

DOI: 10.31319/2519-2884.42.2023.8

УДК 621.771.074

Самохвал В.М., кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри металургії чорних металів та обробки металів тиском,

ORCID: 0000-0003-0585-7225

Email: volsamokhval@gmail.com

Стасько Є.В., аспірант кафедри металургії чорних металів та обробки металів тиском

Email: Chinchopara@gmail.com

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Samokhval Volodymyr, Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of the Department of Metallurgy of Ferrous Metals and Metalworking of Pressure,

Stasko Yevhen, Postgraduate Student

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ ВАЛКІВ НА МІЦНІСТЬ ВТОМИ

Метою роботи є вивчення особливостей розрахунку валків на міцність втоми за прогнозованим числом циклів навантажень. Розглянуто методику розрахунку основану на апроксимації кривих Велера для матеріалу валка степеневою залежністю Бескіна в межах зони багатоциклової втоми. Доведено, що така методика може використовуватись для валків з врахуванням виявлених особливостей, до яких відноситься обов'язкове врахування умов їх роботи через модифіковану границю витривалості матеріалу, дотримання умови, що робочі напруження перевищують модифіковану границю витривалості, але менші за допустимі напруження для матеріалу валка, врахування концентрації напружень в залежності від форми врізів, які утворюють калібри.

Ключові слова: міцність втоми; модифікована границя витривалості; багатоциклова втома; випробування на втому згинанням; концентрація напружень.

The aim of the work is to study the features of calculating the fatigue strength of rolls based on the predicted number of load cycles. The considered calculation method is based on the approximation of the Weller curves for the roll material by the Beskin power dependence within the high cycle fatigue zone. It has been proven that such a method can be used for rolls taking into account the identified features, which include the required consideration of their operating conditions due to the modified endurance limit of the material, compliance with the condition that the working stresses exceed the modified endurance limit, but are less than the permissible stresses for the material of the roll, taking into account the stress concentration depending on the shape of the grooves that form the passes.

Keywords: fatigue strength; modified endurance limit; high cycle fatigue; bending fatigue test; stress concentration.

Постановка проблеми

Валки прокатних станів, як основний технологічний інструмент, забезпечують виготовлення продукції заданої якості, визначають ефективність виробничих процесів та собівартість продукції. Тому в металургійній галузі завжди приділяли значну увагу удосконаленню технологій виготовлення, застосування та відновлення валків, а також удосконаленню розрахунків валків на міцність.

У сучасних умовах виробники валків пропонують широкий вибір, як матеріалів валків, так і їх властивостей. Виробничники в прокатних цехах, мають можливість вибору найбільш прийнятних, для відповідної технології, валкових матеріалів за постійно розширюваним переліком параметрів. До відносно нових параметрів, що характеризують властивості валків, відносять границю міцності на згинання (міцність на вигин, модуль руйнування, поперечна міцність

руйнування — TRS) [1], границю міцності втоми [2], фактор інтенсивності напружень (в'язкість руйнування) [3] та інші. Виробники валків, забезпечуючи конкурентоздатність своєї продукції, проводять відповідні випробування і прагнуть надати споживачам вичерпну інформацію про властивості виробів. Наприклад, в роботі [4] розглядаються чавунні валки, властивості серцевини яких (сірий високоміцний чавун з пластинчастим графітом) характеризуються такими показниками: границя міцності з випробувань на розтягування $200\text{—}350\text{ Н/мм}^2$; границя міцності з випробувань на осаджування $600\text{—}1000\text{ Н/мм}^2$; границя міцності на згинання $350\text{—}550\text{ Н/мм}^2$; напруження втоми при згинанні $100\text{—}130\text{ Н/мм}^2$. Ці показники властивостей відповідним чином змінюються при зміні хімічного складу, структури, форми графіту.

Вибір валків за окремими параметрами, відповідно до технологічних потреб певної кліти, є достатньо очевидним. Але, по мірі збільшення показників властивостей, виникає проблема їх узгодження для забезпечення оптимальності, а також використання комплексів показників для оцінки придатності до застосування та прогнозування термінів роботи валків. Зокрема, це стосується такого показника як границя витривалості, тобто напруження втоми. Відповідно, підвищення надійності методів розрахунків валків на міцність втоми є актуальною задачею як для науковців так і для технологів та фахівців валкового господарства прокатних цехів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Втома металу проявляється як «прогресуючі, локальні і постійні зміни структури, викликані повторюваними або змінними деформаціями, максимальні напруження від яких суттєво менші за границю міцності матеріалу» [5].

