між осями верхніх і нижніх стержнів складала 120 мм. Нижній стержень в ригелі заведено за внутрішні грані стійок на 7 см (п'ять діаметрів), а верхні стержні - за нульову точку епюри моментів на 45 см (більше, ніж на 30 діаметрів). Верхні стержні у вузлах ригеля закруглені і заведені в стійки за нижню грань ригеля на 7 см.

Поперечна арматура в стійках обох серій рам виконана у вигляді замкнених зварених рамок із стержнів $\varnothing 4\text{Bp-1}$, встановлених через 80 мм. В ригелях рам першої серії поперечна арматура влаштовувалась із стержнів $\varnothing 6\text{A-I}$ з кроком 60 мм. В ригелях рам другої серії, крім поперечних стержнів, які були передбачені для рам першої серії, встановлювали по чотири похилі стержні діаметром 6 мм класу А-1.

Програма та об'єм експериментальних досліджень

Номер серії	Вид зразків	Розмір зразків, см	Кількість зразків	Предмет досліджень

1	Рами: 1Р-1 1Р-2 1Р-3 1Р-4	L = 200 H = 60 (розміри в осях)	4	Перерозподіл зусиль, напружено-деформований стан, міцність, зміна прогинів при короткочасному одноразовому та повторному малоцикловому навантаженні різних режимів.
	Куби	15x15x15	9	Кубикова міцність бетону у віці 28 діб, на початку та в кінці випробувань рам.
	Призми 1П-1... 1П-6	15x15x60	6	Призмova міцність бетону, модуль пружнопластичності при одноразовому і повторному навантаженні на початку випробувань рам.
2	Рами: 2Р-1 2Р-2 2Р-3 2Р-4	L = 200 H = 60	4	Перерозподіл зусиль, напружено-деформований стан, міцність прогини, ширина розкриття тріщин при короткочасному одноразовому та повторному малоцикловому навантаженні різних режимів, вплив можливих довантажень.
	Куби	15x15x15	9	Кубикова міцність бетону у віці 28 діб, на початку та в кінці випробувань рам.
	Призми 1П-1... 1П-3	15x15x60	3	Призмova міцність бетону, модуль пружнопластичності при одноразовому навантаженні на початку випробувань рам.
3	Призми П –1,2,3 45П-1,2 60П-1,2 75П-1,2 80П-1,2,3	15x15x60	12	Вивчення впливу повторних навантажень на призмovu міцність та деформативність бетону.

Влаштування додаткових похилих стержнів в рамках другої серії обумовлено тим, що після повторних навантажень рам першої серії спостерігалось одночасне руйнування ригеля рам по нормальним і похилим перерізам. Як показали дослідження, в рамках другої серії руйнування по похилим перерізам не спостерігалось. В рамках другої серії також була збільшена довжина зони анкерівки верхньої арматури на 10 см.

Механічні характеристики бетону (кубкова і призмova міцності) при одноразовому короткочасному навантаженні визначались за стандартними методиками. У віці 28 діб кубкова міцність бетону зразків першої серії склала $R = 19,1$ МПа; призмova міцність у віці 126 діб перед початком випробовувань рам – $R_b = 14,53$ МПа, максимальні деформації при $\sigma_b = R_b$ $\varepsilon_{bR} = 165,4 \cdot 10^{-5}$, а для другої серії рам – відповідно середня кубкова міцність бетону у віці 28 діб - $R = 20,33$ МПа, призмova міцність у віці 138 діб $R_b = 14,91$ МПа; $\varepsilon_{bR} = 165,9 \cdot 10^{-5}$. Коефіцієнти мінливості при визначені міцності не перевищували 0,083.

