

Грибков Е. П.
Кассов В. Д.
Васильєва Л. В.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ ПРАВКИ ЛИСТІВ ТА ПЛИТ НА ПРЕСІ

Роботу присвячено актуальній проблемі визначення раціональних технологічних режимів та конструктивних параметрів обладнання при правленні листів на пресі на основі скінченно-елементного моделювання в САЕ-системі. Метою роботи є розробка математичної моделі процесу правки листів та плит на пресі з урахуванням зміни фізико-механічних характеристик матеріалу та її реалізація ме-тодом скінчених елементів, що дозволить одержати поля змін інтегральних характеристик процесу та прогнозувати напружено-деформований стан матеріалу для подальшого автома-тизованого проектування технологічних параметрів роботи обладнання та підвищення ефек-тивності інженерних розрахунків на етапі розробки технології. Представлено ма-тематичне моделювання процесів правки з урахуванням основних положень теорії пластичності, що дозволяє з достатньо високою точністю прогнозувати розподіл напружено-деформованого стану у кожному вузлі сітки скінченно-елементної моделі вздовж осередку деформації. Розроблено методику чисельного рішення задачі пластичного деформування на основі методу скінчених елементів з використанням можливостей Abaqus CAE. Чисельна модель процесу деформування заснована на теорії течії, причому матеріал заготовки розглядається як нестисливе пружно-пластичне тіло, а в якості граничних умов було обрано швидкість переміщення верхнього пуансону та нерухома фіксація нижніх пуансонів. Застосування представленого скінченно-елементного моделювання технологічних параметрів листопривільного процесу при виконанні інженерних розрахунків забезпечить підвищення точності прогнозування технологічних налаштувань і ефективності проектування листопривільного обладнання, а, отже, і підвищення якості продукції. Також представлені результати моделювання можуть бути використані безпосередньо в системі управління пресом та підвищити його продуктивність за рахунок зниження часу на обробку листа.

Ключові слова: правка плит, моделювання, метод скінчених елементів, прес, сила правлення, розподіл механічних властивостей, кривизна листа

Для автоматизованого проектування процесів пресування листів на пресі на даний час немає спеціалізованих програмних продуктів. Процес проектування полягає в аналізі напружено-деформованого стану металу в осередку деформації при виправленні листів на основі аналітичних або скінченно-елементних математичних моделей процесу. Основною задачею при моделюванні процесів правлення листів на пресі є технологічна, а саме задача визначення оптимальних технологічних режимів для досягнення якомога більшої площинності прокату та конструкторська – задача визначення оптимальних конструктивних параметрів пресу за критеріями мінімальної металоємності та максимальної ефективності процесу правлення.

Процес правки листів на пресі дуже складно вирішувати аналітичними методами, так як він потребує постановки задачі локальної деформації, тому доцільно використовувати в якості математичної моделі метод скінчених елементів. Як методи моделювання правки використовуються чисельні [1] і кінцево-елементні моделі [2] або їх комбінації [3, 4]. Для визначення механічних властивостей металів і сплавів, залежно від температур при їхній гарячій і холодній деформації можуть бути використані методики Л. В. Андреюка і М. Я. Бровмана [5], що визначають напруження плинності для цілого ряду металів і сплавів залежно від температур їх гарячого деформування. Стосовно процесів холодного та теплового деформування можуть бути використані регресійні моделі [6]. Аналогічні підходи, що припускають аналітичну апроксимацію результатів експериментальних досліджень, можуть бути реалізовані стосовно розподілів нормального модуля пружності залежно від відповідних розподілів температур.

Безпосередньо математичне моделювання напружено-деформованого стану металу та результуючих показників якості при реалізації процесів правки відносно товстих листів, штаб і заготовок може бути здійснене на основі використання різних підходів, найбільш строгими з яких у даний час є варіаційні методи і метод скінчених елементів [7, 8]. Разом з тим,

у цьому випадку має місце досить істотна трудомісткість чисельної реалізації, а, отже, і витрати машинного часу на інженерні розрахунки, що не дозволяють використовувати дані підходи як цільові функції систем автоматизованого налаштування правильних машин і керування технологічними режимами їх роботи.