Відомі методики розрахунку міцності втоми валків, найбільш поширена з яких є описана в підручнику [6], передбачають визначення коефіцієнту запасу міцності від циклічно діючих нормальних та зсувних напружень. Згідно методики, коефіцієнти запасу міцності визначаються за граничними напруженнями втоми σ_{-1} та τ_{-1} , відповідно «при згинанні та крученні з симетричним циклом зміни напружень для зразків з гладкою поверхнею» [6]. В залежностях, рекомендованих методикою, враховуються амплітуди циклів напружень при згинанні та крученні, середні напруження циклів, коефіцієнти, що враховують асиметрію циклів напружень, масштабні фактори та наявність концентраторів напружень. Граничні напруження втоми визначають з співвідношень $\sigma_{-1} = (0,45 - 0,55) \cdot \sigma_B$; $\tau_{-1} = 0,6 \cdot \sigma_{-1}$. Рекомендовані значення допустимих коефіцієнтів запасу міцності втоми від спільної дії згинання та кручення становлять $1,3\text{—}2,5$.

З аналізу методики слідує, що вона дозволяє врахувати лише один показник властивостей матеріалу, а саме границю міцності. Граничні напруження втоми, як і вплив інших параметрів, визначають через емпіричні коефіцієнти. Такий розрахунок коефіцієнту запасу міцності втоми забезпечує лише приблизну оцінку витривалості матеріалу деталі до циклічних навантажень.

Незважаючи на оціночне визначення коефіцієнту запасу міцності втоми, така методика знаходить застосування і в наш час. Наприклад, в роботі [7] пропонуються удосконалення конструктивних елементів валків, ефективність яких підтверджується збільшенням коефіцієнту запасу міцності втоми.

За останні роки, по мірі розвитку теорії руйнування та удосконалення методів випробувань, значно зросли можливості визначення показників, що характеризують витривалість матеріалів до змінних навантажень. Зокрема, випробування на втому, як спеціалізована форма механічних випробувань, проводяться шляхом прикладання циклічного навантаження до спеціально виготовлених зразків методом розтягування, згинання або скручування [8, 9, 2]. За результатами таких випробувань будують так звані S-N діаграми, які відображають залежність числа циклів до руйнування зразка від напружень, що виникають в перерізах зразків від зовнішнього навантаження. Такі діаграми отримали назву криві Велера (August Woehler).

Для більшості конструктивних металів криві Велера, лінеаризовані шляхом побудови в логарифмічних або напівлогарифмічних координатах, мають дві точки перегину, які визначають три характерні області [10]. Перша область, яку називають зоною малоциклової втоми, через наближення діючих напружень до границі міцності, характеризується переважно пластичною деформацією. Напруження, що виникають в зразку від зовнішнього навантаження, менші за границю міцності металу, але перевищують границю плинності. Число циклів до руйнування

зразка за таких напружень не перевищує $1 \cdot 10^4$. Для другої області, як зони багатоциклової втоми, характерні пружні деформації. Рівень напружень в цій зоні менше за границю плинності металу, але механізм утворення та розповсюдження тріщин пов'язаний саме з пружними деформаціями. Число циклів до руйнування зразка для другої області для сталі та чавуну становить від $1 \cdot 10^6$ до $1 \cdot 10^7$. Для третьої області характерно збільшення числа циклів за постійного значення напружень — горизонтальна ділянка кривої. Значення напружень, за яких число циклів зростає без руйнування зразка, називають границею витривалості (endurance limit). Якщо максимальні напруження в деталі не перевищують границю витривалості матеріалу, така деталь матиме тривалий термін роботи за показниками втоми (infinite life). Для деяких металів третя область явно не виділяється, тоді для них встановлюється певне базове число циклів навантаження при випробуваннях, за яким визначають границю витривалості.

Для опису похилої ділянки S-N діаграми, в області багатоциклової втоми, використовують рівняння Бескіна (Basquin), яке визначає степеневу залежність між напруженнями та числом циклів [11]

$$\sigma_f = A(N_f)^b,$$

де N_f — число циклів навантаження до руйнування зразка; σ_f — напруження, які відповідають N_f ; A — коефіцієнт умовної втомної міцності; b — показник степені.

Сталі A та b визначають для певного матеріалу за результатами тестування на втому. При цьому стала A характеризує умовну напругу руйнування, а показник степені b — нахил лінії апроксимації залежності числа циклів від напружень. Значення цих сталих для найбільш поширених марок конструкційних сталей наведено в роботі [12]. Напруження, за яких число циклів дорівнює або перевищує прийняте базове число, називають границею витривалості.

