

М.Р. Більський, М.В. Котів, Р.В. Мотовило
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра будівельного виробництва
79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12

РЕЛАКСАЦІЯ РЕГУЛЮВАЛЬНИХ НАПРУЖЕНЬ В ПОСИЛЕНИХ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЯХ

© Більський М.Р., Котів М.В., Мотовило Р.В., 2007

Наведено результати дослідження релаксації напружень в елементах сталевих конструкцій, що підсилюються методом попереднього напруження.

In this article are reflected results of investigation of stress relaxation in structural steel components, which are increased by prestress method.

Постановка проблеми. Після посилення конструкцій напруженими сталевими елементами в останніх відбуватиметься в часі релаксація попереднього напруження, що зменшує своєю чергою величину регулювального зусилля. Релаксація попереднього напруження сталеві арматури попередньо напружених залізобетонних конструкцій досягає, як відомо, значних величин і тому вона враховується в розрахунках. Разом з тим в нормативних документах з розрахунку попередньо напружених сталевих конструкцій релаксація не враховується, хоча практично вона існує, а тому необхідно знайти її кількісний вплив.

Мета роботи. Метою роботи є дослідження значущості впливу релаксації попереднього напруження елементів посилення сталевих конструкцій на величину регулювального зусилля.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання посилення металевих конструкцій розглядається в багатьох науково-технічних джерелах [1,3,4]. Разом з тим, методів розрахунку релаксації попереднього напруження після посилення сталевих конструкцій сьогодні практично не існує. Найповніші відомості з релаксації напружень в матеріалах наведено в науково-технічній літературі з матеріалознавства [2,5].

Не вирішені раніше частини проблеми. Для врахування релаксації при розрахунку величини регулювального зусилля (попереднього напруження) при посиленні сталевих конструкцій необхідно уточнити кількісний характер втрати попереднього напруження в функції часу конкретно для будівельних сталей.

Виклад основного матеріалу. У момент посилення попередньо напруженим елементом напруги в основному і доданому перетинах можна відрегулювати так, що вони будуть однакові. Проте з плином певного проміжку часу в доданому елементі повинна відбутися релаксація попередньої напруги, тоді як в основному елементі така релаксація відбулася вже раніше. Тільки після додаткового завантаження посиленого стрижня релаксація напруг від додаткового навантаження відбуватиметься в основному і доданому стрижнях одночасно. Спробуємо розглянути кількісний аспект цього процесу. Домовимося розрізняти два етапи релаксації. На першому релаксація в доданому елементі відбувається перед додаванням додаткового навантаження. На другому релаксація напруг в доданому (посилуючому) перетині відбувається після довантаження посиленого стрижня. У цьому випадку навантаження у всьому посиленому перетині збільшується, а в доданій його частині (у посилювальному перетині) можуть виникнути пружно-пластичні деформації. Звернемося

спочатку до результатів виконаних раніше досліджень. Явище релаксації напруг вперше розглянув Максвелл, який запропонував математичну модель в'язко-пружного середовища.

$$d\sigma / dt = E d\varepsilon / d\tau - \sigma / \tau_r, \quad (1)$$

При $\sigma = \text{const}$ отримаємо рівняння в'язкої течі Ньютона $\sigma = E\tau_r d\varepsilon / d\tau$, де E – модуль пружності; ε – відносна деформація; τ_r – час релаксації. При $\varepsilon = \text{const}$ рівняння релаксації Максвелла

$$d\sigma / d\tau = -(1/\tau_r)\sigma. \quad (2)$$

Якщо $\tau_r = \infty$, вираз (1), тобто закон Гука. Фізичну сутність явища релаксації зручно спочатку представити на прикладі ідеального монокристалічного тіла. Всі процеси, створені зовнішніми силами, в такому тілі є зворотні. Кристалічне тіло під впливом зовнішніх впливів (сил) переходить у нерівноважний стан і тим не менше воно завжди прагне повернутися в колишній стан (рівновагу). Таке повернення називають релаксаційним. В однорідних та ізотропних тілах релаксація – це прояв повзучості за умови постійності сумарної деформації, тобто

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{np} + \varepsilon_{nl} + \varepsilon_{cmp} + \varepsilon_{nv} = \text{const}, \quad (3)$$

де $\varepsilon_{np}, \varepsilon_{nl}$ – відповідно пружна і пластична миттєва деформації, які виникають при навантаженні; ε_{cmp} – деформація, яка виникає в силу зміни об'єму в результаті структури металу; ε_{nv} – деформація повзучості.

