

ВПЛИВ КОНЦЕНТРАЦІЇ НАПРУЖЕНЬ НА ВТОМНУ МІЦНІСТЬ СТАЛІ 20

Shukayev S., Gladskiy M., Shubin S.

The National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine (shukayev@ukr.net)

EFFECT OF STRESS CONCENTRATION ON FATIGUE STRENGTH OF TYPE 20 STEEL

Досліджено вплив концентрації напруження на втомну міцність сталі 20. Втомні випробування здійснювалися на тонкостінних трубчатих зразках з концентратором і без концентратора. Втомна міцність зразків з концентратором напружень була меншою за втомну міцність зразків без концентратора напружень. Вплив концентрації напружень на циклічну довговічність зразків був найбільшим за бази випробувань 10^6 циклів. Із збільшенням амплітуди напружень вплив концентратора на довговічність зменшувалась і сходила нанівець у діапазоні квазістатичного руйнування. В роботі розглянуто застосування силового підходу, правила Нейбера та правила Глінки до оцінки довговічності сталевих елементів конструкцій у діапазоні малоциклового навантажування за наявності концентраторів напруження. Результати розрахунку за силовим підходом та правилом Нейбера добре узгоджуються з дослідними даними.

Ключові слова: втомна міцність, концентрація напружень, крива втоми, сталь 20, тонкостінні трубчаті зразки.

Вступ

Практично всі деталі машин та елементи конструкцій мають ті чи інші зони концентрації напружень. Це отвори під кріплення, переходи від одного розміру до іншого, різьби і т. п. В цих зонах має місце локальна концентрація напружень. Наявність концентраторів напруження суттєво впливає на процес втомного руйнування. У той час як несуча здатність типових елементів конструкцій майже або зовсім не відчуває впливу концентрації напруження в умовах статичного навантаження, опір втомному руйнуванню тим нижчий, чим вищий рівень концентрації напружень. Це пояснюється тим, що при одноразовому навантажуванні до руйнування використовується запас пластичності матеріалу для зменшення напруженості, тобто при переході за границю текучості вплив концентрації напруження зменшується через згладжування піків напружень в місцях найбільшої їх концентрації.

Для більшості конструкцій циклічне навантаження здійснюється за напружень, що нижчі за границю текучості матеріалу. В цьому випадку, наявність концентрації напружень приводить до сильного збільшення локальних напружень циклу, рівень яких і визначає втомну довговічність деталі або елемента конструкції.

Дана робота присвячена експериментальним і теоретичним дослідженням впливу концентрації напружень на втомну міцність тонкостінних трубчатих зразків, виготовлених з конструкційної сталі 20. Сталь широко використовується для виготовлення труб перегрівачів, колекторів і трубопроводів котлів високого тиску, трубопроводів для транспортування нафти і газу, шестерень, черв'яків, муфт, вкладишів підшипників та інших деталей. Дослідження виконувалися за підтримки Програми ім. Фулбрайта (Fulbright Scholar Program «Notch Effects on Multiaxial Fatigue Behavior of Metal Alloys»).

1. Експериментальне обладнання і зразки

Експериментальні дослідження виконувалися на електрогідравлічній випробувальній машині «BISS» (Bangalore Integrated System Solutions). Машина дозволяє здійснювати статичне і циклічне навантаження суцільних та трубчастих зразків осьовою силою N і крутним моментом M . Випробування можна здійснювати як в умовах м'якого, так і жорсткого режимів навантажування.

Випробувалися тонкостінні трубчаті зразки із зовнішнім діаметром 24,2 мм та товщиною стінки 1,1 мм без концентратора і з концентратором однакових розмірів і форми. В якості концентратора було використано наскрізний отвір діаметром 3,4 мм. Зразки було виготовлено із холоднодеформованої товстостінної труби з зовнішнім діаметром 33 мм. Зразки піддавалися термічній обробці: нормалізація при 850 С, витримка 40 хвилин, після чого зразки охолоджувалися у повітрі.

2. Результати випробування

Механічні характеристики сталі 20 були визначенні із випробувань на статичне розтягання двох зразків без концентратора: модуль Юнга $E = 185$ ГПа, границя текучості $\sigma_{0,2} = 305$ МПа, границя міцності

$\sigma_s = 450$ МПа. Циклічні випробування зразків здійснювали за синусоїдальним симетричним циклом з частотою 0.5-3 Hz і за кімнатної температури. Випробування гладких зразків проводили в умовах жорсткого режиму навантажування (контроль деформацій), а випробування зразків з концентратором - за м'якого режиму навантажування (контроль напружень).