В огляді [12] вказані основні фактори, які впливають на значення границі витривалості матеріалів. До основних таких факторів віднесено механічні властивості, розміри (масштабний фактор), стан поверхні та наявність концентраторів напружень. Також границя витривалості втоми суттєво залежить від схеми навантаження. Якщо прийняти границю витривалості при згинанні за одиницю, то для розтягування-стискання коефіцієнт становитиме 0,9, а для кручення — 0,58 [12]. Крім цього, виділено металургійні змінні, що визначають границю витривалості. До цієї групи змінних віднесено показники пластичності (ductility), чистоту металу (наявність неметалевих включень та інших неоднорідностей), наявність залишкових напружень, розмір зерен та особливості мікроструктури [12].

Отже, якщо робочі напруження в найбільш навантажених перерізах деталі не перевищують границі витривалості втоми, розрахунок втомної міцності не потрібен. Припускається, що втомне руйнування не відбудеться незалежно від кількості циклів навантаження, якщо ця кількість дорівнює або перевищує базове значення. Якщо робочі напруження перевищують границю витривалості, то в межах зони багатоциклової втоми може бути визначене прогнозоване число циклів навантаження деталі до її руйнування або утворення макротріщин, тобто до виходу з ладу за умовами втомної міцності.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є вивчення особливостей розрахунку валків на втому за прогнозованим числом циклів навантаження.

На відміну від відомої методики розрахунку коефіцієнту запасу втомної міцності, визначення прогнозованого числа циклів навантаження для валків є більш інформативним, що дозволяє обґрунтовано обирати матеріал валків для певних клітей станів довгомірного прокату. Методика визначення прогнозованого числа циклів навантаження досить поширена в машинобудуванні і враховує останні досягнення в теорії руйнування та визначенні механічних властивостей металів. Тому в роботі вирішується задача оцінки можливості застосування та вивчення особливостей такої методики для прокатних валків.

Виклад основного матеріалу

У процесі роботи валки прокатних станів, відповідно до функціонального призначення, сприймають навантаження від згинання та кручення.

Напруження від згинаючих моментів діють за симетричним (реверсивним) циклом. Тобто за кожен оборот валка напруження розтягування змінюються напруженнями стискання. Середнє напруження циклу навантаження дорівнює нулю $\sigma_m = 0$, амплітуда відповідає максимальному значенню напружень зі зміною знаку $\sigma_a = \sigma_{max}$, коефіцієнт асиметрії циклу $R = \sigma_{min}/\sigma_{max} = -1$.

Напруження від дії крутного моменту не мають явно виражених коливань по мірі обертання валка. Тобто при прокатуванні розкату ці напруження мають приблизно постійне значення з незначними коливаннями, обумовленими технологічними чинниками та характеристиками приводу. Тому такі напруження оцінюють за певним середнім значенням $\sigma_m \approx \sigma_{max}$ при мінімальній амплітуді $\sigma_a \rightarrow 0$ та $R \approx 1$. Але якщо прийняти за цикл навантаження прокатування одного розкату, то отримуємо пульсуючий режим.

До основних особливостей розрахунків валків на втому відноситься співвідношення напружень. При виконанні розрахунків для зони багатоциклової втоми S-N діаграм робочі напруження перевищують границю витривалості втоми але менші за границю плинності матеріалу. В розрахунках валків на статичну міцність приймають коефіцієнт запасу рівним п'яти. Тобто, робочі напруження не повинні перевищувати п'ятої частини границі міцності матеріалу валка. За таких умов робочі напруження в елементах валка можуть бути значно меншими за границю витривалості і розрахунок на втому не має сенсу. Наприклад, для валків, властивості яких наведено в роботі [4], робочі напруження, виходячи з п'ятикратного запасу міцності по мінімальному значенню границі міцності на згинання, не повинні перевищувати значення 70 Н/мм^2 , а границя витривалості матеріалу валків, за результатами випробувань на втому, дорівнює 100 Н/мм^2 . За такого співвідношення напружень розрахунок на міцність втоми не виконують, тому що робочі напруження, які повинні бути менші за 70 Н/мм^2 , є значно меншими за границю витривалості матеріалу валка.

Отже, розрахунки міцності втоми для валків можуть проводитись за умови, що робочі напруження в найбільш навантажених перерізах відповідають співвідношенню

$$[\sigma] > \sigma_w > \sigma_{mod} \quad (1)$$

Тобто, коли робочі напруження не перевищують допустимих напружень з умов статичної міцності та одночасно більші ніж границя витривалості матеріалу валка. Для вищенаведеного прикладу умова (1) не виконується.

