

*С. В. Цвіркун, канд. техн. наук, доцент,  
Б. Б. Григор'ян, канд. техн. наук, доцент, І.В. Рудешко  
(Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля  
Національного університету цивільного захисту України)*

### **ВИЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ СТИСНУТИХ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ПІДЗЕМНИХ СПОРУД**

Описано методику визначення критичної температури сталевих стиснутих конструкцій підземних споруд з урахуванням закритичного деформування після втрати стійкості під дією високої температури для проектування вогнезахисту вищезазначених конструкцій.

Отримане значення критичної температури металу конструкцій використовується при розрахунках необхідної товщини вогнезахисних матеріалів.

В закритичній стадії деформування прогин в небезпечному перерізі сталеві конструкції зменшується, що в свою чергу сприяє зменшенню згинального моменту, а критичний стан настає при більш високій температурі, що дозволяє отримати економію вогнезахисних матеріалів.

**Ключові слова:** вогнестійкість, металеві конструкції, втрата стійкості при нагріванні, закритичне деформування, критична температура

*С. В. Цвіркун, Б. Б. Григор'ян, І.В. Рудешко*

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ СЖАТЫХ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

Описано методику определения критической температуры стальных сжатых конструкций подземных сооружений с учетом закритического деформирования после потери устойчивости под действием нагревания.

Полученное значение критической температуры металла конструкций используется при расчетах необходимой толщины огнезащитных материалов.

В закритической стадии деформирования прогиб в опасном сечении стальной конструкции уменьшается, что в свою очередь способствует уменьшению изгибающего момента, а критическое состояние наступает при более высокой температуре, что позволяет получить экономию огнезащитных материалов.

**Ключевые слова:** огнестойкость, металлические конструкции, потеря устойчивости при нагревании, закритическое деформирование, критическая температура.

*S. V. Tsvirkun, B. B. Grygoryan, I. V. Rudeshko*

### **IDENTIFICATION OF CRITICAL TEMPERATURE FOR COMPRESSED METAL STRUCTURES USED IN UNDERGROUND BUILDINGS**

The method of determining the critical temperature compressed steel structures underground structures considering supercritical deformation after buckling under the action of heat for the design of fire protection of these structures.

The obtained value of the critical temperature of the metal structures has been used to calculate the required thickness of fire protection materials.

In the supercritical stage of deformation the curve in the dangerous cross-section steel structure is reduced, which in turn helps to reduce the bending moment and the critical condition occurs at a higher temperature that allows to obtain savings fire resistant materials.

**Key words:** fire, metal structures, buckling during heating supercritical deformation, critical temperature

Сталеві конструкції, що сприймають стискувальні зусилля, широко використовуються при будівництві підземних споруд (стійки, розпірки рампових частин транспортних тунелів тощо), що обумовлює актуальність створення методів проектування їх вогнезахисту для забезпечення необхідних меж вогнестійкості об'єктів. Проблема розробки таких методів набуває особливого значення стосовно до унікальних споруд, оскільки їх руйнування при ймовірній пожежі пов'язане з більш значним збитком, порівняно з типовими об'єктами, а проведення на них вогневих випробувань для визначення фактичної межі вогнестійкості виключено з очевидних причин. У силу цього для унікальних підземних споруд встановлюють більш високі, ніж для звичайних будівельних об'єктів, межі вогнестійкості несучих конструкцій (180 хв і вище).

Поряд із цим металеві конструкції мають істотно менші межі вогнестійкості, ніж залізобетонні конструкції підземних споруд [1], оскільки відносно висока теплопровідність металу сприяє швидкому прогріванню конструкцій під час вогневого впливу. Це, в свою чергу, зумовлює зниження жорсткості і міцності металу, у результаті чого конструкція втрачає несучу здатність внаслідок настання в її елементах стану текучості і розвитку неприпустимих деформацій. Більшість незахищених сталевих конструкцій має межу вогнестійкості не більше 0,25 год [1], отже застосування вогнезахисту для них є необхідним.

