

УДК 621.771:514.18

Явтушенко Олександр Вікторович, завідувач кафедри, доктор технічних наук

Проценко Віктор Максимович, доцент, кандидат технічних наук

Корнілов Олексій Олегович, магістрант

РОЗРАХУНОК ВАЛКІВ ПРОКАТНИХ СТАНІВ НА МІЦНІСТЬ І ДЕФОРМАЦІЮ У ПРОГРАМНОМУ КОМПЛЕКСІ «AUTOCAD MECHANICAL»

Запорізька державна інженерна академія

Розглянуто можливості геометричного моделювання валків прокатних станів і виконання розрахунків на міцність і деформацію в програмному комплексі «AutoCAD Mechanical 2018». Побудовано розрахункову схему й епюри згинальних моментів і напружень валка блюмінгу. Визначено небезпечні перетини і коефіцієнти запасу статичної міцності та міцності на втому в цих перетинах. Порівняння результатів, отриманих в «AutoCAD Mechanical», з розрахунковими літературними даними показало їх відповідність. Методом скінченних елементів (МСЕ) виконано оцінку напружено-деформованого стану валка та визначено зони високих локальних напружень на його поверхні. Показано, що програмний комплекс «AutoCAD Mechanical 2018» можна застосовувати під час розрахунків валків робочих клітей прокатних станів.

Ключові слова: прокатна кліть, валок, міцність, деформація, генератор, метод скінченних елементів

Вступ. У процесі вивчення дисципліни «Обладнання цехів обробки металів тиском» однією з головних задач є оволодіння здатністю математичного моделювання складальних одиниць обладнання з виконанням необхідних розрахунків і наступною розробкою технічної документації, застосовуючи одночасно сучасні комп'ютерні технології. Це дозволяє всебічно вивчати поведінку частин обладнання у процесі їх розробки, аналізувати геометрію, виконувати інженерні розрахунки з отриманням фотореалістичних зображень.

Питанню автоматизації комп'ютерного моделювання присвячено значну кількість робіт [1-4]. Розглядаються можливості автоматизації графічного моделювання у програмних комплексах «КОМПАС-3D», «AutoCAD Mechanical», «Autodesk Inventor», «ABAQUS» тощо, що надають інструменти проектування на основі правил і засобів автоматизації, які прискорюють процес і дозволяють користувачам концентруватися на реалізації проектного задуму. На базі функціональних вимог до виробу системи САПР автоматично створюють інтелектуальні компоненти, надаючи можливість економити час проектувальника та здійснювати перевірку моделей без випробування дослідних зразків.

Дані, що наведено у літературі, в основному відносяться до моделювання валів редукторів, важелів, кулачків та інших деталей машин.

Постановка задачі. Метою роботи є дослідження можливості геометричного моделювання валків прокатних станів і виконання розраху-

нків на міцність і деформацію у програмному комплексі «AutoCAD Mechanical 2018» [5].

Прокатні валки є змінним робочим і технологічним інструментом прокатних станів, що значною мірою визначає продуктивність зазначених агрегатів, якість прокату, стабільність технології, енергоємність і безаварійність процесу прокатки.

Під час визначення міцності валок розглядають як двоопорну балку, що навантажено силою прокатки та крутним моментом, який призводить до появи у його тілі нормальних і дотичних напружень. Розрахунковий коефіцієнт запасу міцності n повинен перевищувати його допустиме значення $[n]$:

$$n = \frac{\sigma_B}{\sigma} \geq [n] \quad \text{або} \quad n = \frac{\tau_B}{\tau} \geq [n], \quad (1)$$

де σ_B, τ_B – межа міцності матеріалу валка за нормальними та дотичними напруженнями, МПа, відповідно, σ, τ – розрахункове нормальне та дотичне напруження, МПа, відповідно.

Допустиме значення коефіцієнта запасу міцності для всіх деталей прокатної кліті, окрім станини, приймають рівним 5, а для станини, як найбільш відповідального елемента прокатного стана – 10 [6-8].

Напруження згину в бочці валка визначають за формулою [6]:

$$\sigma_{згин} = \frac{M_{згин}}{W_{\sigma}} = \frac{M_{згин}}{0,1D^3}, \quad (2)$$

де $M_{згин}$ – згинальний момент, що діє у перетині, який розглядають, МН·м; W_{σ} – момент опору поперечного перетину бочки валка на вигин, м³; D

– діаметр бочки валка, м, у перетині, що розглядають.