За результатами експериментальних досліджень визначені механічні характеристики арматури: для стержнів діаметром 10 мм межа міцності $\sigma_u = 672,6$ МПа; межа текучості $\sigma_y = 552,8$ МПа; модуль пружності $E_s = 193000$ МПа; максимальні деформації арматури, які відповідають напруженням σ_y , $\varepsilon_{sR} = 286,5 \cdot 10^{-5}$. Для стержнів діаметром 14 мм ці характеристики склали: для першої серії рам - $\sigma_u = 747,2$ МПа; $\sigma_y = 666,0$ МПа; $E_s = 191700$ МПа; $\varepsilon_{sR} = 347,4 \cdot 10^{-5}$; для другої серії - $\sigma_u = 712,5$ МПа; $\sigma_y = 647,5$ МПа; $E_s = 198700$ МПа; $\varepsilon_{sR} = 325,9 \cdot 10^{-5}$.

Випробовування рам виконували за схемою двохшарнірної системи в спеціальній установці, змонтованій на базі пресу ПГ – 200, завантажуючи двома зосередженими силами ригель на віддалі 60 см від осі стійок. Зусилля створювали гідравлічним домкратом, а сили вимірювали протарованим кільцевим динамометром та контролювали показники манометрів насосної станції. Точність вимірювання навантаження становила 0,05 % (ціна поділки кільцевого динамометра – 0,4 кН). Роль жорсткої затяжки виконувала нижня опорна балка, яка складалась із 2 I № 40. Для розкриття статичної невизначеності рам вимірювали розпір за допомогою зразкового динамометра ДОСМ-3 (рис. 2). Навантаження рам здійснювалось ступенями, величина яких складала 8 – 10 % від руйнівного навантаження.

Рами першої серії випробовувались за такими режимами навантаження: рами 1Р-1 навантажувалась одноразово ступенями до руйнування; рама 1Р-2 піддавалась десятикратному повторному навантаженню до рівня $P_{cyc} = 0,65P_u$ (де P_{cyc} – навантаження в циклах; P_u – руйнівне навантаження, визначене за результатами випробування рами 1Р-1), а на одинадцятому циклі доведена до руйнування; рама 1Р-3 на протязі шести циклів повторно навантажувалась до рівня $0,65P_u$, на сьомому циклі була довантажена до $0,75P_u$, на восьмому, дев'ятому і десятому циклах також навантажувалася до рівня $0,65P_u$, а на одинадцятому циклі була зруйнована; рама 1Р-4 навантажувалась також як і рама 1Р-3, тільки на першому і восьмому циклах була довантажена до $0,85P_u$.

Рівень навантаження $P_{cyc} = 0,65 P_u$ імітував зміни навантаження в межах експлуатаційних значень, 0,75 і 0,85 – можливі довантаження в процесі експлуатації.

В другій серії дослідів рама 2P-1 випробовувалась одноразовим навантаженням до руйнування. За її результатами визначався рівень повторних навантажень для наступних рам. Рама 2P-2 піддавалася повторним короткочасним навантаженням, рівень яких складав 58 % від руйнівного ($\eta_{cyc} = P_{cyc} / P_u \approx 0,58$). Верхній рівень відносного навантаження вибраний таким, щоб найближче імітувати дію навантаження в процесі реальної експлуатації рам, а нижній рівень для всіх рам прийнятий рівним $\eta_{cyc} = 0,2$, що імітував навантаження від власної ваги конструкцій (постійне навантаження).

На раму 2P-2 навантаження повторювалось десять циклів з повним розвантаженням на третьому, шостому та дев'ятому циклі, а на десятому напівциклі вона була довантажена до руйнування. Рама 2P-3 піддавалася повторним короткочасним навантаженням, рівень яких складав приблизно 71 % від руйнівного. Як і рама 2P-2 рама 2P-3 повністю розвантажувалася після третього, шостого і дев'ятого циклів, а на десятому була зруйнована.

Рама 2P-4 піддавалася повторним короткочасним навантаженням, рівень яких складав 84 % від руйнівного. До дев'ятого цикла включно схема випробування рами 2P-4 відповідала попереднім рамам. На десятому циклі рама була довантажена до рівня 97 % від руйнівного навантаження. Після чого на одинадцятому напівциклі була зруйнована.