Але практичні дані свідчать про наявні окремі випадки саме втомного руйнування валків [13]. Це протиріччя пояснюється впливом умов роботи валків на границю витривалості їх матеріалу, коли дійсне значення цього параметру значно менше за отримане з випробувань на втому. Значення параметру втомної міцності матеріалів, з врахуванням умов роботи деталі, називають модифікованою границею витривалості [11].

Основними чинниками, що призводять до зменшення границі витривалості для валків, є масштабний фактор, стан поверхні деталі, наявність концентраторів напружень. Відповідно, модифіковане значення границі витривалості може бути представлене у вигляді [11].

$$\sigma_{mod} = \sigma_{-1} \cdot C_{size} \cdot C_{surf} \cdot C_{conc} \quad (2)$$

де σ_{-1} — границя витривалості матеріалу валків за результатами випробувань; C_{size} — коефіцієнт, що відображає вплив розмірів валків; C_{surf} — коефіцієнт, що відображає вплив якості поверхні валків; C_{conc} — коефіцієнт, що відображає вплив концентрації напружень.

Діаметри валків типових станів довгомірного прокату змінюються у межах 280—650 мм. При проведенні випробувань на втому розміри зразків призначають набагато меншими. Наприклад, стандартом [14] для проведення випробувань на втому при згинанні рекомендовано призначати діаметри робочих ділянок гладких зразків 6,0; 7,5 або 9,5 мм. Відомо застосування зразків з іншими значеннями діаметру робочої ділянки. Наприклад, в роботі [15] випробування втоми виконували на зразках з мінімальним діаметром 5,2 мм, а в роботі [16] значення мінімального діаметру зразків становило 10 мм. Зрозуміло, що значення границі витривалості за результатами випробувань потрібно скоригувати відповідно до масштабного фактору.

Для врахування впливу розмірів валків на границю витривалості можуть бути використані рекомендації [11], у вигляді залежності

$$C_{size} = 1,189 \cdot D^{-0,097}. \quad (3)$$

Згідно цієї залежності для всього діапазону зміни діаметрів валків станів довгомірного прокату, отримуємо значення коефіцієнту впливу розмірів від 0,69 до 0,63. Можливо використання середнього значення цього коефіцієнту 0,66.

Значення коефіцієнту впливу якості поверхні, за рекомендаціями [11], для валків з границею міцності від 400 до 1200 Н/мм² і шорсткості поверхні $R_a \approx 6,4$ мкм змінюється від 0,94 до 0,64. При цьому, по мірі збільшення границі міцності матеріалу валків значення коефіцієнту зменшуються. Графічна залежність цього коефіцієнту від границі міцності матеріалу за наведеної шорсткості, може бути апроксимована виразом

$$C_{surf} = 1,087 - 0,0004\sigma_u. \quad (4)$$

При збільшенні шорсткості поверхні валків, наприклад від утворення та поглиблення сітки розгару, значення коефіцієнту пропорційно зменшуються.

Коефіцієнт, що враховує вплив концентрації напружень, може бути визначений емпіричним шляхом. Зокрема, значною мірою він визначається формою врізів валків, що утворюють калібр. Зрозуміло, що для врізів, які утворюють овальні або круглі калібри, цей коефіцієнт буде близьким до одиниці, а для врізів кутових або балочних калібрів цей коефіцієнт буде значно менше одиниці. В першому наближенні може бути рекомендований такий ряд значень цього коефіцієнту: овальні калібри — 1,0; ящичні та круглі — 0,95; ромбічні — 0,9; діагональний квадрат — 0,85; врізи верхніх валків кутових калібрів — 0,75 ÷ 0,85; балочні калібри — 0,7 ÷ 0,8. Наведені значення потребують уточнення за результатами аналізу даних втомного руйнування валків певного стану.

За відсутності показника границі витривалості матеріалу, отриманого з випробувань на втому згинанням, його можна визначити з практичних рекомендацій через границю міцності матеріалу. Так в підручнику [11] пропонується використовувати співвідношення

$$\sigma_{-1} = X \cdot \sigma_u, \quad (5)$$

де σ_u — границя міцності матеріалу; X — множник, що визначає співвідношення між границею міцності та витривалості.

Для сталі значення множника X змінюється у межах від 0,35 до 0,6. Для сталевих валків може бути використане значення 0,5. Для чавуну цей показник змінюється від 0,35 до 0,5. Рекомендується використовувати значення 0,4.

Границя витривалості матеріалу при навантаженні валків крутним моментом, також може бути визначена через границю міцності

$$\tau_{-1} = \sigma_{-1} \cdot C_{load} = X \cdot \sigma_u \cdot C_{load}, \quad (6)$$

де C_{load} — коефіцієнт, що враховує вид навантаження.