Для каліброваних валків до наведених формул необхідно підставити значення максимального згинального моменту, для чого слід визначити згинальні моменти, які діють під час прокатування у різних калібрах.

Методика дослідження. Створимо розрахункову модель і виконаємо розрахунок на міцність і деформацію валка блюмінгу 1150, використовуючи вихідні дані, що наведено у роботі [6, приклад 16, стор. 107].

Розрахункову схему валка блюмінгу, із зазначенням розмірів і навантажень, подано на рис. 1. Під час прокатування слябів у другому калібрі (на гладкій бочці) зусилля прокатки є максимальним і становить $P_2 = 17$ МН. У калібрах 1, 3, 4 і 5 прокатують блюми відповідно з перетином 350×350 , 300×300 , 250×250 і 200×200 мм; найбільші зусилля при цьому будуть у калібрі 1 – $P_1 = 10$ МН і калібрі 3 – $P_3 = 8$ МН. Оскільки навантаження на валок у різних калібрах під час прокатування є різним, то розрахунки виконують окремо для кожного калібру.

На першому етапі розв’язання задачі за схемою на рис. 1 (або за компоувальним кресленням) виконує 2D модель валка за допомогою генератора валів «AutoCAD Mechanical».

На другому етапі за допомогою діалогового вікна «Розрахунок валу» виконують розрахунок валка. Вихідними даними для нього є момент крутіння на валку та сили, що діють на валок у вертикальній площині під час прокатування у різних калібрах.

Генератор валів автоматично обчислює реакції опор і буде епюри згинальних моментів і напружень. Розрахунок на міцність виконують відповідно до німецького стандарту DIN 743. Як матеріал валка вибрано вуглецеву сталь з підвищеним вмістом хрому та марганцю 50 ХН, що має межу текучості $\sigma_T = 600$ МПа і межу міцності $\sigma_B = 800$ МПа (аналог сталі 34CrAlMo5 за стандартом DIN, що використовують у програмі «AutoCAD Mechanical»).

Результати досліджень. Результати розрахунків реакцій опор, згинальних моментів і напружень валка блюмінгу подано на рис. 1. За отриманими епюрами визначають небезпечні перетини валка – у калібрі 3 під час прокатування у калібрі 2 (перетин 8) і у шийці валка на галтелі (у місці з’єднання шийки та бочки валка, перетин 7). За необхідності уточнюють геометрію валка. Одночасно генератор валів автоматично перераховує всі дані. На завершальному етапі виконують робоче креслення валка.

Порівнюючи розрахункові дані, які наведено в літературі [6], з обчисленими значеннями у програмному комплексі «AutoCAD Mechanical» можна переконатися, що згинальні моменти у перетинах 1, 2 і 3 повністю співпадають з даними роботи [6], а напруження також мають близькі значення. Так, у роботі [6] зазначається, що максимальне напруження згину зафіксовано у перетині 3 і дорівнює 130 МПа. Нами отримано значення $\sigma_{згин} = 133,1$ МПа (рис. 1), причому максимальне напруження буде у перетині 8, що становить 147,5 МПа.