Метою роботи є розробка математичної моделі процесу правки листів та плит на пресі з урахуванням зміни фізико-механічних характеристик матеріалу та її реалізація методом скінчених елементів, що дозволить одержати поля змін інтегральних характеристик процесу та прогнозувати напружено-деформований стан матеріалу для подальшого автоматизованого проєктування технологічних параметрів роботи обладнання та підвищення ефективності інженерних розрахунків на етапі розробки технології.

З огляду на зазначене становлять інтерес математичні моделі, засновані на використанні чисельно-аналітичних підходів, що представляють процес правки в системі двовірних координат, при цьому заготовка розглядається як ідеальна пружно-пластична одновірна балка з наступним ітераційним рішенням системи рівнянь її геометричної форми. Однак у випадку пресування це є істотним недоліком й виходом може бути сумісне використання обох методів на основі регресійного моделювання або планованого експерименту. Для визначення впливу налаштування правильного пресу на виправлення кривизни листів був використаний метод скінчених елементів, як один з достовірних методів, що дають повну інформацію про процес деформування. Чисельна модель процесу деформування заснована на теорії течії. Матеріал заготовки розглядається як нестисливе пружно-пластичне тіло. Система вихідних рівнянь включає:

- рівняння рівноваги:

$$\sigma_{ij,j} = 0, \quad (1)$$

де σ_{ij} – компоненти тензорів напружень;

- рівняння руху:

$$\sigma_{ij,j} + \rho \frac{dv_i}{dt} = 0, \quad (2)$$

де ρ – щільність;

- кінематичні співвідношення:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2}(v_{i,j} + v_{j,i}), \quad (3)$$

де $\dot{\epsilon}_{ij}$ – компоненти тензорів швидкостей деформацій;

v_i – компоненти вектору швидкості;

- визначальні рівняння плинності:

$$s_{ij} = \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} \dot{\epsilon}_{ij}, \quad (4)$$

де s_{ij} – девіатор тензора напружень;

- умова нестисливості:

$$v_{i,i} = 0; \quad (5)$$

- рівняння опору деформації для пружнопластичного матеріалу:

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}}, T),$$

де $\bar{\sigma}$, $\bar{\epsilon}$, $\dot{\bar{\epsilon}}$ – інтенсивності напружень, деформацій і швидкостей деформацій, відповідно.

Дискретизація рівнянь (1)...(5) проводиться на основі принципу віртуальних швидкостей і робіт, а також, методу скінчених елементів засобами Abaqus CAE. Невідомими є вузлові значення швидкостей і середніх напружень. Скінченно-елементна сітка складається з лінійних чотирьохвузлових тетраедрів. Деформувальний інструмент (пуансон) розглядається як абсолютно тверде тіло при розрахунках формозміни заготовки. Для заготовки (листа) використовується квадратична скінченно-елементна апроксимація поверхонь. Такий підхід дозволяє перебудувати сітку без «підрізання» заготовки та підтримувати в такий спосіб постійний її об'єм. Програма автоматично генерує скінченно-елементну сітку. Адаптивний алгоритм забезпечує оптимальний розподіл щільності скінченно-елементної сітки. Кінематичні граничні умови формулюються для різних поверхонь S . На поверхнях S_v , де задана швидкість v_i^0 , граничні умови можуть бути виражені через швидкості:

$$v_i = v_i^0. \quad (6)$$

На поверхнях S_F , де діють сили:

$$\sigma_{ij}n_j = F_i,$$

де n_j – компоненти одиничної нормалі;

F_i – компоненти вектору сили.

На поверхні S_S , де задані швидкість і сили, граничні умови будуть:

$$v_i n_i = v_n^0, \quad (7)$$

$$\sigma_{ij}n_j = F_f, \quad (8)$$

де F_f – дотична складова діючих на поверхню сил;

l_j – одиничний дотичний вектор, спрямований у протилежний бік від вектору швидкості заготовки відносно інструмента Δv_i :

$$l_i = -\frac{\Delta v_i}{|\Delta v|}.$$

Граничні умови (6) використовуються для ділянок, де між заготовкою та інструментом є зони прилипання. Вираз (8) з $F_f = 0$ може використовуватися для вільних частин поверхні заготовки. Більш загальні граничні умови (7) і (8) використовуються спільно для ділянок з тертям і для тих ділянок, де задана симетрія. В останньому випадку вирази (7) і (8) замінюються наступними:

$$v_i n_i = 0;$$

$$\sigma_{ij}n_i l_j = 0,$$

де одиничні нормальні та дотичні вектори задаються залежно від площини симетрії. Граничні умови, що враховують тертя, (7) і (8), повинні бути доповнені залежністю для дотичної сили F_f , що входить у закон тертя. На контакті заготовка - інструмент контактні дотичні напруження розраховуються за законом тертя Зібеля:

$$F_f = mk = m \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}},$$

де k – дотичне напруження;

m – коефіцієнт тертя зрушення.