У результаті продиференціювання виразу (3) за часом отримано [2] рівняння:

$$(1/E)(d\sigma/d\tau) + \varepsilon_{nv} + \varepsilon_{cmp} = 0, \quad (4)$$

що дає змогу розрахувати швидкість релаксації.

Це рівняння називають основним рівнянням релаксації. У реальних тілах на релаксацію впливають також різні непружні процеси, що виявляються і при напруженнях, набагато менших від межі текучості. Релаксацію прийнято ділити на два періоди. Перший – порівняно невеликий – швидкий та інтенсивний. Другий – сталий період. Тут релаксація проходить із значно меншою, але сталою швидкістю. Для цього періоду вплив початкових напружень на інтенсивність релаксації практично відсутній.

На релаксацію напружень у сталевих конструкціях певний вплив чинить попередня пластична деформація, що приводить до підвищення щільності активних дислокацій і одночасно до дроблення субструктури металу. Перший процес збільшує релаксацію, другий зменшує її. Залежно від того, який із процесів переважає, опір релаксації після пластичного деформування може підвищуватися або знижуватися.

Так, в аустенічних сталях із межею текучості у вихідному стані 200...300 МПа після пластичної деформації опір у релаксації трохи підвищується. Можна також припустити, що якщо посилюваний елемент працював до посилення в пружно-пластичній стадії, то опір його релаксації при завантаженні після посилення повинен підвищуватися.

Вплив масштабного фактора на релаксацію поки вивчено недостатньо, однак вже досягнуто цікавих результатів. Так, дослідженням І.А. Одингга і В.В. Бурдукського [5] було встановлено, що локальність пластичних деформацій у деяких випадках може привести до невеликого зниження релаксаційної стійкості зразків малих поперечних розмірів, а ймовірність такого зниження тим більша, чим більша довжина зразка. Було також встановлено, що форма поперечного перерізу, а також наявність різьби на поверхні не впливають помітно на релаксаційну стійкість. І.П. Баушис [2] досліджував опір релаксації при різних температурах в умовах стиснення зразків з вуглецевих сталей марок 20, 45, 48 і 60 С2 різної довжини і діаметрів.

Діаметр варіювався в межах 5...10мм, довжина 10...160мм. У результаті випробувань було встановлено, що зі збільшенням діаметра інтенсивність релаксацій зростає; збільшення довжини зразка також прискорює релаксацію. Було запропоновано таку апроксимацію отриманих експериментальних даних:

$$\varepsilon_T = +\sigma_0 - \varphi_1(L)\varphi_2(A)f(\sigma_0, \dot{\varepsilon}, \tau),$$

де $\varphi_1(L), \varphi_2(A)$ – функції довжини і площі поперечного перерізу; $f(\sigma_0, t, \tau)$ – функції початкового напруження, часу і температури і часу. Як видно, наведені результати у різних дослідників різні. Причини тут, імовірно, не тільки в різному прояві масштабного фактора в умовах стиску і розтягнення, але й в особливостях поведінки в цих умовах матеріалів [2].

Процентний вміст вуглецю на релаксаційні властивості сталей вивчено поки недостатньо. Однак на підставі хоча і нечисленних даних було встановлено, що у всіх сталей із процентним вмістом вуглецю 0,025; 0,17; 0,4; 0,8 і при початкових напруженнях (0,7..0,8) σ_0 після 50000 год витримки при кімнатній температурі (+20 °С) початкові напруження зменшилися всього на 1,5...3%. Було також встановлено, що швидкість релаксації тим менша, чим більший вміст вуглецю [2].