За руйнівне приймали навантаження, коли під силами або у вузлах деформації арматури або бетону досягали граничних значень.

Дослідження впливу короткочасного малоциклового стиску на механічні і деформаційні характеристики бетону висвітлені у **третьому розділі**.

Вплив малоциклових навантажень на міцнісні і деформаційні характеристики вивчали окремі дослідники (Барашиков А.Я., Крусь Ю.О., Кухнюк О.М., Погореляк А.П., Ставров Г.Н., Яковлев С.К. та інші) і робили окремі висновки, а узагальнення до цього часу не було. Статистична обробка результатів випробування зразків третьої серії та досліджень інших авторів (рис. 3) дає можливість запропонувати формулу для визначення призмової міцності бетону, який піддається короткочасному малоцикловому стисненню у вигляді

$$R_{b, cyc} = R_b (1 + 0,483 \eta_{cyc} - 0,556 \eta_{cyc}^2). \quad (1)$$

Середнє квадратичне відхилення відношення $R_{b, cyc}/R_b$ від середнього значення $R_{b, cyc}/R_b = 1,052$ складає 0,0423 при коефіцієнті мінливості 0,0402. Це свідчить про те, що формула (1) адекватно відображає експериментальні дані.

З формули (1) випливає, що малоциклова втома важкого бетону може бути прийнята, рівною 0,85, яка має статистичне підтвердження.

Результати досліджень роботи рам висвітлені в **четвертому розділі**. Основною метою досліджень рам було вивчення процесу перерозподілу зусиль при одноразовому та малоцикловому

повторному навантаженні, встановлення причин та характеру руйнування, зміна напружено-деформованого стану. Перші рами обох серій навантажувалися ступенево до руйнування. При навантаженні $P = 3,5$ кН, з виникненням перших тріщин, почався спостерігатись перерозподіл згинальних моментів з прольотного перерізу в перерізи, що примикають до вузлів рами. В подальшому перерозподіл зусиль спричиняли утворення нових тріщин та виникнення пластичних деформацій в бетоні. Так при $P = 22,5$ кН в бетоні стиснутої зони були досягнуті деформації $\varepsilon_b = 167,5 \cdot 10^{-5}$, тобто, дещо більше значення ε_{bR} . Після цього бетон стиснутої зони почав працювати на низхідній вітці діаграми деформування. Після $P = 32,5$ кН почали стрімко зростати деформації бетону і арматури у вузлових перерізах ригеля, що спричинило досягнення ними максимальних значень і, як наслідок, руйнування рам в цілому.

Треба зазначити, що деформації в арматурі не досягали своїх максимальних значень. Для стержнів діаметром 14 мм максимальні відносні деформації складають $\varepsilon_{sR} = 347,4 \cdot 10^{-5}$, але при $P = 35,0$ кН такі деформації досягли значень в прольоті ригеля $\varepsilon_{s,sp} = 257,17 \cdot 10^{-5}$ і у вузлах $\varepsilon_{s,sup} = 247,73 \cdot 10^{-5}$. В бетоні ж навпаки, при значенні максимальних деформацій $\varepsilon_{bR} = 165,4 \cdot 10^{-5}$ в експериментах при $P = 35$ кН зафіксовані деформації стиснутого бетону в прольотному перерізі $\varepsilon_{b,sp} = 314 \cdot 10^{-5}$ і у вузловому перерізі ригеля $\varepsilon_{b,sup} = 259,05 \cdot 10^{-5}$. Фактичні деформації в бетоні більші, ніж максимальні, але менші за граничні.

Заміряні значення розпору дозволили розкрити статичну невизначеність рами та обчислити значення згинальних моментів в прольотному і вузлових перерізах (рис. 4). За пружної роботи рам відношення прольотного моменту до опорного складає 1,36, а безпосередньо перед руйнуванням в рамі 1P-1 воно склало 1,06, тобто перерозподіл зусиль склав – 83%.