Значення коефіцієнту C_{load} при навантаженні крутним моментом, за даними [11], становить 0,59.

Для визначення прогнозованого числа циклів навантаження валків використаємо методику, викладену в [17, 18, 11]. Всі методики основані на використанні рівняння Бескіна в межах зони багатоциклової втоми.

Щоб визначити сталі рівняння Бескіна для певного матеріалу валка, визначимо межі зміни числа циклів та відповідні їм напруження. Припускаємо, що зона багатоциклової втоми на S-N діаграмі обмежена числом циклів від $N_p=1 \cdot 10^3$ до $N_e=5 \cdot 10^6$. Напруження для нижньої границі числа циклів визначаємо з співвідношення

$$\sigma_{-1(1000)} = 0,9 \cdot \sigma_u. \quad (7)$$

Модифіковану границю витривалості матеріалу валка приймаємо як напруження для верхньої границі числа циклів.

Логарифмуючи рівняння Бескіна для наведених значень числа циклів і напружень, отримуємо систему рівнянь

$$\begin{aligned} \log(\sigma_{-1(1000)}) &= \log(A) + B \cdot \log(N_p) \\ \log(\sigma_{mod}) &= \log(A) + B \cdot \log(N_e) \end{aligned}$$

З розв'язку системи рівнянь визначаємо показник степені рівняння Бескіна

$$B = \frac{\log(\sigma_{mod}) - \log(0,9 \cdot \sigma_u)}{4,7} \quad (8)$$

Сталу A обчислюємо з використанням логарифмованого рівняння Бескіна для верхньої границі числа циклів

$$A = \frac{\sigma_{mod}}{10^{6,7 \cdot B}} \quad (9)$$

Після визначення сталих, рівняння Бескіна можна використовувати для прогнозування числа циклів навантаження валка напруженнями від дії згинаючого моменту. Вираз для визначення числа циклів має вид [11]

$$N = \left(\frac{\sigma}{A}\right)^{\frac{1}{B}} \quad (10)$$

Робочі напруження, відповідно до умови (1), повинні перевищувати границю витривалості матеріалу валка σ_{mod} і не перевищувати допустимих напружень за умовами статичної міцності,

Наприклад, для чавунних валків, властивості яких наведено в роботі [4], допустимі напруження за п'ятикратного запасу відносно границі міцності на згинання, як зазначено вище, становлять 70 Н/мм^2 , границя витривалості матеріалу валків за результатами випробувань на втому становить 100 Н/мм^2 .

За відсутності цього показника властивостей його можна визначити за емпіричними співвідношеннями. Так як границя міцності матеріалу валків з випробувань на розтягування, за даними [4], змінюється у межах $200\text{—}350 \text{ Н/мм}^2$, то для чавунних валків отримуємо

$$\sigma_{-1} = 0,4 \cdot (200 \div 350) = 80 \div 140 \text{ Н/мм}^2.$$

Фактичне значення цього параметру за результатами випробувань на втому потрапляє у визначений діапазон. При постачанні валків виробники наводять значення границі міцності з випробувань на розтягування для певної партії валків, тобто використовується актуальне значення цього параметру, а не можливий діапазон значень. Використовуючи це значення завжди можна визначити границю витривалості матеріалу валків. Для подальших розрахунків приймаємо $\sigma_{-1} = 100 \text{ Н/мм}^2$.

Для визначення модифікованого значення границі витривалості обчислюємо коефіцієнти впливу умов роботи валків. Коефіцієнт, що відображає вплив розмірів, для валків діаметром 400 мм , згідно виразу (3) дорівнює

$$C_{size} = 1,189 \cdot 400^{-0,097} = 0,665;$$

Коефіцієнт якості поверхні, за умови що шорсткість R_a близька до $6,4 \text{ мкм}$ (вираз (4)), становитиме

$$C_{surf} = 1,087 - 0,0004 \cdot 350 = 0,947.$$

Модифікована границя витривалості матеріалу валків, без врахування концентрації напружень у врізах, згідно виразу (2) буде дорівнювати

$$\sigma_{mod} = 100 \cdot 0,665 \cdot 0,947 \cdot 1 = 62,9 \text{ Н/мм}^2.$$

Розраховане значення модифікованої границі витривалості менше за допустимі напруження. Якщо робочі напруження в перерізах валка знаходяться в діапазоні від $62,9$ до 70 Н/мм^2 , тобто виконується умова (1), можливий розрахунок втомної міцності, який зводиться до визначення прогнозованого числа циклів навантажень.