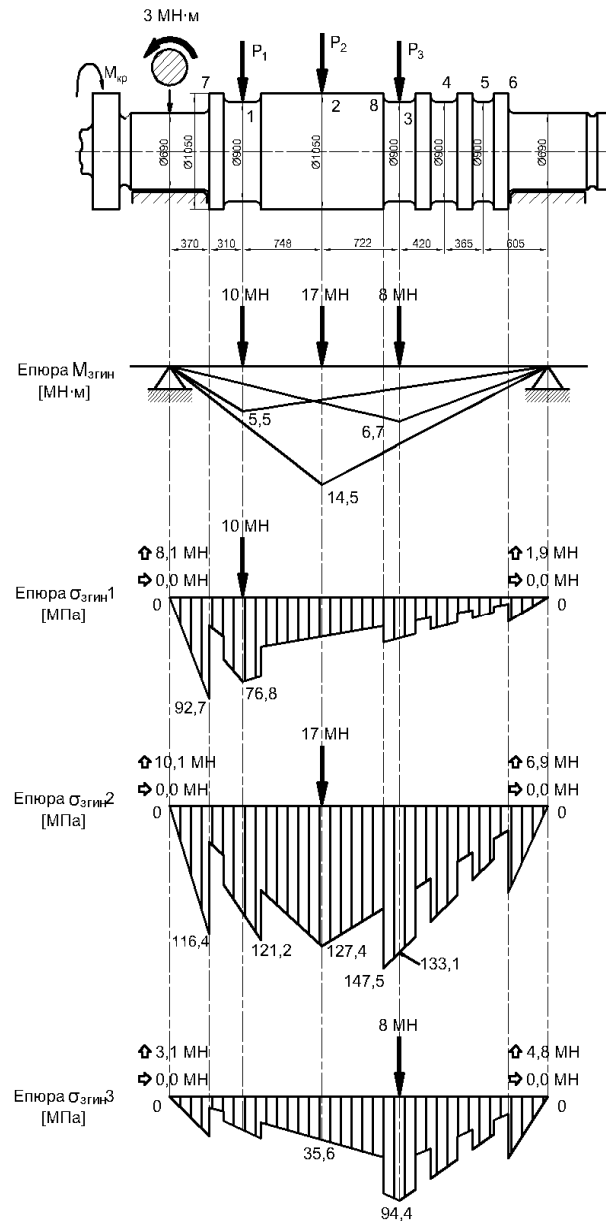
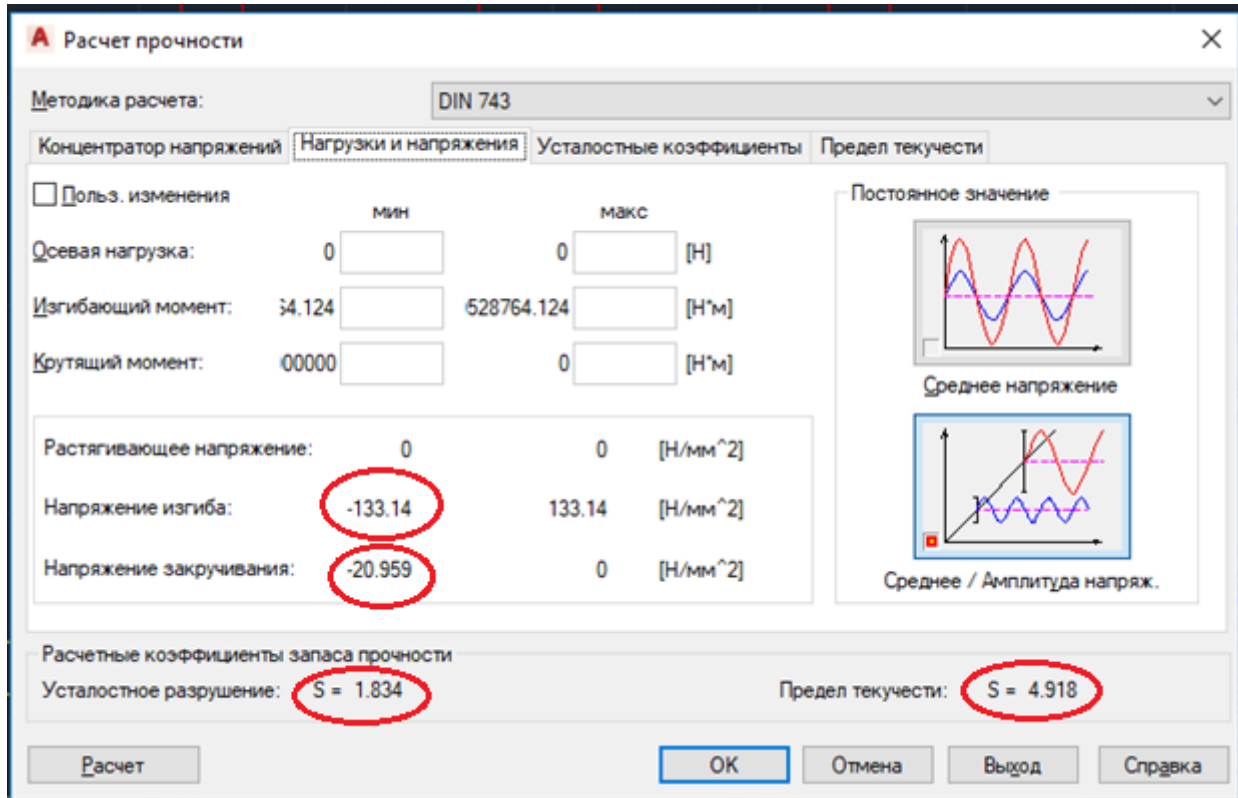