Тип вогнезахисту визначають на основі техніко-економічного аналізу з урахуванням таких основних чинників [1]:

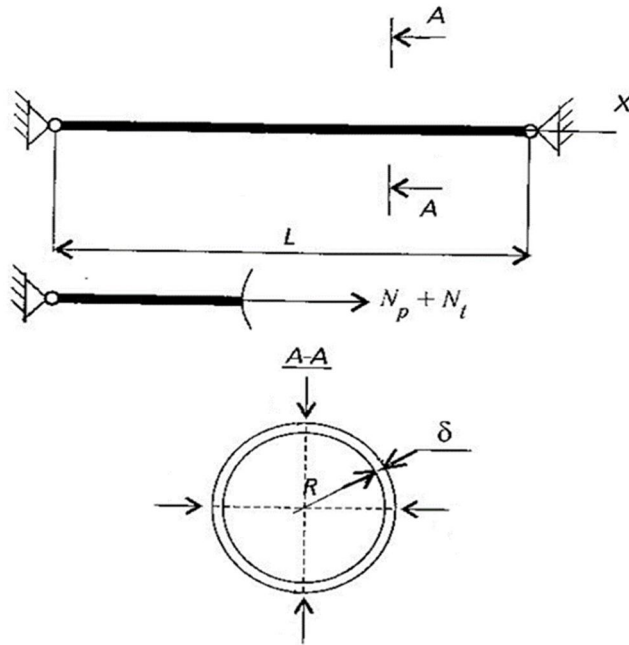
- величини необхідної межі вогнестійкості;
- типу конструкції, що захищається і виду запланованого навантаження;
- температурно-вологісних умов експлуатації і проведення робіт з монтажу вогнезахисту;
- ступеня агресивності навколишнього середовища відносно вогнезахисту і матеріалу конструкції;
- збільшення навантаження на конструкцію через масу вогнезахисту;
- трудомісткості монтажу вогнезахисту;
- естетичних вимог до конструкції.

Параметри вогнезахисту обраного типу, що забезпечують необхідну межу вогнестійкості, визначають для кожної розглянутої конструкції окремо, виходячи з умови  $P_{\phi} \geq P_{mp}$ , де  $P_{\phi}$  — фактична межа вогнестійкості конструкції з вогнезахистом.

Для металевих конструкцій - ця умова може бути сформульована у вигляді:  $T \leq T_{cr}$  де  $T$  — температура конструкції, що захищається в кінці вогневого впливу протягом часу, що дорівнює необхідній межі вогнестійкості;  $T_{cr}$  — значення температури нагрівання, при якій відбувається втрата несучої здатності конструкції за умови нормативних силових навантажень (критична температура),  $T_{cr}$  металу визначається статичним розрахунком.

Особливістю роботи сталевих розпірок в умовах ймовірної пожежі є спільне сприйняття ними стиснувальних силових навантажень і всебічного високотемпературного нагрівання. Очевидно, що оббетонування перешкоджає реалізації температурних деформацій розпірок, сприяючи виникненню в них стиснувальних температурних зусиль, які потенційно можуть виявитися більш небезпечними з точки зору руйнування конструкції, ніж прикладені до них зовнішні силові навантаження.

Прийmemo, що жорсткість залізобетонної обробки тунелю істотно більша за жорсткість сталеві розпірки, через що при розгляданні термомеханічної поведінки розпірки під час пожежі можна повністю знехтувати реалізацією її поздовжніх температурних деформацій і прийняти розрахункову схему центрально стиснутого стержня з нерухомим шарнірним закріпленням кінців, що рівномірно обігрівається по довжині (рис 1).



**Рисунок 1** – Розрахункова схема стиснутої розпірки, що обігривається з усіх сторін:  
 $T_f$  — температура обігриваючого газового середовища;  $N_p$  — поздовжня сила у перерізі розпірки від силового навантаження;  $N_t$  — поздовжня сила в перерізі розпірки від непрямої температурної деформації (температурний розпір);  
 стрілками на розрізі А-А вказано напрям вогневого впливу

Висока теплопровідність сталі дає при розрахунках прийняти, що теплоперенос в об'язі металевої розпірки є миттєвим і рівномірним [1], отже градієнт температурного поля у перерізі і по довжині конструкції, що розглядається, дорівнюють нулю.