Рама 1P-1 зруйнувалася при навантаженні $P_u = 36,25$ кН, а рама 2P-1 при $P_u = 38,9$ кН. Рами зруйнувалися по нормальним перерізам в прольотах і вузлах, а безпосередньо перед руйнуванням в ригелі рам виникали незначні похилі тріщини.

Рами 1P-2, 1P-3 і 1P-4 піддавалися короткочасним малоцикловим навантаженням. Після розвантаження рам на першому циклі були зафіксовані залишкові розпори, які пояснюються неповним закриттям тріщин. Зі збільшенням циклів залишкові розпори поступово збільшувалися. В розвантаженому стані залишкові розпори спричинили виникнення від'ємних моментів в прольоті ригеля. Після десятого циклу такий момент досягав 5 ... 7% від максимального в циклах.

При повторних навантаженнях рами 1P-2 спостерігалось збільшення деформацій бетону і арматури до п'ятого циклу, після чого це збільшення припинялося. На протязі десяти циклів навантаження залишкові деформації в бетоні досягли $\varepsilon_{b,cyc,res} = 54,0 \cdot 10^{-5}$, але основна їхня кількість проявилися на перших трьох циклах. На одинадцятому циклі рама 1P-2 була довантажена до руйнування. При $P = 30,0$ кН почали суттєво зростати деформації бетону стиснутої зони та розтягнутої арматури в прольоті ($\varepsilon_b = 310,4 \cdot 10^{-5}$, $\varepsilon_s = 215,2 \cdot 10^{-5}$), біля лівого вузла в ригелі раптово утворилась похила тріщина, виникли ознаки порушення анкерування опорної арматури. Ригель

рами одночасно зруйнувався по нормальним і похилому перерізах при $P_u = 31,25$ кН. Несуча здатність рами 1P-2 виявилась на 10,7 % меншою, ніж рами 1P-1. Повторні навантаження сприяли більш повному перерозподілу зусиль (рис. 5).

В процесі експлуатації рам можливі довантаження, тобто, збільшення рівня навантаження порівняно з нормативним експлуатаційним (сейсмічні впливи, під час ремонтних робіт тощо). Цей випадок вивчався при випробуваннях рам 1P-3 і 1P-4. Оскільки стабілізація напружено-деформаційного стану рами 1P-2 настала після шостого циклу навантаження, рама 1P-3 шість циклів навантажувалась до рівня $P_{cyc} = 0,65P_u$, а на сьомому була довантажена до $P_{cyc} = 0,75P_u$.

Характер розвитку деформацій бетону стиснутої зони і розтягнутої арматури в прольоті ригеля до сьомого циклу мало чим відрізнявся від аналогічних деформацій в рамі 1P-2 оскільки на протязі шести циклів повторного навантаження відбулася стабілізація деформацій бетону і арматури, а також стабілізація розкриття тріщин і прогинів ригеля, рама на сьомому циклі була довантажена до $P_{cyc} = 27,5$ кН.

При довантаженні до $P_{cyc} = 27,5$ кН повні деформації бетону зросли до $\varepsilon_{b,sp,cyc} = 265,0 \cdot 10^{-5}$, а арматури – до $\varepsilon_{s,sp,cyc} = 242,0 \cdot 10^{-5}$. Тобто, в бетоні деформації перевищили свої максимальні значення ε_{bR} і він працював на низхідній ділянці діаграми деформування. Це призвело до збільшення залишкових деформацій в бетоні ($\varepsilon_{b,sp,res} = 72,0 \cdot 10^{-5}$). На восьмому – десятому циклах значення залишкових деформацій стабілізувалися і досягли $\varepsilon_{b,sp,res} = 79,5 \cdot 10^{-5}$. Тобто, можна вважати що відбулася повторна стабілізація деформацій бетону стиснутої зони ригеля. Аналогічні зміни деформацій спостерігалися і в арматурі, розташованій у вузлі ригеля. На одинадцятому циклі рама 1P-3 навантажувалась до руйнування. На цьому циклі при $P = 27,5$ кН повні деформації в бетоні досягли значень $\varepsilon_{b,sp} = 288,5 \cdot 10^{-5}$, а в арматурі - $\varepsilon_{s,sp} = 258,5 \cdot 10^{-5}$. Руйнування рами відбулося по нормальному прольотному перерізу і по похилому перерізу при $P_u = 28,75$ кН, також спостерігались ознаки порушення у вузлах зчеплення арматури з бетоном.