Сталь із 0,4 і 0,13 % вуглецю, що мала вихідну структуру зернистого перліту, чинила більший опір релаксації, ніж та сама сталь зі структурою пластинчастого перліту. У сталі зі змістом 0,17 % вуглецю в обох структурних станах релаксаційний опір практично однаковий. З підвищенням температури збільшення вмісту вуглецю більше впливало на зниження релаксаційного опору. Так, при температурі +200°С оптимальний вміст вуглецю дорівнював 0,6 %, а при 250°С – 0,5 % [2].

Виходячи з наведених вище даних, можна зробити висновок, що для сталей перлітного класу процентний вміст вуглецю мало позначається на їхній релаксаційній стійкості, яка для цих сталей досить висока (зниження напруження на 1,5...3 %). Як видно, при звичайних температурах і досить високих рівнях початкових напружень (0,7...0,8) σ_T втрата попереднього (початкового) напруження для вуглецевих сталей, застосовуваних у будівництві, дуже незначна.

Очевидно, що такі самі значення втрат попереднього напруження від релаксації можна з достатньою для практичних цілей точністю приймати і для елементів посилення сталевих конструкцій під навантаженням на першому етапі (збільшуючи зовнішнє навантаження після посилення).

На другому етапі (після прикладення додаткового навантаження при рівних початкових напруженнях) релаксація напруження в основній і доданій частинах посиленого перерізу буде однаковою. Якщо порівняти максимальне значення релаксації, яке дорівнює $0,03 \sigma_0$, з розрахунковим опором металу посилення R_y , то при максимально теоретично можливому $\sigma_0 = 0,5 R_y$ значення релаксації буде $\Delta\sigma = 0,015 R_y$. Так, при $R_y = 210\text{МПа}$, $\Delta\sigma = 3,15\text{МПа}$, що практично можна не враховувати. Однак це справедливо тільки у випадку попереднього напруження елементів посилення в проектному положенні, коли підсилення, що прикладається, одночасно розвантажує основний (посилюваний) стрижень.

У випадку попередньої напруги елементів посилення за допомогою зтяжок до встановлення їх в проектне положення рівень напруг в останніх і в елементах посилення буде в середньому вдвічі вищим. Релаксація напруги в зтяжці і напруженому елементі буде однаковою (максимальне значення – $0,03 \sigma_0$, що можна врахувати при проектуванні. Якщо такий попередньо напружений (заряджений) елемент встановити в проектне положення і зробити відпуск його попередньої напруженості на посилюваний стрижень, то в результаті податливості останнього початкова напруга елемента підсилення зменшиться. Релаксації при цьому не спостерігаємо, тому що релаксація напруження у посилювальному елементі відбулася раніше. Отже, релаксація практично незначна.

Висновки

1. На основі аналізу процесів релаксації напружень в металах можна оцінювати рівень релаксації напружень в вуглецевих сталях, які застосовуються в будівництві.

2. Витрати регульовального напруження при посиленні сталевих конструкцій в результаті релаксації можна вважати практично незначними (у межах 3 %).

1. Клименко Ф.Є., Барабаш В.М., Стороженко Л.І. *Металеві конструкції*. – Львів: Світ, 2002. – 312 с. 2. Борздыка А.М., Гецов Л.В. *Релаксация напряжений в металах и сплавах*. – М.: Металлургия, 1978. – 256с. 3. Гоголь М.В., Пелешко І.Д., Більський М.Р. *Регулювання зусиль у стрижневих металевих конструкціях // Матеріали V Міжнародної наук.-техн. конф. "Будівельні металеві конструкції"*. БМК 2006. – К.: УкрНДІпроектстальконструкція, 2006. – С.93–95. 4. Бельський М.Р. *Усиления стальных конструкций под эксплуатационной нагрузкой*. – М.: Стройиздат, 1984. – 153 с. 5. Один І.А., Иванова В.С., Бурдукский В.В. *Теория ползучести и длительной прочности металлов*. – М.: Металургиздат, 1999. – 488с.