Верхня оцінка температурних напружень щодо описаних вище кінематичних граничних умов та лінійно-пружній деформації сталі може бути отримана за відомою формулою

$$\sigma = E(T) \alpha(T) \Delta T$$

де  $E(T)$  і  $\alpha(T)$  — відповідно модуль пружності і коефіцієнт лінійного температурного розширення сталі, що залежать від температури  $T$ ;  $\Delta T$  — зміна температури порівнянно з початковим (у випадку, що розглядаємо — до початку нагрівання при пожежі) її значенням.

При нагріванні розпірок у вигляді сталевих труб із низьковуглецевої конструкційної сталі до температури близько 100 °С стискаючі термпружні напруження в них досягають досить високих значень (порядку нормативного опору сталі по межі текучості  $R_{yп}$ ). Отже, при дослідженні термомеханічної поведінки розпірок, що обігриваються в умовах пожежі, необхідно враховувати можливість втрати ними стійкості від температурних зусиль.

Умова збереження стійкості розпірки з урахуванням температурного зусилля має вигляд:

$$N_p + N_t < N_{cr} \quad (1)$$

де  $N_p$  — постійна (не залежить від нагріву) складова поздовжньої сили, що виникає в перерізі розпірки від прикладеного силового навантаження;  $N_t = E(T)F\alpha(T)\Delta T$  — змінна (залежить від температури) складова поздовжньої сили, що виникає у перерізі розпірки від температурної деформації, яка не проявилася;  $N_{cr}$  — критичне значення стискувального зусилля, знижене внаслідок нагрівання;  $F$  — площа поперечного перерізу розпірки.

Критична сила при втраті стійкості стійки у діапазоні пружних деформацій може бути визначеною за відомою формулою Ейлера:

$$N_{cr} = (\pi/\lambda)^2 E(T)F \quad (2)$$

де  $\lambda = l/i$  — гнучкість розпірки;  $l$  — довжина розпірки;  $i = \sqrt{J/F}$  — радіус інерції перерізу розпірки;  $J$  — осьовий момент інерції перерізу розпірки.

Замінивши у нерівності (1) величини, що входять до неї, відповідними виразами і припускаючи, що у межах граничного стану  $N_p \ll N_{cr}$ , можна отримати наближене співвідношення для верхньої оцінки критичної величини температури розпірки, що відповідає втраті нею стійкості в зоні пружних деформацій:

$$\Delta = \frac{(\dots)}{\dots} \quad (3)$$

де  $\alpha_{min}$  — мінімальне в розглянутому діапазоні температури значення коефіцієнта лінійного розширення.

Відомо [2], що втрата стиснутим стержнем стійкості в зоні пружних деформацій, що описана формулою Ейлера, відбувається лише у випадку дуже гнучких стрижнів, для яких критичні напруження не перевищують межі пропорційності сталі  $\sigma_{mc}$ . Значення гнучкості стрижня  $\lambda_0$ , що відповідає межі застосовуваності формули Ейлера, може бути оцінено за формулою:

$$\lambda_0 = \frac{(\dots)}{\dots} \quad (4)$$

Якщо прийняти за межу пропорційності маловуглецевої сталі за умов нормальної температури 200 МПа, знаходимо  $\lambda_0 \approx 100$ . Підставив знайдену величину у рівняння (3) і прийнявши  $\alpha_{min} = 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ , отримуємо, що для конструкцій з гнучкістю  $\lambda > \lambda_0$  критична величина температури  $\Delta T_{cr} < 97 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Якщо гнучкість розглядаємої конструкції варіюється у діапазоні  $(0,2 \dots 0,4)\lambda_0 < \lambda < \lambda_0$ , то формула Ейлера дає значення критичних навантажень, що перевищують їх дійсні значення [2], оскільки напруження, що виникають у розпірці на докритичній стадії її деформування, виявляються вище за межу пропорційності сталі, що призводить до істотного зниження характеристик жорсткості конструкції. Визначення критичного навантаження втрати стійкості за межею пропорційності проводять за формулою:

$$N_{cr} = (\pi/\lambda)^2 K(T) F \quad (5)$$

де  $K(T)$  — приведений модуль пружності (модуль Кармана), що враховує часткове пружне розвантаження перерізу конструкції за умов втрати стійкості і визначається наступним співвідношенням [3]:

$$K = \frac{E'}{1 + \dots} \quad (6)$$

де  $E'$  — дотичний модуль пружності;  $J$  — осьовий момент інерції перерізу конструкції;  $J_1$  — момент інерції зони перерізу, що розвантажується у момент втрати стійкості за рахунок поздовжнього вигину;  $J_2$  — момент інерції зони перерізу, що довантажується у момент втрати стійкості.

Вісь, щодо якої обчислюються моменти інерції, перпендикулярна площині, у якій відбувається випучування конструкції при втраті стійкості, а її положення визначається із співвідношення [3]:

$$S_1 E' + S_2 E' = 0 \quad (7)$$

де  $S_1, S_2$  — статичні моменти зон розвантаження та довантаження відповідно.

Враховуючи, що термопружні напруження у розпірці із маловуглецевої сталі, яка зашпелена по кінцях, досягають межі текучості при температурі близько  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , а для конструкцій з такої ж сталі з відносно більшою гнучкістю зазначений рівень температури приблизно відповідає верхній межі діапазону критичних температур, для розпірок з гнучкістю  $\lambda > (0,2 \dots 0,4) \lambda_0$  ймовірно є втрата стійкості розпірки вже на ранній стадії її нагрівання при пожежі. До розпірок з меншою гнучкістю, у яких довжина прольоту невелика відносно розмірів перерізу, поняття втрати стійкості не припустиме, а вичерпання несучої здатності відбувається внаслідок того, що стискувальні напруження в них досягають межі текучості.

Відзначимо, що в методиках визначення критичної температури стиснутих металевих конструкцій втрата стійкості отожднюється із граничним станом і відповідне цьому значення температури приймається за критичне [1,4]. Це припущення, що безумовно вірне для конструкцій, які перебувають в умовах активного силового навантаження, не може бути безумов-

но прийнятим для випадку випучування стрижня під дією температурних напружень. Часткова реалізація температурних деформацій, що відбувається в момент втрати стійкості конструкції, здатна привести до зменшення температурних напружень. Приймаючи цей факт, а також те, що втрата стійкості від нагрівання відбувається при досить низьких температурах (близько 100 °С), слід визнати, що температурне випучування не є для розглянутої конструкції граничним станом, а відповідна температура — критичною. При відносно невеликому рівні стискувальних напружень, що виникають в перерізі лише від силового навантаження, з великою ймовірністю можна стверджувати, що після втрати стійкості від нагрівання конструкція переходить до стану поздовжнього вигину і граничним станом для неї буде вичерпання несучої здатності небезпечного перерізу внаслідок спільної дії в ньому стискаючого зусилля і згинального моменту.

Припускаючи, що внаслідок розвантаження закритичне деформування розпірки має фізично лінійний характер, приймаємо для опису кінематики цього деформування таке співвідношення [5]:

$$= - \frac{(\quad)(\quad)}{(\quad)} - \quad (8)$$

Температурна складова поздовжньої сили, що зберігається в розпірці після випучування, дорівнює  $N_{cr}$  [5].