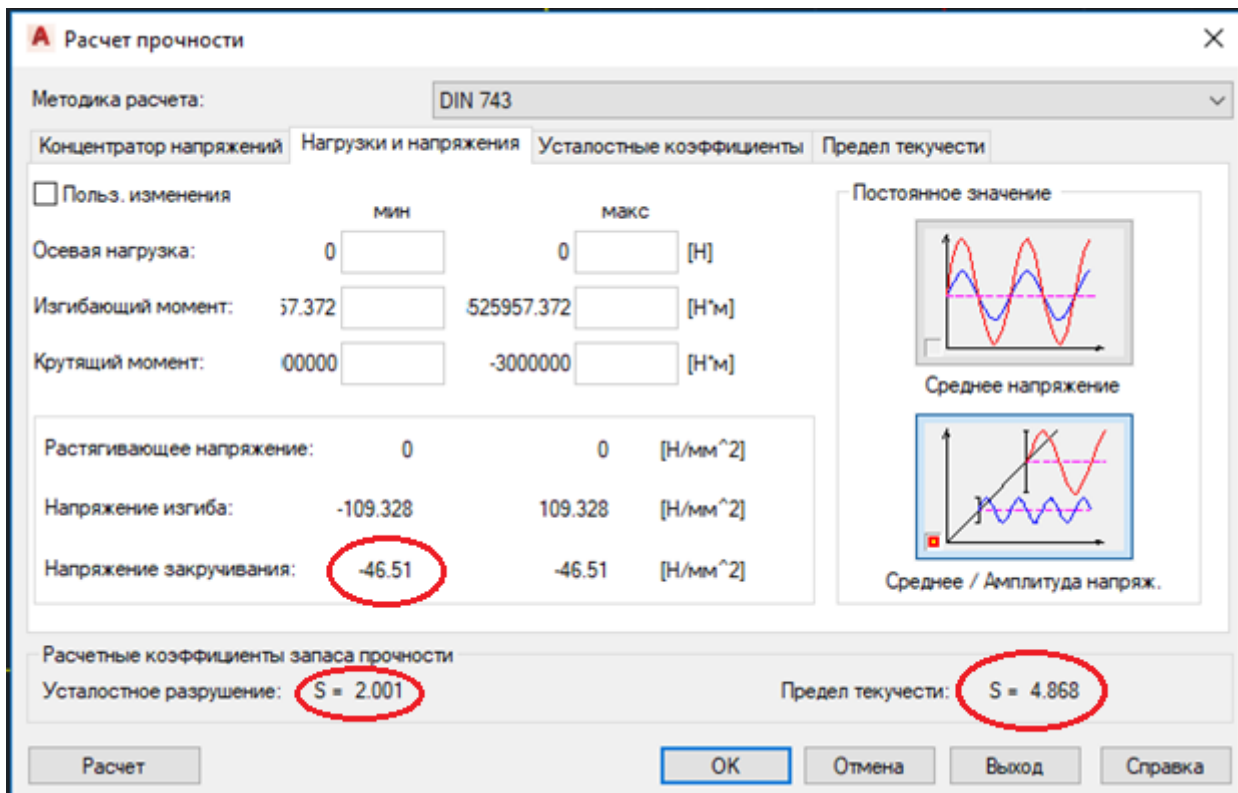