Вплив навантаження високого рівня на наступну роботу вивчався при випробуванні рами 1P-4, до якої на першому циклі було прикладене навантаження $P_{cyc} = 27,5$ кН. Після розвантаження на першому циклі в бетоні виникли значні залишкові деформації, які склали 32,8 % від максимальних в циклі. В рамах 1P-2 і 1P-3 такий відсоток відповідно складав 27,8 та 23,7 %. До сьомого циклу відбулася стабілізація залишкових деформацій, а на восьмому циклі після довантаження вони зросли до $\varepsilon_{b,sp,res} = 106,0 \cdot 10^{-5}$, що становить 40,0 % від максимальних деформацій на першому циклі. На дев'ятому – десятому циклах навантаження залишкові деформації стабілізувалися. Тобто, відбулася повторна стабілізація розвитку деформацій бетону стиснутої зони.

На одинадцятому циклі рама 1P-4 зруйнувалася при $P_u = 26,5$ кН, тобто на цьому циклі руйнівне навантаження виявилось меншим, ніж рівень навантаження на першому циклі. Причиною руйнування стало перевищення деформаціями в бетоні стиснутої зони максимальних

значень та порушенням анкетування вузлової арматури в ригелі. Руйнування відбулося, в основному по похилому перерізу.

До навантаження $P_{cyc} = 22,5$ кН характер роботи рами 2P-2 був таким же, як і рами 2P-1. Аналіз діаграм зміни згинальних моментів в прольоті ригеля і у вузлі по грані стійки показує, що повторні навантаження поглибили процес перерозподілу зусиль в елементах рами. На десятому циклі при $P = 45,0$ кН згинальні моменти відповідно склали: у прольоті ригеля $M_{sp} = 11,92$ і у вузлі $M_{sup} = 11,48$ кН*м, що тільки на 2,7 % відрізняється від теоретичних значень, обчислених з урахуванням перерозподілу зусиль, Тобто, можна вважати, що при такому режимі повторного навантаження повністю відбулося перерозподілення зусиль в елементах рами. Рама 2P-2 руйнувалася по нормальним перерізам, а в похилих перерізах виникали незначні тріщини.

В рамках 2P-3 і 2P-4 порівняно з рамою 2P-2 спостерігались більш поглиблені процеси перерозподілу зусиль, збільшення залишкових і повних деформацій в бетоні і арматурі (рис. 6). Руйнування відбулося по нормальним перерізам.

Аналіз впливу повторних навантажень на прогини ригеля, показує, що зі збільшенням кількості циклів збільшуються повні і залишкові прогини. Таке збільшення може досягати до 20% при незмінному експлуатаційному рівні повторних навантажень ($0,6 P_u$), а у випадках довантаження – до 60% (рис. 7). Зі збільшенням рівня повторних навантажень до 0,71 і 0,84 збільшення прогинів склало відповідно 33% і 42%.

Зміну ширини розкриття тріщин в ригелях вивчали при випробуваннях рам другої серії. Встановлено, що повторні навантаження також суттєво впливають на процеси тріщиноутворення. В основному, розвивалися тріщини, які виникали на перших ступенях навантаження і їхня ширина поступово збільшувалася. Стабілізація збільшення ширини розкриття тріщин наступила на п'ятому-сьомому циклах (рис. 8). В середньому на циклах навантаження ширина розкриття тріщин збільшувалася на 20%.