З огляду на зазначене моделювання процесів правки проводили методом скінченних елементів, який передбачає визначення напружено-деформованого стану листа в момент правки [3–6]. Важливим критерієм при правці листа є нерівномірність розподілу деформацій у тілі заготовки, яка оцінювалася, як $\Delta e = e_{\max} - e_{\min}$. У CAD-системі були задані геометрія інструмента та заготовки (рис. 1–2).

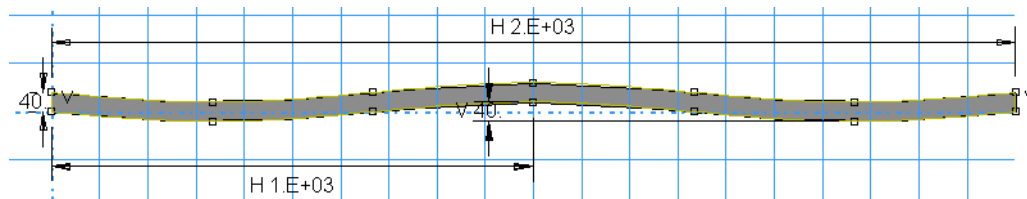


Рис. 1. Модель листа: товщина 40 мм; хвилястість 40 мм на базі 1 метр; довжина 2 м

Розрахункова модель процесу включала лист та три пуансони: два нижніх (нерухомих) та один верхній (рухомий) (рис. 3). Відстань між нижніми пуансонами визначається базою хвилястості і в даному випадку (базовому) дорівнювала 1333 мм. Верхній пуансон розміщений строго по центру між двома нижніми. В якості фізико-механічних властивостей матеріалу листа були задані щільність, модуль пружності, коефіцієнт Пуасону та границя текучості в залежності від ступеня деформації. Математична модель процесу правлення на пресі складається з двох етапів: робочий хід пуансону для здійснення вигину листа та зворотній (холостий) хід для зняття навантаження.

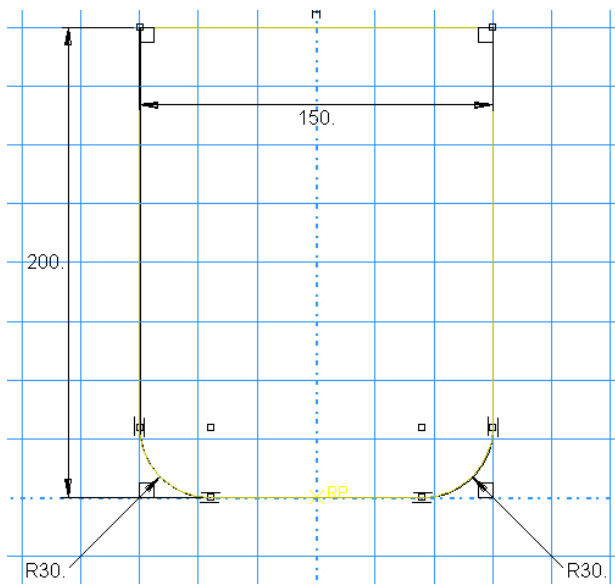


Рис. 2. Модель пуансону розмірами 150 × 200 мм з галтелями на робочій поверхні 30 мм

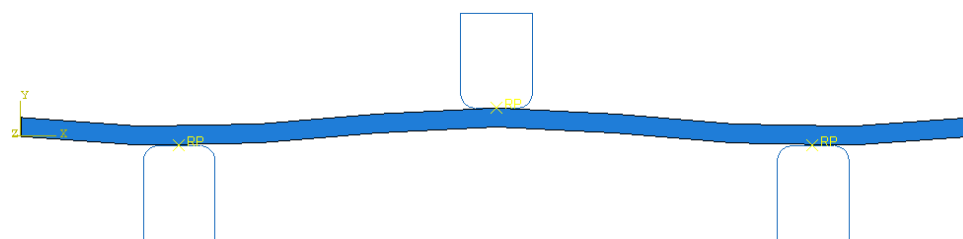


Рис. 3. Розрахункова модель процесу правки листів на пресі з використанням трьох пуансонів

В якості скінченних елементів були використані чотирьохвузлові елементи типу CPS4R. В якості контактних поверхонь використовували всі грані як листа, так і пуансонів. За основу був прийнятий закон сухого тертя з коефіцієнтом 0,2. За граничні умови було обрано швидкість переміщення верхнього пуансону та нерухома фіксація нижніх пуансонів.