Рисунок 1 – Розрахункова схема й епюри згинальних моментів і напружень валка блюмінгу під час прокатування у калібрах 1-3



a



б

Рисунок 2 – Діалогові вікна програмного комплексу «AutoCAD Mechanical» під час розрахунків міцності валка блюмінгу в перетинах 3 (а) і 7 (б)

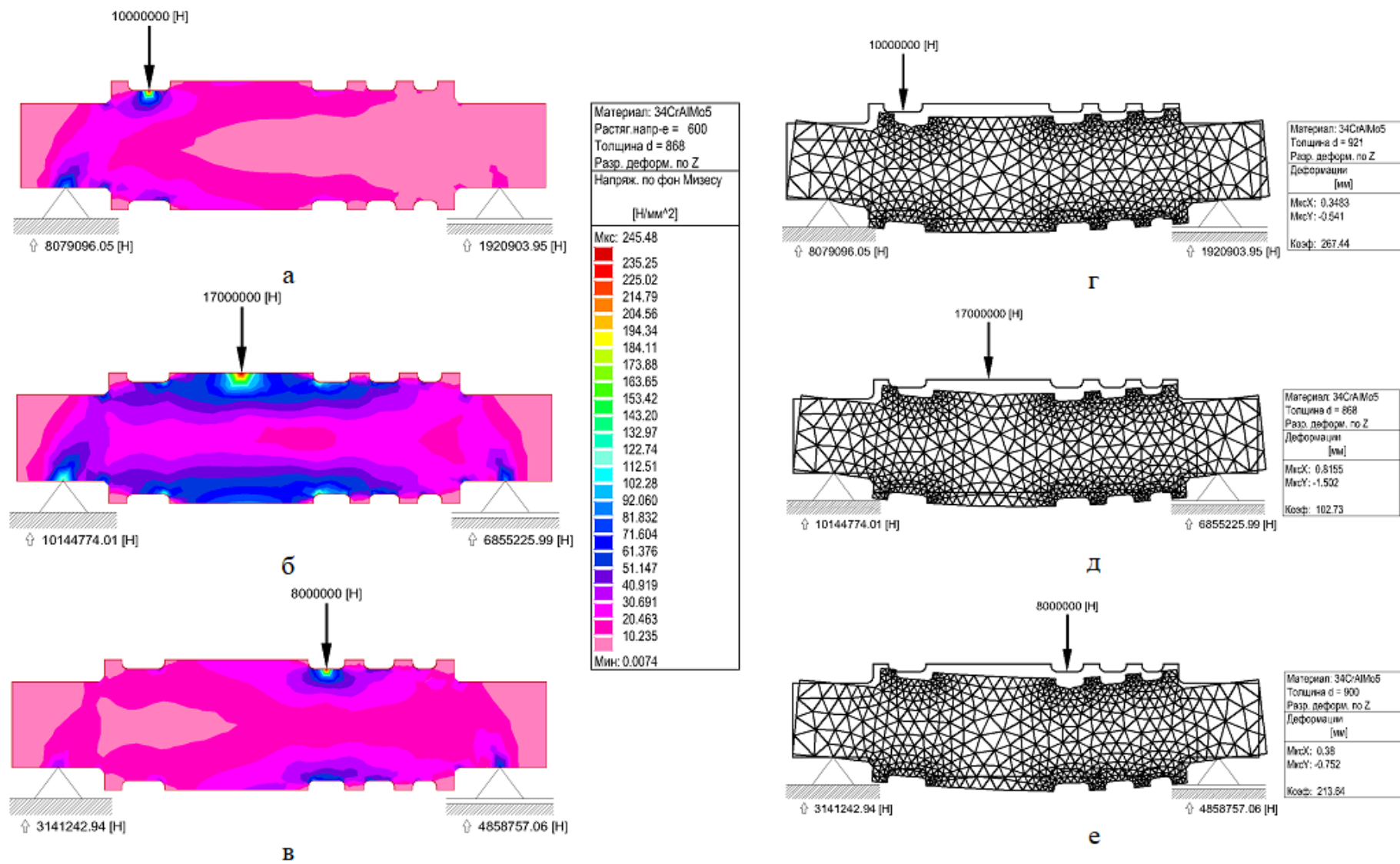


Рисунок 3 – Розрахунок методом скінчених елементів напружень валка блюмінгу за прокатуванням заготовки у калібрах 1, 2, 3 (відповідно позиції а, б, в і деформацій валка (відповідно позиції г, д, е))

Слід зазначити, що розрахунки напружень у програмному комплексі «*AutoCAD Mechanical*» мають більш точні значення, оскільки враховують усі змінювання діаметру валка, на відміну від розрахунків без використання комп'ютера [6], що також видно під час порівняння епюр рис. 1 і рис. III.5 [6].

Програмний комплекс «*AutoCAD Mechanical*» має можливість враховувати під час розрахунків міцності значну кількість концентраторів напружень, різноманітних коефіцієнтів, меж міцності, плинності та втоми за симетричних і несиметричних циклах згину і крутіння, стану поверхні матеріалу тощо (рис. 2), що дозволяє виконувати розрахунки на міцність досить швидко та з достатньою точністю.