Теоретична міцність нормальних і похилих перерізів рам обчислювалася за методикою норм СНиП 2.03.01 – 84*. Для рами 1P-1 розбіжність між теоретичним значенням руйнівної поздовжньої сили в ригелі з експериментальним склало 3,1%, що можна вважати задовільним. В рамках 1P-2, 1P-3 і 1P-4 дослідні поздовжні сили виявилися меншими від теоретичних, певно, що в цих рамах на загальне руйнівне навантаження в певній мірі вплинула міцність похилих перерізів.

В рамках 2P-2, 2P-3 і 2P-4 дослідні поздовжні сили в ригелях значно перевищили визначені згідно з СНиП 2.03.01 – 84*. Певно на це вплинула зміна міцності бетону внаслідок повторної дії навантаження. Якщо прийняти значення призмової міцності згідно з формулою (1), то розбіжність зменшується і складає в середньому 14,8%.

За розрахунками теоретичне значення поперечної сили для рами 1P-1 перевищує дослідне на 3,6%, а для інших рам це перевищення склало від 26,1 до 36,8%. Певно на міцність похилих

перерізів вплинуло зменшення зчеплення арматури з бетоном внаслідок малоциклових навантажень.

Згідно СНиП 2.03.01 – 84* довжина анкерівки арматури повинна складати 43,3 см. Фактично в рамках першої серії вона прийнята 45 см, що виявилось достатньо для рами 1Р-1 і недостатньою для рам 1Р-2, 1Р-3 і 1Р-4, які піддавалися повторним навантаженням.

Експериментально встановлено, що повторні навантаження збільшують прогини ригелів рам і ширину розкриття тріщин, що не враховується в чинних нормах. З огляду на це пропонується в розрахункові формули СНиП 2.03.01 – 84* вводити додаткові коефіцієнти умов роботи $\gamma_{f,cyc} = 1,20$ і $\gamma_{cr,cyc} = 1,30$.

В дисертації наведені формули для визначення напружено-деформованого стану ригеля рам з використанням деформаційної моделі, які дають задовільну збіжність з експериментальними даними.

ВИСНОВКИ

1. Отримані нові експериментальні дані про роботу двохшарнірних П-подібних залізобетонних рам, які розширили уявлення про перерозподіл зусиль в їх елементах при одноразових короткочасних навантаженнях та вперше виявили особливості їх роботи при повторних малоциклових навантаженнях.

2. Експериментально встановлено, що перерозподіл зусиль в елементах рам може відбуватися завдяки пластичного деформування бетону стиснутої зони, коли він працює на низхідній ділянці повної діаграми деформування.

3. Встановлено, що повторні малоциклові навантаження експлуатаційних рівнів, які не перевищують 0,6 від руйнівного навантаження, поглиблюють в рамках процеси перерозподілу зусиль, призводять до збільшення в нормальних перерізах елементів рам повних і залишкових деформацій в стиснутому бетоні і розтягнутій арматурі та збільшують прогини ригелів рам і ширину розкриття тріщин. Стабілізація названих процесів відбувається після п'яти – семи циклів повторного навантаження – розвантаження.

4. Встановлено, що можливі перевантаження рам в процесі повторних малоциклових навантажень експлуатаційних рівнів призводять до збільшення залишкових деформацій в стиснутому бетоні і розтягнутій арматурі, а також залишкових прогинів ригеля і ширину розкриття тріщин.

5. Встановлено, що при повторних навантаженнях зменшується міцність похилих перерізів ригелів рам внаслідок порушення анкерівки поздовжньої вузлової арматури. При проектуванні залізобетонних рам, які будуть експлуатуватися під дією повторних малоциклових навантажень, необхідно збільшувати довжину анкерування вузлової арматури.

6. Запропоновані математичні моделі для визначення призмової міцності і модуля пружнопластичності бетону, які змінюються внаслідок дії на бетон повторних малоциклових навантажень. Вперше статистично обґрунтована малоциклова втомленість бетону.

7. Для визначення міцності нормальних перерізів елементів рам можна використовувати методику СніП 2.03.01 – 84* з урахуванням зміни міцності бетону внаслідок повторних навантажень.