Вираз для згинального моменту, що виникає від поздовжнього вигину у небезпечному (середньому) перерізі розпірки, має вигляд:

$$M = (N_p + N_{cr})v \quad (9)$$

Згідно з [5], зазначені вище співвідношення є правильними, поки прогин залишається настільки малим, що можна використати відомий наближений вираз для кривизни, прийнятий у технічній теорії згину стержнів. Іншими словами, квадрат кута обертання плоского поперечного перерізу стійки має бути дуже малим порівняно з одиницею, що стосовно рівняння (8) означає

$$4 \frac{(\quad)(\quad)}{(\quad)} \ll 1 \quad (10)$$

Для оцінювання ступеня близькості розглянутої стиснуто-зігнутої конструкції до граничного стану будемо використовувати критерій [1]:

$$= \frac{\quad}{\text{уп}} + \frac{\quad}{\text{уп}} \quad (11)$$

де  $W_{pl}$  — пластичний момент опору розрахункового перерізу:

$$W_{pl} = CW, \quad (12)$$

де  $W$  — момент опору розрахункового перерізу вигину;  $C$  — коефіцієнт, що залежить від форми перерізу та враховує розвиток в ньому пластичних деформацій;  $R_{yt}$  — нормативний опір сталі за межею текучості, знижений з урахуванням нагрівання визначається за формулою [1,4]

$$R_{yt} = R_{yn} \gamma(T) \quad (13)$$

$R_{yn}$  — нормативний опір сталі за межею текучості у вихідному стані (до нагрівання);  $\gamma(T)$  — емпіричний коефіцієнт умов роботи сталі, враховує його зниження залежно від температури.

Критичним є значення температури, при якому виконується рівність  $k=1$ , що відповідає вичерпання несучої здатності стиснуто-зігнутих конструкцій [1].

Застосування описаної методики визначення критичної температури розглянемо на прикладі сталевій розпірці, яка виконана у вигляді тонкостінної циліндричної сталевій труби з внутрішнім радіусом 213 мм і товщиною стінки 10 мм, що сприймає поздовжнє стискувальне зусилля, нормативне значення якого дорівнює 206 кН. Необхідна межа вогнестійкості розпірки становить R 180. Довжина розпірки — 14 м, матеріал — маловуглецева сталь з нормативною межею текучості  $R_{yn} = 225$  МПа.

Діаграми деформування сталі під час розрахунків апроксимували ламаною [6], при цьому граничну деформацію  $\varepsilon_{S2}$ , що відповідає тимчасовому опору, розраховували за формулою

$$\varepsilon_{S2} = 100 \frac{\sigma_{уп}(\cdot)}{\sigma(\cdot)} \quad (14)$$

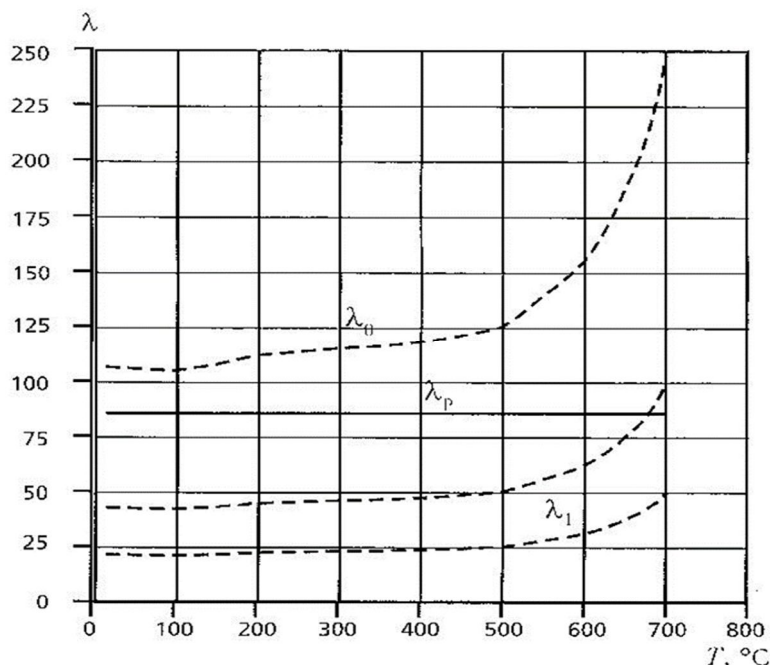
Залежність модуля пружності сталі від температури [1,4, 6]:

$$E(T) = E_0 \beta(T) \quad (15)$$

де  $\beta(T)$  — емпіричний коефіцієнт зниження модуля пружності.