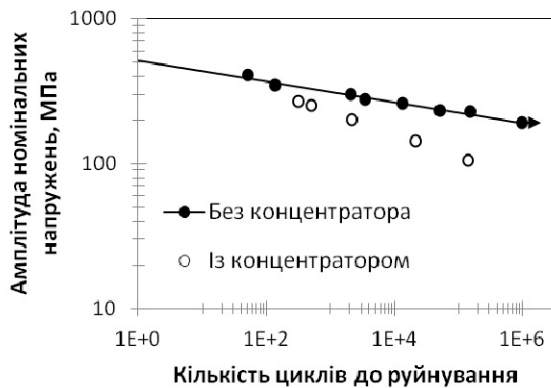


Рис. 1. Графіки довговічності сталі 20

що вплив концентрації напружень на циклічну довговічність зразків найбільше проявляється у діапазоні багатоциклової втоми на базі випробувань $N = 10^6$ циклів. Із збільшенням амплітуди напружень вплив концентрації напружень на довговічність сталі 20 зменшується. У діапазоні квазістатичного руйнування, коли амплітуда напружень досягає значень близьких до величини границі міцності матеріалу, цей вплив практично зникає.

Цей ефект пояснюється тим, що при переході за границю текучості вплив концентрації напруження зменшується за рахунок згладжування піків напружень в місцях найбільшої їх концентрації, через наявність пластичної деформації.

3. Ефективний коефіцієнт концентрації напружень

Для оцінки концентрації напружень використовують ряд характеристик. Найбільш поширеними є теоретичний і ефективний коефіцієнти концентрації напружень.

Теоретичний коефіцієнт концентрації напружень дорівнює відношенню максимального локального напруження σ_{\max} в найбільш навантаженій точці в умовах пружної роботи матеріалу до номінального напруження σ_n , яке визначається методами опору матеріалів без врахування ефекту концентрації.

$$\alpha_{\sigma} = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n} \quad (3)$$

Величину максимального локального напруження розраховували за допомогою метода кінцевих елементів, для чого використовувалася програма FEMAP. За результатами цих розрахунків було обчислено теоретичний коефіцієнт концентрації напружень, який для обраного діаметру отвору дорівнює $\alpha_{\sigma} = 3.109$.

Як відомо, вплив локальних напружень на втому матеріалів при одному і тому ж значенні теоретичного коефіцієнту залежать від типу джерел концентрації напружень та самого матеріалу. Через це вводять ефективний коефіцієнт концентрації напружень K_{σ} , який розраховують таким чином:

$$K_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1k}} \quad (4)$$

де σ_{-1} – границя витривалості зразків без концентрації напружень, а σ_{-1k} – границя витривалості зразків з концентрацією напружень, які підраховані як номінальні напруження для гладкого зразка з таким же поперечним перерізом.

За рівняннями (1) і (2) для довговічності $N = 10^6$ циклів були розраховані значення $\sigma_{-1} = 193,6$ МПа і $\sigma_{-1k} = 117,5$ МПа, відповідно. Звідси $K_{\sigma(\text{експеримент})} = 1,684$

Як бачимо, ефект неповної чутливості матеріалу до концентрації напружень (ефективний коефіцієнт концентрації напружень менший за теоретичний коефіцієнт) спостерігається у випробуваннях на зразках із сталі 20, що характерно для більшості металевих сплавів.

Для випадку, коли експериментальні дані відсутні, запропоновано кілька методів оцінки коефіцієнта K_{σ} . Так у ГОСТ 25.504-82 [2] рекомендується застосовувати експериментальну залежність:

$$K_{\sigma} = 1 + q_{\sigma}(\alpha_{\sigma} - 1), \quad (5)$$

де q_{σ} - коефіцієнт чутливості до концентрації напружень. Відповідно до [2] (рис. 15 обов'язкового додатку 2) $q_{\sigma} = 0,75$, звідси маємо, що $K_{\sigma} = 2,58$.

За методом Зібеля-Штілера [2] ефективний коефіцієнт концентрації напружень визначається таким чином.

$$K_{\sigma} = \frac{\alpha_{\sigma}}{n}, \text{ де } n = 1 + \sqrt{G} \cdot 10^{-\left(0,33 + \frac{\sigma_T}{712}\right)} \quad (6)$$

Границя текучості σ_T підставляється у МПа. Згідно [2], відносний градієнт $\bar{G} = \frac{2,3}{\rho}$. Підставивши ці дані до рівняння (6), одержимо, що $K_{\sigma} = 2,584$.