Для такого розрахунку попередньо визначають сталі рівняння Бескіна в зоні багаточислового навантаження даного матеріалу валка.

Враховуючи, що границя міцності матеріалу валка з випробувань на згинання становить 350 Н/мм^2 , сталі рівняння Бескіна будуть дорівнювати

$$B = \frac{\log(62,9) - \log(0,9 \cdot 350)}{4,7} = -0,149;$$

$$A = \frac{62,9}{10^{6,7 \cdot (-0,149)}} = 626,5 \text{ Н/мм}^2$$

Якщо робочі напруження в елементах валка, відповідно до умови $[\sigma] > \sigma_w > \sigma_{mod}$, дорівнюють, наприклад 65 Н/мм^2 , то прогнозоване число циклів навантажень становитиме

$$N = \left(\frac{65}{626,5} \right)^{-0,149} = 4\,018\,600.$$

За прогнозованим числом циклів навантажень можна визначити термін роботи валка в годинах. Наприклад, якщо швидкість прокатування в кліті становить 7 м/с, то валки, що розглядаються, матимуть частоту обертання 334 об/хв. або 20040 об/год. Термін роботи таких валків визначаємо з співвідношення

$$t_w = \frac{N}{n_{r-h}}, \quad (11)$$

де n_{r-h} — частота обертання валків за годину.

Для прикладу, що розглядається, отримуємо

$$t_w = \frac{4018600}{20040} = 200 \text{ годин.}$$

По мірі зменшення робочих напружень і наближення їх до модифікованої границі витривалості матеріалу валка, число циклів буде зростати, наближаючись до прийнятої верхньої межі у $5 \cdot 10^6$ циклів. Якщо робочі напруження в перерізах валка будуть менші за модифіковану границю витривалості втомки, розрахунок прогнозованого числа циклів не виконують, так як це число буде перевищувати базове значення у $5 \cdot 10^6$ циклів.

Отримане за наведеною методикою прогнозоване число циклів навантажень має ймовірнісний характер з надійністю 50%. Це означає, що при побудові кривих Велера використовуються середні значення кількості циклів навантаження для певного рівня напружень. Для підвищення надійності визначення прогнозованого числа циклів в роботі [11] пропонується додатковий множник в залежності з визначення модифікованої границі витривалості. Для звичайної точності (надійність 50%) коефіцієнт $C_R = 1,0$; для забезпечення надійності у 90% $C_R = 0,897$; для надійності у 95% $C_R = 0,868$.

Отже, методика визначення прогнозованого числа циклів навантаження, основу якої складають вирази (1)—(10), може бути використана для валків прокатних станів.

Висновки

Сучасні методики визначення властивостей матеріалів та розрахунків втомної міцності дозволяють з достатньою точністю визначати не лише коефіцієнт запасу втомної міцності, а й прогнозоване число циклів навантажень до вірогідного руйнування деталі.

Відповідно до функціонального призначення, в валках прокатних станів діють напруження від згинаючих моментів, які змінюються за симетричним циклом, та напруження від крутних моментів, які мають пульсуючий цикл зміни. Тому однією з особливостей розрахунку валків на втому є перевищення числа циклів навантаження напруженнями згинання над числом циклів навантаження напруженнями від кручення.

Запропоновано для валків використовувати методику визначення прогнозованого числа циклів навантаження, яка оснований на апроксимації кривих Велера для матеріалу валка степеневою залежністю Бескіна в межах зони багатоциклової втомки.

До особливостей розрахунків втомної міцності валків прокатних станів відноситься використання модифікованої границі витривалості, що передбачає врахування впливу на показник, отриманий з випробувань на втому, таких факторів як розміри, якість поверхні, наявність концентраторів напружень.

Розрахунки втомної міцності валків виконують за умови, що робочі напруження перевищують модифіковану границю витривалості, але менші за допустимі напруження для матеріалу валка.

Для підвищення точності розрахунків втомної міцності валків потрібен постійний моніторинг та аналіз причин поломок валків. Зокрема, для розрахунків втомної міцності такі практичні дані необхідні для уточнення коефіцієнтів концентрації напружень в залежності від форми врізів калібрів.