Температурні залежності коефіцієнтів  $\gamma$  (умов праці),  $\beta$  (зниження модуля пружності) і  $\alpha$  (лінійного температурного розширення) для сталі, що використовується, брали за даними робіт [1,6].

Результати визначення критичної температури розпірки показано на рис. 2-5. На рис. 2 верхня пунктирна крива відображає залежність від температури граничного значення гнучкості  $\lambda_0$ , що визначає коректність застосування формули Ейлера для розрахунку критичного навантаження на розпірку.

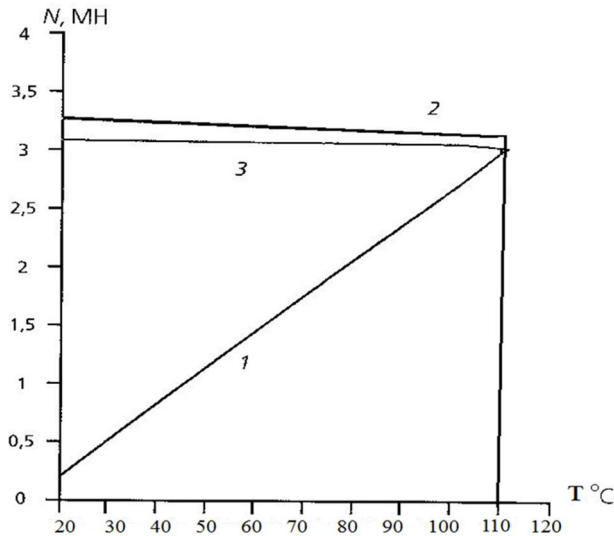


**Рисунок 2** – Залежність характерних значень гнучкості розпірки від температури  $T$ :  $\lambda_0$  — гнучкість, яка відповідає критичним напруженням, що дорівнюють нормативному опору за межею текучості;  $\lambda_1$  — значення, що визначає межу між зонами середньої і малої гнучкості;  $\lambda_p$  — гнучкість розпірки

Суцільною горизонтальною лінією показано значення гнучкості розпірки  $\lambda_p$ , що розглядається. Згідно з рисунком, у всьому представленому діапазоні зміни температури конструкція, що розглядається, має гнучкість нижчу за граничну, тобто за умови докритичного деформування в ній розвиваються напруження, більші за нормативний опір за межею текучості.

У той же час при  $T < 670$  °C гнучкість розпірки лежить вище смуги характерних значень  $\lambda_1 = (0,2-0,4)\lambda_0$ , що визначає межу діапазону стрижнів малої гнучкості, для яких можливість втрати стійкості неактуальна. Таким чином, досліджувана конструкція відноситься до стрижнів середньої гнучкості, для яких розрахунок критичних навантажень слід проводити з урахуванням фізичної нелінійності деформування матеріалу за формулою (5).

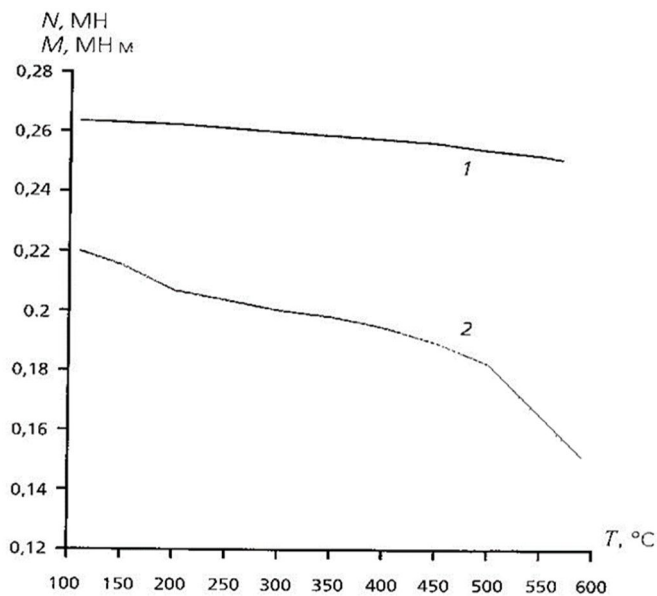
Рис.3 показує зміну поздовжнього стискувального зусилля, що виникає в розпірці на докритичній стадії деформування, залежно від температури нагрівання конструкції. Тут же наведені залежності від часу критичної сили і граничного значення поздовжнього зусилля, що відповідає досягненню межі текучості усім перерізом. Перетин кривих 1 і 3 відповідає втраті стійкості.