8. При визначенні прогинів ригеля рам та ширини розкриття нормальних тріщин в розрахункові формули СніП 2.03.01 – 84* необхідно вводити додаткові коефіцієнти умов роботи ($\gamma_{f,cyc} = 1,20$ і $\gamma_{cr,cyc} = 1,30$).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

1. Бабич Є.М., Ільчук Н.І. Міцність і деформативність важкого бетону при малоцикловому стисненні // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць. – Рівне: Видавництво УДУВГП, 2003. – Випуск 9. – С. 116 – 123;
2. Бабич Є.М., Ільчук Н.І. Пружно-пластичні характеристики бетону після повторного стискання на вітках розвантаження // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць. - Рівне: УДУВГП, 2003.- Випуск 10.- С. 69 – 83;
3. Бабич Є.М., Мурашко Л.А., Ільчук Н.І. Перерозподіл зусиль та напружено-деформований стан залізобетонних рам при короткочасному навантаженні // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць. – Рівне: Видавництво Національного університету водного господарства та природокористування, 2004. Випуск 11. – С. 123 – 133;
4. Бабич Є.М., Ільчук Н.І. Визначення граничного навантаження на двошарнірні залізобетонні рами на основі деформаційної моделі перерізів // Сталезалізобетонні конструкції: Збірник наукових статей. – Кривий Ріг, 2004. – Випуск 6. – С. 174 – 180;
5. Бабич Є.М., Ільчук Н.І. Особливості роботи залізобетонних рам при повторних навантаженнях // Будівельні конструкції: Збірник наукових праць. – Київ: НДІБК, 2005. – С. 24 – 29;
6. Бабич Є.М., Ільчук Н.І. Опір залізобетонних рам повторним навантаженням // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій: Збірник наукових праць.- Львів: Каменярь, 2005.- Випуск 6.- С. 234 – 242;
7. Бабич Е.М., Ильчук Н.И. Перераспределение усилия в двухшарнирных железобетонных рамах при действии нагрузки разных уровней // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури.- Одеса: «Місто майстрів», 2005.- Випуск № 20.- С. 14 – 21;
8. Бабич Є.М., Ільчук Н.І. Зміна ширини розкриття тріщин в ригелі двохшарнірних залізобетонних рам при повторних малоциклових навантаженнях // Ресурсоекономні матеріали,

конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць. – Рівне: Видавництво Національного університету водного господарства та природокористування, 2006. - Випуск 14. – С. 130 – 138;

9. Бабич Є.М., Ільчук Н.І. Особливості роботи двохшарнірних залізобетонних рам при малоциклових навантаженнях з можливим довантаженням // // Будівельні конструкції: Збірник наукових праць. – Київ: НДІБК, 2006. – Випуск 65.– С. 88 – 93.

10. Ильчук Н.И. Исследования работы двухшарнирных железобетонных рам при действии повторных нагружений // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: Сб. науч. тр. междунар. науч.-метод. межвузовского семинара – Могилев: Белорусско-Российский университет, 2005. – С. 175 – 180.

11. Ільчук Н.І. Дослідження переміщень двошарнірних залізобетонних рам при повторних навантаженнях // Вісник Львівського аграрного університету: Архітектура і сільськогосподарське будівництво. – Львів: Львів.держ. агроуніверситет, 2006. – Випуск № 7 – С. 265 – 271.

АНОТАЦІЯ

Ільчук Н.І. Особливості роботи П-подібних залізобетонних рам при короткочасних малоциклових навантаженнях. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 0.5.23.01 – “Будівельні конструкції, будівлі та споруди”. – Національний університет “Львівська політехніка”, Львів 2007.

Дисертація присвячена розробці методики розрахунку рам за деформаціями з урахуванням дії повторних малоциклових навантажень на П-подібні залізобетонні рами на основі сучасної розрахункової деформаційної моделі та експериментальному дослідженню роботи таких рам при одноразовому і короткочасному малоцикловому навантаженні. В ній обґрунтовані умови розрахунку залізобетонних рам з урахуванням перерозподілу зусиль в елементах рами.