Список використаної літератури

1. Flexural strength. URL: Flexural strength - Wikipedia
2. Boyer H.E. Fatigue Testing. *ASM International*. 1986. 10 p. URL: https://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/06156G_Sample.pdf
3. Metallurgy for Dummies. Toughness. 2023. URL: Toughness | Metallurgy for Dummies
4. Mahato M.M., Sinha S.N. Studies on the influence of different grades rolls on microstructure properties correlation and process economics in hot rolling. Proceedings of Seminar on Resurgence of Metallic Materials the Current Scenario (ROMM-2002), 24-25, October 2002, National Metallurgical Laboratory (CSIR), Jamshedpur. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/297713402.pdf>
5. Boardman B. Fatigue Resistance of Steels. *ASM Handbook*. 1990. Vol. 1. P. 673–688.
6. Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3-х томах. - Т. 3. Машины и агрегаты для производства и отделки проката [Учебник для вузов]. А.И. Целиков, П.И. Полухин, В.М. Гребеник и др. М.: Металлургия. 1981. 576 с.
7. Zhang J., Wang X., Liu H., Yang Q., Xu D. Analysis of Fatigue Fracture and Strength Improvement Backup Rolls. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 772 (2020) 012068. 2020. 7 p. DOI:10.1088/1757-899X/772/1/012068.
8. Pisanski H., Moore P., Hutchison E., Horn A. British standard single edge notch tension testing (BS8571). TWI. 2013. URL: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/development-of-a-british-standard-single-edge-notch-tension-test-method-bs8571>
9. Drobne M., Guncz P., Glodeň S. Fatigue behavior of high chromium steel for rolls. *Procedia Engineering* 10 (2011). P. 1202–1207. doi:10.1016/j.proeng.2011.04.200
10. What is SN-Curve? Siemens. 2019. URL: <https://community.sw.siemens.com/s/article/what-is-a-sn-curve>.
11. Steward C.M. Fatigue Analysis for Extreme Environments. Presentation MERG University of Texas at Al Paso. 2021. 97 p. URL: FATIGUE ANALYSIS - MERG @ UTEP
12. Boardman B. Fatigue Resistance of Steels. *ASM Handbook*. Vol. 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys. 1990. p. 673 – 688. URL: (29) Fatigue Resistance of Steels | Viktor Salivon - Academia.edu. DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v01.a0001038>.
13. Domazet Z., Luksa F., Krstulovac-Opara L. Failure analysis of the rolls with grooves. *Engineering Power*. 2020. Vol. 15(1). P. 8 - 13. URL: <https://hrcak.srce.hr/file/346313>
14. ISO 1143:2021 Metallic materials – Rotating bar bending fatigue testing.
15. Celik A., Arslan Y., Yetim A.F., Efeoglu I. Fatigue behavior of duplex treated AISI 316L stainless steel. *Kovove Mater*. 2007. 45. p. 35 – 40. URL: https://www.researchgate.net/publication/280254245_Fatigue_behaviour_of_duplex_treated_AISI_316L_stainless_steel.
16. Akay S.K., Yazici M., Bayram A., Avinc A. Fatigue life behavior of the duai-phase low carbon steel sheets. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009(7). p. 3358–3365. DOI:10.1016/j.jmatprotec.2008.07.038.
17. Sengupta. Design for finite life. URL: https://web.njit.edu/~sengupta/met%20301/cyclic_loading%20finite.pdf
18. Schaldenbrand P. Fatigue Damage Spectrum. Siemens Community. 2022. URL: <https://community.sw.siemens.com/s/article/Fatigue-Damage-Spectrum>.

FEATURES OF THE CALCULATION OF ROLLS ON THE FATIGUE STRENGTH

Abstract

On modern rolling mills, manufacturers have the possibility to use a wide range of materials with technologically determined properties, which allows for effective use of rolls and improvement of technical and economic indicators of production processes. Reasonable choice of materials and prop-

erties of rolls is impossible without reliable methods of calculating the strength and predicting the service life of the rolls. In particular, increasing of the reliability of methods for calculating the fatigue strength of rolls is an urgent task, both for scientists and for technologists and specialists of rolling mills.

The purpose of the work is to study the features of fatigue calculation of rolls based on the predicted number of load cycles. The work solves the problem of assessing the possibility of applying a known method of determining the predicted number of load cycles and studying the features of such a method for rolls of rolling mills.

The method of calculation based on the approximation of Woehler curves for the roll material by Beskin's power dependence within the zone of high cycle fatigue, which was determined by the number of cycles from $1 \cdot 10^3$ to $5 \cdot 10^6$, was considered. It has been proven that such a technique can be used for rolls into account the identified features. The main features of the calculation of rolls for fatigue strength include: a symmetrical cycle of changes in bending stresses and a pulsating cycle of changes in torsional stresses; mandatory consideration of working conditions due to the modified endurance limit of the material; compliance with the condition that the working stresses exceed the modified endurance limit, but are less than the admissible stresses for the roll material; taking into account the stress concentration depending on the shape of the grooves that form the passes. Consider influence the effect of stress concentration in the grooves of the rolls requires clarification based on empirical data of a certain rolling mill.