На першому етапі розрахунку верхній пуансон переміщувався вниз, а на другому для зняття навантаження – вгору. При реалізації моделі були отримані поля еквівалентних напружень та деформацій, які зображені на рис. 4.

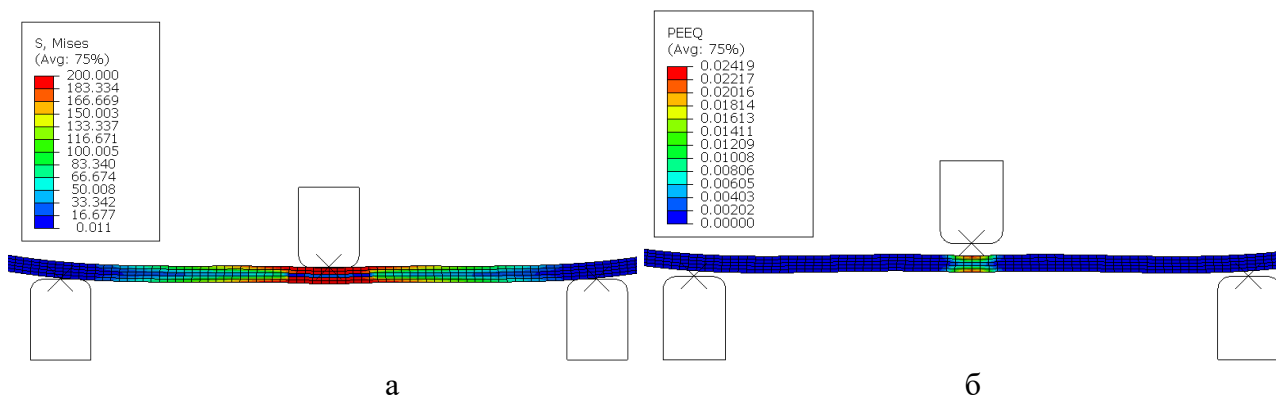


Рис. 4. Поля розподілу при правленні листів:
а – еквівалентних напружень; б – еквівалентних деформацій

Силу пресування було отримано через довідкові точки на всіх трьох пуансонах. Приклад зміни сили правлення у часі наведено на рис. 5. Максимальне значення визначає паспортні характеристики пресу, що застосовується при правленні листів.

Ефективність процесу правлення листів визначається залишковою хвилястістю, для визначення якої в моделі були використані номери вузлових точок скінченно-елементної моделі на верхній грані листа. На рис. 6 наведені форми листів до правлення (див. рис. 6, а), під навантаження (див. рис. 6, б) та після зняття навантаження (див. рис. 6, в) в вертикальних координатах. В даному випадку початкова хвилястість дорівнювала 50 мм, а хід пуансону склав 50 мм. З аналізу даних полів видно, що після зняття навантаження форма листа намагається повернутися в початковий стан й остаточна хвилястість стала дорівнювати близько 5 мм.