Для розрахунку ефективного коефіцієнту концентрації напружень за методом Р.Хейвуда [3] використовують залежність :

$$K_{\sigma} = \frac{\alpha_{\sigma}}{1 + 2 \left(\frac{\alpha_{\sigma} - 1}{\alpha_{\sigma}} \right) \left(\frac{a}{\rho} \right)^{0,5}}, \quad (7)$$

де a - коефіцієнт послаблення концентрації напружень, який виражається у міліметрах і залежить від типу концентратора і статичної міцності сталі. Для сталевих циліндричних зразків з поперечним отвором з діаметром $d = 2\rho$ при симетричному розтяганні-стисканні емпірично встановлено що $\sqrt{a} = \frac{177}{\sigma_i}$ (σ_M береться у МПа).

Після підстановки числових даних, отримали $K_{\sigma} = 2,159$.

Таким чином, найближчу до експериментальних результатів оцінку ефективного коефіцієнту концентрації напружень, було отримано за методом Хейвуда.

Ефективний коефіцієнт концентрації напружень за визначенням можна застосовувати лише до випадку багатоциклової втоми у діапазоні довговічностей $N \geq 10^6$ циклів. Для малоциклового діапазону при визначенні K_{σ} можна застосувати лінійну апроксимацію [4], приклад якої представлений на рис. 2.

Рівняння кривої втоми гладких зразків задається у вигляді :

$$\sigma_{\max} = C \cdot N^m \quad (8)$$

де σ_{\max} - максимальне напруження в циклі, m і C - сталі матеріалу, які визначаються з експерименту. Для сталі 20: $m = -0,066$, $C = 963,829$

Рівняння кривої втоми елемента конструкції (або зразка з концентратором) записується аналогічно:

$$(\sigma_k)_{\max} = (K_{\sigma})_N \cdot \sigma_i = \tilde{N} \cdot N^m, \quad (9)$$

де $(\sigma_k)_{\max}$ - максимальне напруження в зоні концентратора, $(K_{\sigma})_N$ - коефіцієнт концентрації напружень для заданого числа циклів до руйнування N .

Визначити $(K_{\sigma})_N$ можна, якщо використати реперні точки кривих втоми, які

відповідають значенням границі втоми зразків без концентратора напружень σ_{-1} , границі втоми зразків з концентратором напружень σ_{-1k} та границі статичної міцності σ_M :

$$\lg(K_{\sigma})_N = \frac{\lg \sigma_{-1} - \lg \sigma_{-1k}}{6} \lg N \quad (10)$$

4. Визначення локальних напружено-деформованого стану та прогнозування довговічності

В роботі також розглянуто декілька найбільш поширених підходів до оцінки напружено-деформованого стану в зоні концентратора, а саме правило Нейбера [5] та правило густини енергії деформації [6] (ще відоме як правило Глінки).

Правило Нейбера зазвичай записується у наступній формі

$$K_t^2 = K_{\epsilon} K_{\sigma} = \frac{\sigma}{S} \frac{\epsilon}{e}.$$

Для випадку пружного номінального навантаженні справедливий вираз $e = S/E$. Поєднуючи рівняння циклічної діаграми Рамберга-Осгуда із правилом Нейбера отримаємо

$$\frac{S^2 K_t^2}{E} = \frac{\sigma^2}{E} + \sigma \left(\frac{\sigma}{K} \right)^{1/n} \quad (11)$$

Якщо ж номінальні напруження перевищують 80% від границі текучості, зазвичай, виникають пластичні деформації. В цьому випадку необхідно записати ліву частину рівняння (11) врахувавши пружно-пластичну поведінку матеріалу, а саме

$$K_t^2 \left[\frac{S^2}{E} + S \left(\frac{S}{K} \right)^{1/n} \right] = \frac{\sigma^2}{E} + \sigma \left(\frac{\sigma}{K} \right)^{1/n} \quad (12)$$

Мольські та Глінка [6, 7] запропонували модель густини енергії еквівалентної деформації для пружно-пластичного аналізу в зоні концентратора. Цей метод базується на припущенні, що у випадку пластичного деформування в зоні концентратора пластична зона контролюється навколишнім пружним полем напружень та розподіл густини енергії однаковий в пластичній та пружній зонах. Для плоского напруженого стану правило Глінки має наступний вигляд

$$\frac{S^2 K_t^2}{E} = \frac{\sigma^2}{E} + \frac{2\sigma}{n+1} \left(\frac{\sigma}{K} \right)^{1/n} \quad (13)$$