The application of the fatigue calculation method for rolls, with consider the identified features, will allow to increase the accuracy of determining the predicted terms of operation of the rolls and determining their consumption.

References

- [1] *Flexural strength*. URL: Flexural strength - Wikipedia
- [2] Boyer H.E. (1986) *Fatigue Testing*. ASM International. 10 p. URL: https://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/06156G_Sample.pdf
- [3] *Metallurgy for Dummies. Toughness*. (2023) URL: Toughness | Metallurgy for Dummies
- [4] Mahato M.M., Sinha S.N. (2002) *Studies on the influence of different grades rolls on micro-structure properties correlation and process economics in hot rolling*. Proceedings of Seminar on Resurgence of Metallic Materials the Current Scenario (ROMM-2002), 24-25, October 2002, National Metallurgical Laboratory (CSIR), Jamshedpur. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/297713402.pdf>
- [5] Boardman B. (1990) *Fatigue Resistance of Steels*. ASM Handbook. Vol. 1. P. 673 – 688.
- [6] *Mashyniyahrehaty metallurhycheskykh zavodov. V 3-kh tomakh. - T. 3. Mashyniyahrehaty dlia proyzvodstva i otdelky prokata: Uchebnykh dlia vuzov*. (1981) [Machines and units of metallurgical plants. In 3 volumes. - T. 3. Machines and units for the production and finishing of rolled products: Textbook for universities]. A.I. Tselykov, P.I. Polukhyn, V.M. Hrebenykyand others. M.: Metallurhiya. 576 p. (In Russian)
- [7] Zhang J., Wang X., Liu H., Yang Q., Xu D. (2020) *Analysis of Fatigue Fracture and Strength Improvement Backup Rolls*. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 772 (2020) 012068. 7 p. DOI:10.1088/1757-899X/772/1/012068.
- [8] Pisarski H., Moore P., Hutchison E., Horn A. (2013) *British standard single edge notch tension testing (BS8571)*. TWI. URL: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/development-of-a-british-standard-single-edge-notch-tension-test-method-bs8571>
- [9] Drobne M., Göncz P., Glodež S. (2011) *Fatigue behavior of high chromium steel for rolls*. Procedia Engineering 10. P. 1202–1207. DOI:10.1016/j.proeng.2011.04.200
- [10] *What is SN-Curve?* (2019) Siemens. URL: <https://community.sw.siemens.com/s/article/what-is-a-sn-curve>
- [11] Steward C.M. (2021) *Fatigue Analysis for Extreme Environments*. Presentation MERG University of Texas at El Paso. 97 p. URL: FATIGUE ANALYSIS - MERG @ UTEP
- [12] Boardman B. (1990) *Fatigue Resistance of Steels*. ASM Handbook. Vol. 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys. p. 673 – 688. URL: (29) Fatigue

- Resistance of Steels | Viktor Salivon - Academia.edu. DOI:
<https://doi.org/10.31399/asm.hb.v01.a0001038>.
- [13] Domazet Z., Luksa F., Krstulovac-Opara L. (2020) *Failure analysis of the rolls with grooves*. Engineering Power. Vol. 15(1). P. 8 - 13. URL: <https://hrcak.srce.hr/file/346313>
 - [14] ISO 1143:2021 *Metallic materials – Rotating bar bending fatigue testing*.
 - [15] Celik A., Arslan Y., Yetim A.F., Efeoglu I. (2007) *Fatigue behavior of duplex treated AISI 316L stainless steel*. Kovove Mater. 45. p. 35 – 40. URL:
https://www.researchgate.net/publication/280254245_Fatigue_behaviour_of_duplex_treated_AISI_316L_stainless_steel.
 - [16] Akay S.K., Yazici M., Bayram A., Avinc A. (2009) *Fatigue life behavior of the dual-phase low carbon steel sheets*. Journal of Materials Processing Technology. V.7. p. 3358 – 3365. DOI:10.1016/j.jmatprotec.2008.07.038.
 - [17] Sengupta. *Design for finite life*. URL:
https://web.njit.edu/~sengupta/met%20301/cyclic_loading%20finite.pdf
 - [18] Schaldenbrand P. (2022) *Fatigue Damage Spectrum*. Siemens Community. URL:
<https://community.sw.siemens.com/s/article/Fatigue-Damage-Spectrum>.

Надійшла до редколегії 22.03.2023