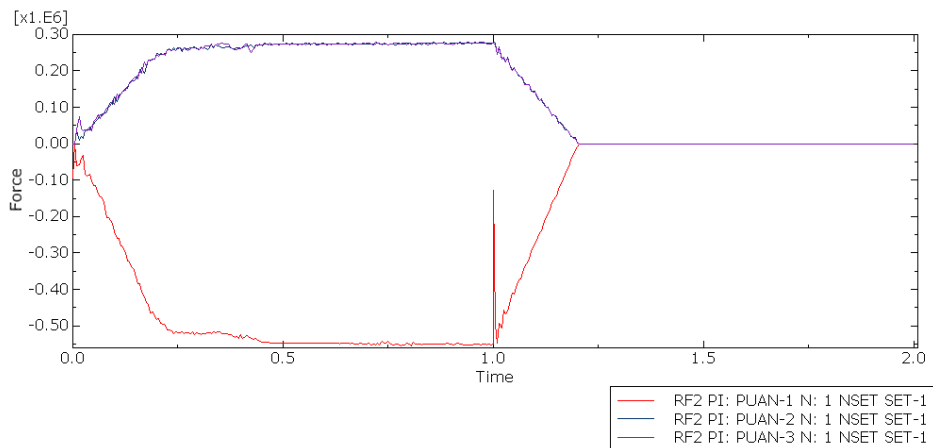


Рис. 5. Розраховані значення сили пресування

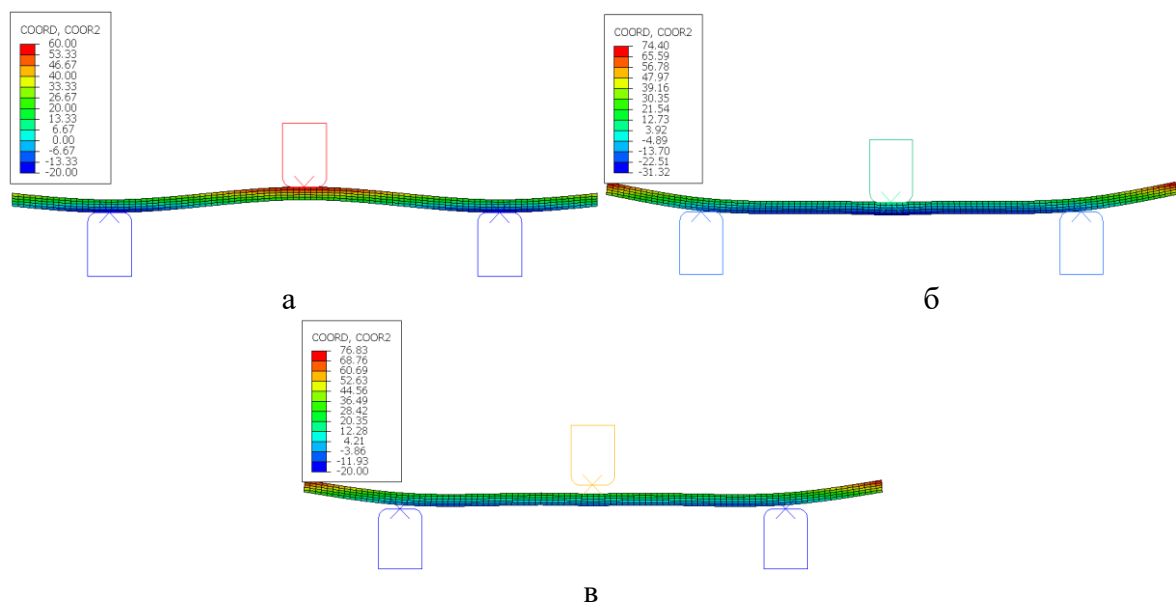


Рис. 6. Результати скінчено-елементного моделювання зміни форми листа:
а – початкова; б – під час навантаження; в – під час зняття навантаження

Якщо б еквівалентні напруження були нижче границі текучості (в даному випадку – 200 МПа) (див. рис. 4, а), то б не було пластичних деформацій (див. рис. 4, б) і форма листа повернулась би до початкової. Тобто в якості критерію ефективності процесу правлення можуть бути або досягнення напружень границі текучості або наявність пластичної деформації. Як правило, останні при правленні знаходяться в діапазоні 1...2%, а для важкодеформуємих сплавів можуть сягати до 10 % у поверхньових шарах. Також критерієм ефективності правки виступає розподіл пластичних деформацій по товщині листа. Як правило, він становить 60% проникнення. Для пошуку раціональних режимів правки листів основним параметром остається остаточна кривизна, яка повинна відповідати стандартам на листову продукцію (наприклад, ДСТУ 8540:2015 «Прокат листовий гарячекатаний»). Доцільним в цьому випадку пред-

ставляється аналіз декількох режимів правлення. В якості прикладу реалізації розробленої математичної моделі був виконаний розрахунок для величини згину листа від 30 до 70 мм. На рис. 7 зображені поля еквівалентних пластичних деформацій після зняття навантаження.