**Рисунок 3** – Докритичне деформування розпірки: залежність від температури  $T$  поздовжнього стискувального зусилля  $N(1)$ , критичної стискувальної сили  $N_{cr}(2)$  і граничного стискувального зусилля  $N_{lim}$ , що відповідає появі текучості у перерізі (3)

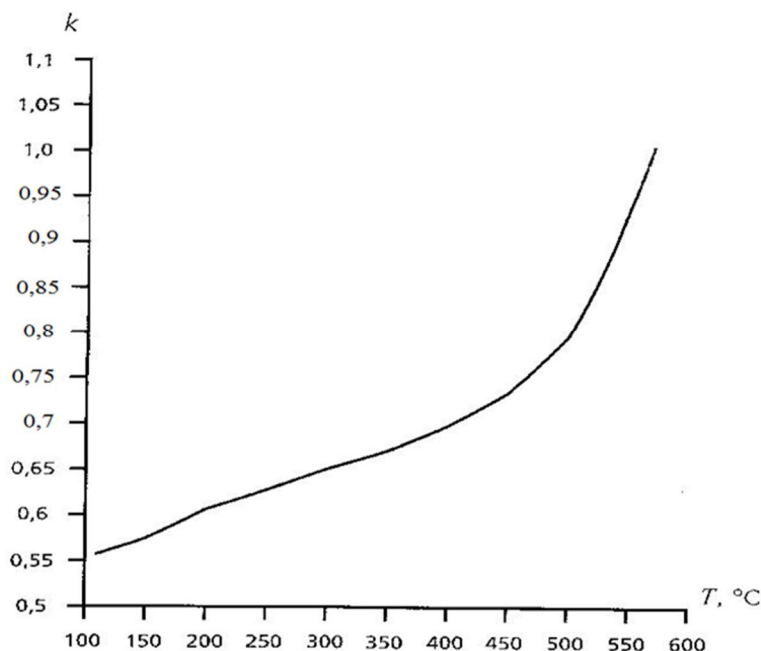
Як бачимо, втрата стійкості розглянутої конструкції настає при відносно невеликому значенні температури (близько  $110^{\circ}\text{C}$ ), коли стискувальні напруження, що виникають у перерізі, досягають рівня нормативного опору сталі за межею текучості (перетин кривих 1 і 3 на рис.3).

Рис.4 показує поведінку розглянутої конструкції на закритичній стадії деформування. Тут наведені залежності діючих у небезпечному (середньому) перерізі розпірки внутрішніх силових факторів — поздовжньої сили і згинального моменту від температури. Згідно з рисунком ці фактори у міру зростання температури зменшуються, що пояснюється відповідним зниженням при нагріванні модуля пружності сталі. Згинальний момент змінюється при цьому швидше, ніж поздовжня сила, оскільки зниження модуля пружності призводить до зменшення температурної складової поздовжньої сили, що обумовлює закритичний прогин розпірки, що, в свою чергу (див. формулу (8)), зменшує величину прогину у небезпечному перерізі і, відповідно, впливає на величину згинального моменту.