Напруження крутіння у перетині 3, яке розраховано у роботі [6], складає $\tau_{кр} = 20,5$ МПа; значення параметра $\tau_{кр}$, що обчислено за допомогою «*AutoCAD Mechanical*» – 20,959 МПа (рис. 2,а). Результуюче напруження $\sigma_{рез}$ у перетині 3 розраховували за формулою

$$\sigma_{рез} = (\sigma_{згин}^2 + 3\tau_{кр}^2)^{0,5}, \quad (3)$$

де $\sigma_{згин}$ – напруження згину, МПа; $\tau_{кр}$ – напруження крутіння, МПа.

Значення результуючого напруження становить 138 МПа. Запас статичної міцності $n_{ст} = 4,918$. Запас міцності на витривалість (втомну або циклічну міцність) $n_{вм} = 1,834$ (рис. 2,а). Мінімальне допустиме значення цього коефіцієнта становить 1,3...2,5 [7]. За даними роботи [6] $\sigma_{рез} = 135$ МПа, $n_{ст} = 4,8$, що є досить близьким до наших результатів.

Перевіряємо напруження крутіння у шийці валка (перетин 7, рис. 1). За нашими розрахунками $\tau_{max} = 46,51$ МПа (рис. 2,б), за даними роботи [6] – 46,0 МПа, що нижче допустимого значення $[\tau] = 80$ МПа.

Таким чином, запас статичної міцності у калібрі 3 (перетини 3 і 8) та у шийці валка (перетин 7) не є достатнім ($n_{ст} < 5$). Такі перетини є концентраторами напружень і потребують підсилення.

Програмний комплекс «*AutoCAD Mechanical*» дозволяє виконувати також оцінку напру-

жено-деформованого стану металу методом скінченних елементів (МСЕ) [4]. Такі результати можуть бути використаними для удосконалення конструкції прокатного валка. Мета методу – дати уявлення про розподіл напружень і деформацій. На рис. 3 (а-в) подано результати розрахунків валка блюмінгу методом скінченних елементів, які показують, що локалізація напружень відбувається на поверхні валка, в опорах і в місцях – концентраторах напружень при переході одного діаметра валка на інший. Умовно опори валка показано точковими, тому і напруження в них є максимальним. На практиці валки встановлено на підшипниках і навантаження розподіляється за всією шириною підшипникового вузла, що можна врахувати під час розрахунків у програмному комплексі «*AutoCAD Mechanical*». Прогин валків впливає на нерівномірність розмірів прокатої заготовки та на жорсткість прокатної кліти, що необхідно враховувати під час калібрування валків. Максимальний прогин валка, що визначено «*AutoCAD Mechanical*» (рис. 3,д), склав на середині бочки 1,5 мм за прокатуванням у другому калібрі.

Висновки. Використання генераторів компонентів і розрахункових модулів програмного комплексу «*AutoCAD Mechanical 2018*» дозволяє автоматизувати багато стандартних проектних завдань, виконувати розрахунки відповідно до міжнародних стандартів DIN або ANSI і значно скоротити час виконання розрахунків на міцність і деформацію валків прокатних станів. Результати порівняння результатів, одержаних програмним комплексом «*AutoCAD Mechanical 2018*», з літературними даними, отриманими розрахунковим шляхом, свідчать про їх відповідність. Реалізація алгоритму МСЕ дозволяє враховувати під час розрахунків різні властивості матеріалів і різноманітні граничні умови для областей зі складною конфігурацією, а також наочно подавати результати розрахунків. Показано, що програмний комплекс «*AutoCAD Mechanical 2018*» може бути використаним для розрахунків валків робочих клітей прокатних станів.

Бібліографічний список

1. Цепин, М. А. Использование специализированных программ при разработке технологических процессов обработки металлов давлением [Текст] / М. А. Цепин, В. В. Бегнарский, Н. Л. Лисунец и др. // Цветные металлы. – 2007. – № 5. – С. 98-101.
2. Большаков, В. П. Основы 3D-моделирования. Изучаем работу в AutoCAD, КОМПАС-3D, SolidWorks, Inventor [Текст] / В.П. Большаков, А.Л. Бочков. – СПб. : Питер, 2013. – 304 с. – ISBN 978-5-496-00041-3.