Єдиною відмінністю від правила Нейбера є фактор $2/(n+1)$. Оскільки $n < 1$, цей фактор завжди більший за одиницю, і менші напруження σ будуть задовольняти рівняння для одного рівня номінальних напружень у порівнянні із правилом Нейбера. Внаслідок умови рівноваги, відбувається перерозподіл напружень поблизу концентратора напружень, що призводить до збільшення пластичної зони. Для врахування зміни розміру пластичної зони Глінка [8] запропонував корегуючий фактор C_p для визначення густини енергії деформації

$$C_p = 1 + \frac{\Delta r_p}{r_p},$$

де r_p - розмір пластичної зони, Δr_p - приріст розміру пластичної зони внаслідок перерозподілу напружень, що спричинено пластичними деформаціями. Правило густини енергії деформації може бути записано в наступному вигляді:

$$C_p \frac{S^2 K_t^2}{E} = \frac{\sigma^2}{E} + \frac{2\sigma}{n+1} \left(\frac{\sigma}{K} \right)^{1/n} \quad (14)$$

Для прогнозування довговічності зразків із концентратором за локальними деформаціями використовувалось рівняння Кофіна-Менсона, коефіцієнти якого було отримано з випробувань для гладких зразків.

Результати аналізу та випробувань зразків із концентратором представлені у табл. 1, де $\Delta \varepsilon_N / 2$ та $\Delta \varepsilon_G / 2$ розрахована амплітуда локальної деформації поблизу отвору за правилом Нейбера та Глінки відповідно. Треба відзначити, що критерієм руйнування для гладких зразків було визначено зниження на 5% напружень у порівнянні із стабільним циклом навантаження. Кількість циклів до руйнування зразків із концентратором визначалася за розміром тріщини в зоні концентратора за допомогою К-Т діаграми [9], що становить 0.2 мм для досліджуваного матеріалу.

Таблиця 1

Результати випробувань та аналізу зразків із концентраторами

$\frac{\Delta S}{2}$, МПа	$\frac{\Delta \varepsilon_N}{2}$	$\frac{\Delta \varepsilon_G}{2}$	N_f Кількість циклів до руйнування
269	0.0058	0.0069	315
250	0.0050	0.0061	495
200	0.0034	0.0041	2,115
144	0.0022	0.0026	20,900
106	0.0017	0.0018	140,500

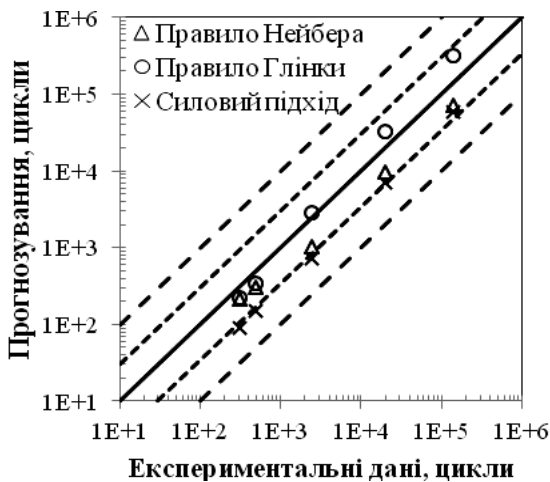


Рис. 3. Кореляція експериментальних та розрахункових даних

На рис. 3 представлена кореляція експериментальних та розрахункових даних за розглянутими в роботі підходами. Як видно, більш точними та консервативними є правило Нейбера та методика визначення за коефіцієнтом концентрації напружень (ГОСТ). Це можна пояснити тим, що геометрія зразків відтворює плоский напружений стан і локальні напруження точніше описують поведінку матеріалу з певним запасом міцності.

Висновок

Таким чином, в роботі представлені нові експериментальні дані щодо малоциклової втоми тонкостінних зразків із сталі 20 та визначено ефект концентрації напружень. Показано ефективність використання силового підходу та правила Нейбера для прогнозування довговічності тонкостінних сталевих елементів конструкцій у діапазоні малоциклового навантажування за наявності концентраторів напруження.