**Рисунок 4** – Залежність від температури  $T$  поздовжньої сили  $N(1)$  і згинального моменту  $M(2)$  в небезпечному перерізі розпірки на закритичній стадії деформування.

Залежність від температури критерію міцності конструкції  $k$ , що відповідає лівій частині рівняння (11), представлена на рис. 5. Граничний стан конструкції настає при  $k = 1$ , тому відповідне цьому значення температури приймається за критичне. Згідно з рис. 5, критична температура розглянутої конструкції становить  $569\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



**Рисунок 5** – Залежність критерію міцності розпірки  $k$  від температури  $T$

Отримане значення критичної температури металу використовується при розрахунках необхідних товщин вогнезахисту конструкцій. Необхідна товщина вогнезахисту визначається шляхом проведення серії параметричних теплотехнічних розрахунків, в яких вона є варіюваним параметром. Розрахунок нестационарного температурного поля у перерізі конструкції з вогнезахистом проводять чисельним розв'язанням диференціальних рівнянь нестационарної теплопровідності з урахуванням:

- наявності в розрахунковому перерізі порожнин, заповнених газом;
- можливого термічного розкладання (дегідратації) вогнезахисного матеріалу і супроводжуючих його процесів переносу пари у пористому середовищі, конденсації і випаровування;
- зміни теплофізичних властивостей матеріалів конструкцій залежно від температури.

#### **Висновки:**

1. Розпірки підземних споруд відносяться до стиснутих стрижнів середньої гнучкості, для яких розрахунок критичних навантажень слід проводити з урахуванням фізичної нелінійності деформування матеріалу.

2. У закритичній стадії деформування прогин у небезпечному перерізі зменшується, що в свою чергу сприяє зменшенню згинального моменту.

3. Критичний стан розпірки настає при більш високій температурі, яка відповідає значенню критерію міцності  $k = 1$  і температурі  $569^{\circ}\text{C}$ , що і є критичними для даної конструкції.

4. Описаний підхід враховує закритичне (після втрати стійкості від температурних напружень) деформування стиснутих металевих конструкцій підземних споруд типу балок-розпірок в умовах пожежі, і дає змогу визначати оптимальні параметри вогнезахисту цього класу конструкцій та зекономити вогнезахисні матеріали.



### Список літератури:

1. Мосалков И.Л., Плюснина Г.Ф., Фролов А.Ю. Огнестойкость строительных конструкций. – М: ЗАО «Спецтехника», 2001. – 496с.
2. Заславский Б.В. Краткий курс сопротивления материалов. – М.: Машиностроение, 1996 – 328с.
3. Работнов Ю.Н. Сопротивление материалов. – М.: Физматгиз, 1992 – 456 с.
4. Яковлев А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. – М.: Стройиздат, 1998. – 143 с.
5. Боли Б., Уэйнер Дж. Теория температурных напряжений. – М.:1998. – 518 с.
6. Страхов В.Л., Крутов А.М., Давыдкин Н.Ф. Руководство по пожарной безопасности подземных сооружений. В 5т. Т2./Под ред. Ю.А. Кошмарова. – М.: Информационно-издательский центр «ТИМР», 2002. – 433 с.

### References:

1. Mosolkov I. L., Plyusnina, G. F., Frolov, A. Yu., fire Resistance of building structures. – М: CJSC "special Equipment", 2001. – 496с.
2. Zaslavsky, B. W. a Short course in strength of materials. – М.:Mashinostroenie, 1996 – 328с.
3. Rabotnov Yu. N. Mechanics of materials. – М.: Fizmatgiz, 1992 – 456с.
4. Yakovlev A. I. Calculation of fire resistance of building structures. – М.: Stroyizdat, 1998. – 143с.
5. Pain B., J. Wayner. The theory of thermal stresses. – М., 1998. – 518с.
6. Strakhov V. L., Cool, A. M., Davydkin N. F. Guide to fire safety of underground structures. 5T. T2./Under the editorship of J. A. Koshmarov. – М.: Informatsionno-IZDATEL'skiy Tsentr «TIMR», 2002. – 433с.