3. **Грицына, Н. И.** Проектирование деталей машин с использованием генераторов компонентов и расчетных модулей Autodesk Inventor [Текст] / Н. И. Грицына // Вестник ХНАДУ. – 2015. – Вып. 69. – С. 13-18.
4. **Боровик, П. В.** Теоретичні дослідження процесів обробки металів тиском на основі методу скінченних елементів : навч. посібник [Текст] / П. В. Боровик. – Алчевськ : ДонДТУ, 2012. – 170 с.
5. **Федорченков, А. П.** AutoCAD Mechanical. Практическое руководство [Текст] / А. П. Федорченков, А. М. Кимаев. – М. : ТехБук, 2004. – 688 с. – ISBN 978-5-49807-774-1.
6. **Королев, А. А.** Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов [Текст] / А. А. Королев. – М. : Металлургия, 1985. – 376 с.
7. **Целиков, А.И.** Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3-х томах. Т. 3. Машины и агрегаты для производства и отделки проката : учебник [Текст] / А. И. Целиков, П. И. Полухин, В. М. Гребеник и др. – М. : Металлургия, 1988. – 680 с. – ISBN 5-229-00035-X.
8. **Машиностроение. Энциклопедия.** Машины и агрегаты металлургического производства [Текст] / гл. ред. К. В. Фролов. – М. : Машиностроение, 2000. – Т. IV-5. – 912 с. – ISBN 5-217-02418.

Явтушенко Александр Викторович, доктор технических наук, заведующий кафедрой обработки металлов давлением, Запорожская государственная инженерная академия (Запорожье, Украина). E-mail: ayav2017@gmail.com

Проценко Виктор Максимович, кандидат технических наук, доцент кафедры обработки металлов давлением, Запорожская государственная инженерная академия (Запорожье, Украина). E-mail: protsenkovm@yahoo.com

Корнилов Алексей Олегович, магистрант кафедры обработки металлов давлением, Запорожская государственная инженерная академия (Запорожье, Украина). E-mail: admin@zgia.zp.ua

РАСЧЕТ ВАЛКОВ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ НА ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАЦИЮ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ «AUTOCAD MECHANICAL»

Рассмотрены возможности геометрического моделирования валков прокатных станов и выполнения расчетов на прочность и деформацию в системе САПР «AutoCAD Mechanical 2018». Построены расчетная схема и эпюры изгибающих моментов и напряжений валка блюминга. Определены опасные сечения и коэффициенты запаса статической и усталостной прочности в этих сечениях. Сравнение результатов, полученных в системе «AutoCAD Mechanical», с литературными расчетными данными, показало их соответствие. Методом конечных элементов (МКЭ) выполнена оценка напряженно-деформированного состояния валка и определены зоны высоких локальных напряжений на его поверхности. Показано, что программный комплекс «AutoCAD Mechanical 2018» может быть использован при расчете валков рабочих клетей прокатных станов.

Ключевые слова: прокатная клеть, валок, прочность, деформация, метод конечных элементов

Yavtushenko Aleksander, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Metal Forming, Zaporizhzhia State Engineering Academy (Zaporizhzhia, Ukraine). E-mail: ayav2017@gmail.com

Ptotsenko Viktor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Metal Forming, Zaporizhzhia State Engineering Academy (Zaporizhzhia, Ukraine). E-mail: protsenkovm@yahoo.com

Kornilov Alexey, Postgraduate of Department of Metal Forming, Zaporizhzhia State Engineering Academy (Zaporizhzhia, Ukraine). E-mail: admin@zgia.zp.ua

CALCULATION OF STRENGTH AND DEFORMATION OF ROLLERS FOR ROLLING MILLS IN PROGRAMMING COMPLEX «AUTOCAD MECHANICAL»

Opportunities of geometrical modeling of rolling mill rolls and performance of calculations on strength and deformation in CAD system «AutoCAD Mechanical 2018» are considered. Design scheme and bending moment and stress distributions for blooming roll are constructed. Dangerous sections and safety factors of a static and fatigue strength in these sections are determined. Compliance of estimates obtained in «AutoCAD Mechanical» with literature data is shown. The stress-strain state of roll method of final elements (MFE) is assessed and zones of high local stress on its surface are defined. It is shown, that programming complex «AutoCAD Mechanical 2018» can be used for calculation of rolls of rolling mill working stands.

Keywords: rolling mill, roll, strength, deformation, method of final elements

Стаття надійшла до редакції 02.06.2018 р.
Рецензент, проф. Й.К. Огинський