Основними вимогами при аналізі полів пластичних деформацій є безпосередньо максимальна величина, яка не повинна перевищувати ступінь деформації при руйнуванні матеріалу та безпосередньо сам розподіл по товщині листа. Оптимальним розподілом вважається той, що відповідає 60 % проникненню пластичної деформації. Але це приблизна величина, а остаточний ступінь деформації буде визначатися формою або кривизною листа після виправлення і зняття навантаження. Результати інтегральних показників процесу правки наведено на рис. 8.

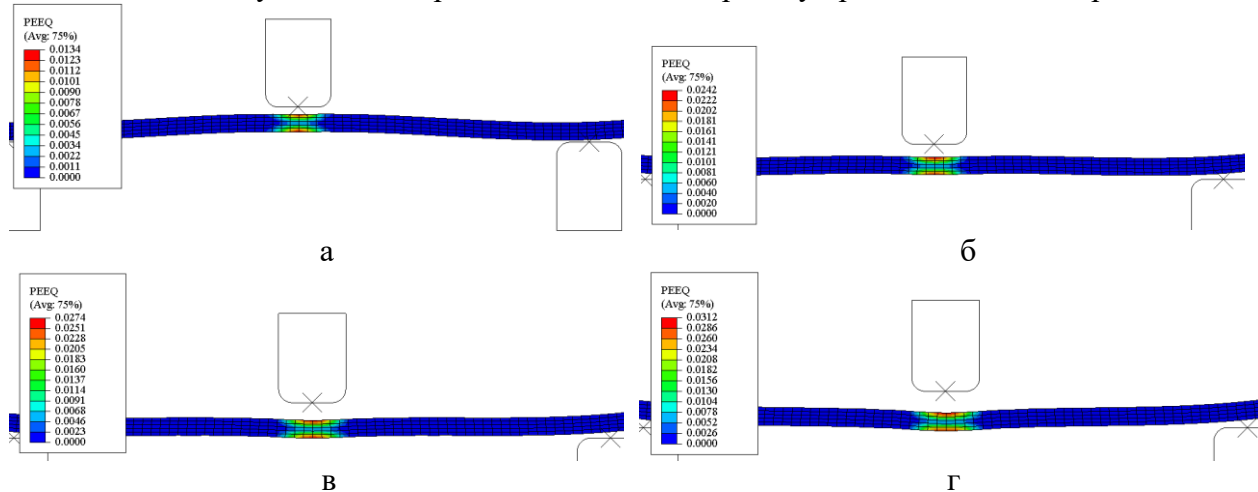


Рис. 7. Результати моделювання правки листів на пресі при різних налаштуваннях: а – 30 мм; б – 50 мм; в – 60 мм; г – 70 мм

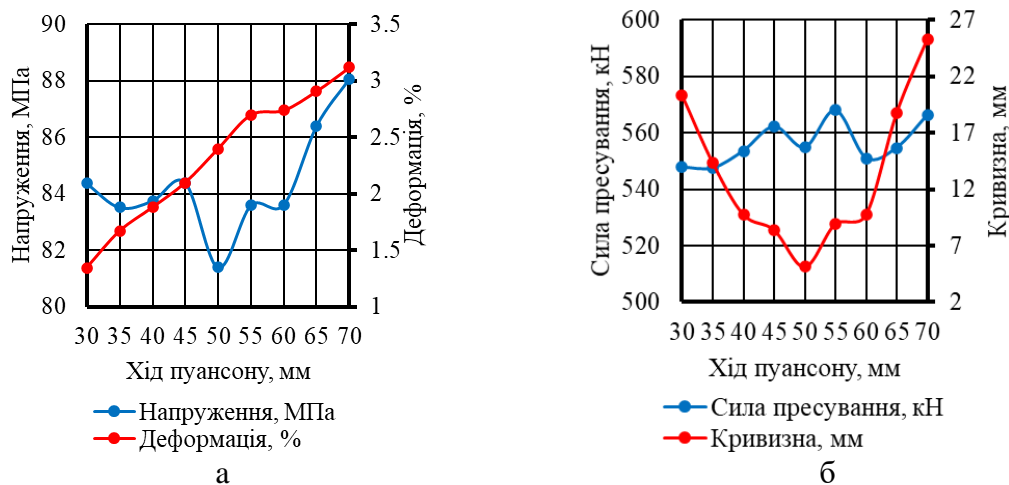


Рис. 8. Результати розрахунку інтегральних показників процесу правки: а – напружень, деформацій; б – сили пресування та кривизни листа