Анотация. Исследовано влияние концентрации напряжений на усталостную прочность стали 20. Усталостные испытания проводились на тонкостенных трубчатых образцах с концентратором и без концентратора. Усталостная прочность образцов с концентратором напряжений была меньше чем усталостная прочность образцов без концентратора напряжений. Влияние концентрации напряжений на циклическую долговечность образцов было наибольшим на базе испытаний 10^6 циклов. С увеличением амплитуды напряжений влияние концентратора на долговечность уменьшалось и сходило на нет в диапазоне квазистатического разрушения. В работе рассмотрено использование силового подхода, правила Нейбера, правила Глнки к оценке долговечности стальных элементов конструкций в диапазоне малоциклового нагружения при наличии концентраторов напряжения. Результаты расчета по силовому подходу и правилу Нейбера хорошо согласуются с опытными данными.

Ключевые слова: усталостная прочность, концентрация напряжений, кривая усталости, сталь 20, тонкостенные трубчатые образцы.

Abstract. The effect of stress concentration on fatigue strength of type 20 steel was investigated. The fatigue tests were carried out on thin-walled tubular smooth specimens and specimens containing a circular hole. The fatigue strength of specimens with stress concentrators was lower than that of smooth specimens. The effect of stress concentration on fatigue life of specimens was the largest on test base of 10^6 cycles. With the increase in the amplitude of stress this effect decreased and reduced to naught in the range of quasi-static fracture. The S-N approach as well as Neuber's rule and Glinka's rule were used in this study for fatigue life prediction for notched specimens in the range of low cycle fatigue. The Neuber's rule and S-N approach was found to correlate data well.

Keywords: fatigue strength, notch effect, S-N approach, type 20 steel, tubular specimens.

1. ГОСТ 1050-88 Прокат сортовой, калиброванный, со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали.- М.: Стандартформ, 2010. - 24 с.
2. ГОСТ 25.504-82 Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости. - М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1982. - 54 с.
3. Хейвуд Р.Б. Проектирование с учетом усталости / пер. с англ. Под ред. И.Ф. Образцова. М.: Машиностроение. 1969. - 504 с.
4. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984.-624 с.
5. H. Neuber. Theory of stress concentration for shear-strained prismatical bodies with arbitrary non-linear stress-strain law. Trans. ASME, J. Appl. Mech. 1961;28:544-50.
6. Molski, K. and Glinka, G. A method of elastic-plastic stress and strain calculation at a notch root. Mater. Sci. Engng, 1981, 50, 93–100.
7. Glinka, G. Energy density approach to calculation of inelastic strain–stress near notches and cracks. Engng Fracture Mechanics, 1985, 22(3), 485–508.
8. Glinka, G. Calculation of inelastic notch-tip strain–stress history under cyclic loading. Engng Fracture Mechanics 1985, 22(5), 839–854.
9. Shang DG, Yao WX, Wang DJ. A new approach to the determination of fatigue crack initiation size. Int J Fatigue 1998;20(9):683-7.

REFERENCES

1. ГОСТ 1050-88 Prokat sortovoj, kalibrovannyj, so special'noj otelkoj poverhnosti iz uglerodistoj kachestvennoj konstrukcionnoj stali (Carbon structural quality steel gauged bars with special surface finish. General specifications). Moscow: Standartform, 2010, 24 p.
2. ГОСТ 25.504-82 Raschety i ispytaniya na prochnost'. Metody rascheta harakteristik soprotivlenija ustalosti (Strength calculation and testing. Methods of fatigue strength behaviour calculation). Moscow: Gosudarstvennyj komitet SSSR po standartam, 1982, 54 p.
3. Hejvud R.B. Proektirovanie s uchetom ustalosti [Designing for fatigue], per. s angl. Pod red. I.F. Obrazcova. Moscow: Mashinostroenie, 1969, 504 p.
4. Kollinz Dzh. Povrezhdenie materialov v konstrukcijah. Analiz, predskazanie, predotvrazenie [Failure of materials in Mechanical Design]. per. s angl. Moscow: Mir, 1984, 624 p.
5. H. Neuber. Theory of stress concentration for shear-strained prismatical bodies with arbitrary non-linear stress-strain law. Trans. ASME, J. Appl. Mech. 1961;28:544-50.
6. Molski, K. and Glinka, G. A method of elastic-plastic stress and strain calculation at a notch root. Mater. Sci. Engng, 1981, 50, 93–100.
7. Glinka, G. Energy density approach to calculation of inelastic strain–stress near notches and cracks. Engng Fracture Mechanics, 1985, 22(3), 485–508.
8. Glinka, G. Calculation of inelastic notch-tip strain–stress history under cyclic loading. Engng Fracture Mechanics 1985, 22(5), 839–854.
9. Shang DG, Yao WX, Wang DJ. A new approach to the determination of fatigue crack initiation size. Int J Fatigue 1998;20(9):683-7.