Отримані нові експериментальні дані про перерозподіл зусиль в елементах рами, при дії повторних малоциклових навантажень. Встановлено, що пластичні шарніри в перерізах рами можуть виникати в наслідок пластичного деформування бетону стиснутої зони коли він працює на низхідній ділянці діаграми деформування.

Ключові слова: залізобетонні П-подібні рами, напружено-деформований стан, міцність, деформаційна модель, розрахунок, перерозподіл зусиль.

АННОТАЦИЯ

Ильчук Н.И. Особенности работы П-образных железобетонных рам при кратковременных малоцикловых нагружениях – Рукопис.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 – “Строительные конструкции, здания и сооружения”. – Национальный университет “Львовская политехника”, Львов 2007.

Диссертация посвящена разработке методики расчета рам по деформациям при учете действия повторных малоцикловых нагрузжений на П-образные железобетонные рамы на основе современной расчетной деформационной модели и экспериментальному исследованию работы таких рам при однократных и повторных нагружениях.

Во **вступлении** обоснована актуальность темы, научная новизна и практическая ценность, приведена общая характеристика диссертации.

В **первом разделе** рассмотрена область применения двухшарнирных П-образных железобетонных рам, существующие методы их расчета, выполнен обзор результатов экспериментальных исследований двухшарнирных железобетонных рам при кратковременных и повторных нагружениях.

Второй раздел посвящен методике проведения экспериментальных исследований, определению механических характеристик бетона и арматуры. Приведен объем и программа экспериментальных исследований, описана установка для испытания рам, методика измерения деформаций, трещин, опорных реакций, изгибов ригелей рам.

В **третьем разделе** исследовано влияние кратковременного малоциклического сжатия на механические и деформационные характеристики бетона. Обусловлена необходимость определения изменений механических характеристик материалов при действии повторных нагружений.

В **четвертом разделе** приведен глубокий анализ работы рам при однократных и повторных нагружениях. Построены графики изменения опорных реакций, экспериментальных значений изгибающих моментов, деформации бетона сжатой зоны и арматуры, изгибов ригелей рам, как при однократных, так и при повторных нагружениях. Установлено влияние повторных нагружений на перераспределение усилий, деформационные процессы. Установлено, что повторные нагружения эксплуатационного уровня способствуют перераспределению усилий в элементах рамы.

Ключевые слова: железобетонные П-образные рамы, напряженно-деформированное состояние, прочность, деформационная модель, расчет, перераспределение усилий.

ANNOTATION

Ilchuk N. Peculiarities of the work of П – similar reinforced concrete frames under the influence of short-term little cycle loads. – Manuscript.

The dissertation conferring a scientific degree of Candidate of Technical Sciences by a speciality 05.23.01 – “Building structures, buildings and constructions”. – National University “Lviv Polytechnics”, Lviv 2007.

The dissertation is devoted to development of the computation frames technique of deformations under the action of repeated little cycle loads on reinforced concrete Π – similar frames on the basis of modern calculation deformation model experimental of operation of such frames at disposable and short-term little cycle loads. Conditions of calculation of reinforced concrete frames taking into account redistribution of efforts in frame elements.

Having carried out experimental researches new data on redistribution of efforts in frames elements under the influence on their operation under repeated little cycle loading have been received. It is revealed that plastic hinges in sections of frames can appear owing to plastic deformation of concrete of the compressed zone when it works on a descending site of the diagram of deformation.

Key words: Π – similar reinforced concrete frames, stressed-deformed state, durability, deformation model and calculation, redistribution of efforts.

Підп. до друку 28.04.07

Формат 60x80/16. Папір офс.

Ум.друк.арк 0,75. Тираж 100 прим. Зам 3206.

Редакційно-видавничий відділ

Луцького державного технічного університету

43018 м. Луцьк, вул. Львівська, 75.

Друк – РВВ ЛДТУ