З аналізу наведених залежностей видно, що від величини деформації при правленні напруження змінюються незначно, в той же час деформація змінюється на значну величину (рис. 8, а). Сила правлення практично остається на одному рівні (рис. 8, а). Кривизна листа, в даному випадку – висота хвилі на крок пуансонів, має мінімальну величину при деформації листа 50 мм. При меншій або більшій деформації остаточна кривизна збільшується (рис. 8, б). Тобто раціональний режим правлення знаходиться при переміщенні верхнього пуансону на 50 мм. Таким чином, широкий спектр можливих умов реалізації процесів правки вигином, поряд з досить високим рівнем вимог щодо об'ємів і ступеня вірогідності надаваної інформації, роблять необхідним використання методів теорії пружності та пластичності, що включають метод чисельних ітераційних рішень одномірного вирішення умов безперервності геометричних параметрів пружної лінії листів при правці, а також метод скінченних елементів, які

дозволяють повною мірою врахувати реальні геометричні параметри. Важливим у цьому випадку є забезпечення можливості безпосереднього прогнозування, вже на теоретичному рівні, основних показників якості листів, а також розподілу результуючих механічних властивостей, деформацій та напружень з наступним виходом на розробку систем автоматизованого проектування відповідних технологій і устаткування.

ВИСНОВКИ

Розроблено математичну модель процесу виправлення листів на правильному пресі з урахуванням зміни фізико-механічних характеристик в осередку деформації, реалізація якої виконана методом скінчених елементів засобами Abaqus CAE з використанням повузлової симуляції полів розподілу напружень та деформацій, що дозволило отримати розподіл інтегральних параметрів процесу правки залежно від ходу пуансону.

Показано, що саме крок між пуансонами та хід верхнього пуансону є параметрами оптимізації, а критерієм оптимізації в цьому випадку є кривизна листа після зняття навантаження. Одержані результати моделювання дозволяють провести необхідні інженерні розрахунки параметрів режиму правки листів та проектування обладнання на етапі розробки технології завдяки поєднанню методів чисельного та скінчено-елементного моделювання, що забезпечує можливість прогнозування розподілу механічних властивостей та напружено-деформованого стану матеріалу в осередку деформації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Gribkov E.P., Kovalenko A.K., Hurkovskaya S.S. Research and simulation of the sheet leveling machine manufacturing capabilities. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. 120(1-2), pp. 743-759. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08806-z>
2. Hernández U. U., Mendiguren J., Argandona E.S. Friction characterisation in levelling processes. *Advances in Materials and Processing Technologies*. 2016. 2 (4), pp. 503-513. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2016.1247230>
3. Won C., Lee W., Lee H.-Y., Kang Y.-S., Yoon J. Evaluation of in-plane edge stretchability under severe contact condition for third-generation advanced high-strength steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. 108, pp. 1945-1958. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05537-x>
4. Fan Q.-H., Zhang H., Jiang X.-C., Tian B.-Z. Study on neutral layer offset of high-strength steel plate straightening of excavator's working arm. *Advances in Mechanical Engineering*. 2017.9 (7), pp. 1–11. <https://doi.org/10.1177/1687814017712420>
5. Сатонін А.В., Бобух В.І., Картавенко А.С., Жуков П.Л. Скінчено-елементне математичне моделювання енергосилових параметрів процесу гарячої прокатки відносно товстих листів та смуг. *Обробка матеріалів тиском*. 2011. 1 (26), С. 72-75.
6. Cui L., Hu X., Liu X. Research on mathematical model of leveling process for plate mill. *Advanced Materials Research*. 2011. 148–149, pp. 368–371. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.148-149.368>
7. Gribkov E.P., Kovalenko A.K., Hurkovskaya S.S. Research and simulation of the sheet leveling machine manufacturing capabilities. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. 120(1-2), pp. 743-759. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08806-z>
8. Грибков Е.П., Бережна О.В., Івчик Р.С., Коваленко А.К. Дослідження впливу дискретизації об'єму на точність розрахунку процесу правки листів методом скінчених елементів. *Обробка матеріалів тиском*. 2019. 1 (48), С. 153-156.

REFERENCES

1. Gribkov E.P., Kovalenko A.K., Hurkovskaya S.S. Research and simulation of the sheet leveling machine manufacturing capabilities. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. 120(1-2), pp. 743-759. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08806-z>
2. Hernández U. U., Mendiguren J., Argandona E.S. Friction characterisation in levelling processes. *Advances in Materials and Processing Technologies*. 2016. 2 (4), pp. 503-513. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2016.1247230>
3. Won C., Lee W., Lee H.-Y., Kang Y.-S., Yoon J. Evaluation of in-plane edge stretchability under severe contact condition for third-generation advanced high-strength steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. 108, pp. 1945-1958. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05537-x>
4. Fan Q.-H., Zhang H., Jiang X.-C., Tian B.-Z. Study on neutral layer offset of high-strength steel plate straightening of excavator's working arm. *Advances in Mechanical Engineering*. 2017. 9 (7), pp. 1-11. <https://doi.org/10.1177/1687814017712420>

5. Satonin A.V., Bobukh V.I., Kartavenko A.S., Zhukov P.L. Skincheno-elementne matematychni modeliuvannia enerhosylovykh parametriv protsesu hariachoi prokatky vidnosno tovstykh lystiv ta smuh. *Obrobka materialiv tyskom*. 2011. 1 (26), S. 72-75. (in Ukrainian)
6. Cui L., Hu X., Liu X. Research on mathematical model of leveling process for plate mill. *Advanced Materials Research*. 2011. 148–149, pp. 368–371. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.148-149.368>
7. Gribkov E.P., Kovalenko A.K., Hurkovskaya S.S. Research and simulation of the sheet leveling machine manufacturing capabilities. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. 120(1-2), pp. 743-759. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08806-z>
8. Hrybkov E.P., Berezhna O.V., Ivchuk R.S., Kovalenko A.K. Doslidzhennia vplyvu dyskretyzatsii obiemu na tochnist rozrakhunku protsesu pravky lystiv metodom skinchenykh elementiv. *Obrobka materialiv tyskom*. 2019. 1 (48), S. 153-156. (in Ukrainian)

Gribkov E., Kassov V., Vasylieva L. Mathematical modeling of technological modes for straightening sheets and plates on a press.

The work is devoted to the actual problem of determining rational technological modes and design parameters of equipment when editing letters on the press based on skimmed-element modeling in the ESS system. The goal of the work is to develop a mathematical model of the process of straightening sheets and plates on a press, taking into account changes in the physical and mechanical characteristics of the material and its implementation by the finite element method, which will make it possible to obtain fields of changes in the integral characteristics of the process and predict the stress-strain state of the material for subsequent automation. -tified design of technological parameters of equipment operation and increasing the efficiency of engineering calculations at the stage of technology development. Mathematical modeling of straightening processes is presented taking into account the basic principles of plasticity theory, which makes it possible to predict with sufficiently high accuracy the distribution of the stress-strain state in each grid node of the finite element model along the deformation cell. A technique has been developed for numerically solving the problem of plastic deformation based on the finite element method using the capabilities of Abaqus CAE. The numerical model of the deformation process is based on flow theory, and the workpiece material is considered as an incompressible elastic-plastic body, and the speed of movement of the upper punch and the stationary fixation of the lower punches were chosen as limiting conditions. The use of the presented finite element modeling of the technological parameters of the sheet-straightening process when performing engineering calculations will ensure increased accuracy in predicting technological settings and the efficiency of designing sheet-leveling equipment, and, consequently, improved product quality. Also presented, the simulation results can be used directly in the press control system and increase its productivity by reducing the time for sheet processing.

Keywords: modeling, finite element method, plate straightening, press

Грибков Едуард Петрович – д-р техн. наук, проф. МІП
Gribkov Eduard – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, MIP
E-mail: eduard.gribkov@mipolytech.education
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1565-6294>

Кассов Валерій Дмитрович – д-р техн. наук, проф. ДДМА
Kassov Valeriy – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, DSEA
E-mail: kassovvd@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3034-7470>

Васильєва Людмила Володимирівна – канд. техн. наук, доц. ДДМА
Vasylieva Liudmyla – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, DSEA
E-mail: kit@dgma.donetsk.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9277-1560>

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ-Тернопіль.
DSEA – Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk-Ternopil.

МІП – ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка», м. Запоріжжя.
MIP – Technical University “Metinvest Polytechnic” LLC, Zaporizhzhia

Стаття надійшла до редакції 12.07.24 р.