

собы магнитной обработки следует рассматривать, с одной стороны, как методы повышения стойкости инструмента путем наложения на зону обработки магнитного поля и с другой стороны, воздействие магнитного поля на материал, из которого изготовлен инструмент. В результате воздействия импульсного магнитного поля происходит изменение физико-механических свойств быстрорежущих сталей, возрастает холодная и горячая твердость и инструментальный материал становится более однородным по структуре. Повышение стойкости инструмента происходит не за счет недостатков термической обработки, а за счет улучшения свойств инструментального материала и в первую очередь таких эксплуатационных свойств как твердость и теплостойкость.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кинденко Н. И. Повышение надежности вольфрамсодержащего инструмента обработкой в импульсном магнитном поле. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем*. Краматорськ, 2005. Вип.17. С. 113-118.
2. Володин В. Л., Зуев Л. Б., Володин Т. В., Гайдук В. В. Исследование влияния магнитно-импульсных поверхностных воздействий на эксплуатационные характеристики инструментальных сталей и инструмента. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. М., 2009. № 6. С. 61-65.
3. Кантович Л. И., Малыгин Б. В., Первов К. М. Повышение ресурса инструмента и деталей горных машин методом магнитной обработки. *Горное оборудование и электромеханика*. 2007. № 1. С. 13–16.

Поступила в редколлегию 04.09.2020.

УДК 621.9

DOI 10.31319/2519-2884.tm.2020.13

БОРОВИК П.В., к.т.н., доцент

Східноукраїнський національний університет ім. В.Даля, м. Сєвєродонецьк

#### УТОЧНЕННЯ МОДЕЛІ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛУ ПРИ РІЗАННІ МЕТАЛУ НА НОЖИЦЯХ В ХОЛОДНОМУ СТАНІ

**Вступ.** Виконання операцій поздовжнього і поперечного різання металопрокату в умовах сучасного прокатного виробництва досить часто виконуються за допомогою ножиць [1, 2], котрі є досить складними машинами за кінематикою та конструкцією. Подальший розвиток процесів і машин різання вимагає вирішення актуальних завдань по дослідженню процесів розділення та розширенню можливостей обладнання, шляхом підвищення точності математичного моделювання і підвищення достовірності та наукової обґрунтованості при прийнятті проектних і технологічних рішень.

**Постановка задачі.** На шляху вирішення, зазначених завдань перевага віддається експериментальним дослідженням процесів обробки тиском. Однак такий підхід не завжди здатний забезпечити повноту одержуваної інформації, оскільки вимагає цілого ряду додаткових фінансових витрат і організаційних дій. При цьому зростання можливостей обчислювальної техніки, а також успішний розвиток методів теоретичних досліджень, що базуються на розробці чисельних математичних моделей відкриває перед дослідниками нові перспективи. Основу даних моделей складають закони теорії пружності і пластичності, а також механіки руйнування. Такий комплексний підхід в поєднанні з достовірною інформацією про механічні властивості конкретного матеріалу,

дозволяє в максимально повній мірі відобразити реальні фізичні процеси, що протікають в металі.

Особливе місце у вирішенні таких завдань займає метод скінченних елементів (МСЕ) [3, 4], який останнім часом досить часто використовується при моделюванні процесів різання листів [5-7].

Однак адекватне відображення реального процесу різання в ході моделювання МСЕ можливе тільки при наявності достовірних кривих текучості і діаграм пластичності в досліджуваних діапазонах температур, ступенях і швидкостях деформації.

Так в роботі [8] на базі відомих методів побудови кривих текучості і пластичності був запропонований простий і ефективний метод їх побудови за результатами випробувань на розтягування в залежності від межі текучості і межі міцності матеріалу, а також відносного подовження при розриванні. Застосування запропонованого методу дозволяє отримувати задовільні результати енергосилових і кінематичних параметрів процесу з коефіцієнтом кореляції більше 0,8 та з відхиленням максимальних значень сили різання за результатами моделювання МСЕ від експериментальних значень не більше 15%. Проте такі відхилення все ще є досить суттєвими, а з'ясування причин їх виникнення здатне збільшити точність моделювання.

Отже метою даної роботи є уточнення моделі механічних властивостей матеріалу, що дозволяє підвищити достовірність математичного моделювання та відповідних енергосилових параметрів процесів холодного розділення металу на ножицях.

**Результати роботи.** Моделювання виконували на базі скінченно-елементного програмного комплексу ABAQUS [3, 9]. В рамках даної роботи пластичні властивості деформованого матеріалу, за аналогією з роботою [8], описувалися моделлю пластичності Мізеса, а модель руйнування базувалася на критерії пластичності.

Критерій пластичності є феноменологічною моделлю для прогнозування початку пошкодження матеріалу внаслідок зародження, зростання і злиття пустот. Модель передбачає, що еквівалентна пластична деформація на початку пошкодження є функцією показника трьохосного напруженого стану і швидкості деформації:

$$\bar{\varepsilon}_D^{pl} = f(\eta, \dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}), \quad (1)$$

де  $\eta$  – показник трьохосного напруженого стану;

$\dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}$  – еквівалентна швидкість пластичної деформації.

Показник трьохосного напруженого стану визначається, як:

$$\eta = \frac{-p}{q}, \quad (2)$$

де  $p$  – гідростатичний тиск;

$q$  – інтенсивність напружень по Мізесу.

Ініціювання критерію початку пошкоджень в матеріалі відбувається, коли виконується умова:

$$\omega_D = \int \frac{d\bar{\varepsilon}_D^{pl}}{\bar{\varepsilon}_D^{pl}} = 1, \quad (3)$$

де  $\omega_D$  – змінна стану, котра монотонно зростає зі збільшенням пластичної деформації.

На рис. 1 продемонстровано в порівнянні характерну поведінку в ході деформації матеріалу з ізотропним зміцненням без пошкоджень та при наявності пошкоджень. В контексті пружного матеріалу з ізотропним зміцненням пошкодження проявляються в зниженні межі текучості і пружності. Суцільна крива представляє криву текучості матеріалу з урахуванням накопичення пошкоджень в ході деформації, тоді як пунктирна крива їх не враховує. При цьому слід зазначити, що характер та параметри цих кривих можуть змінюватися для одного й того матеріалу при зміні швидкості деформації.

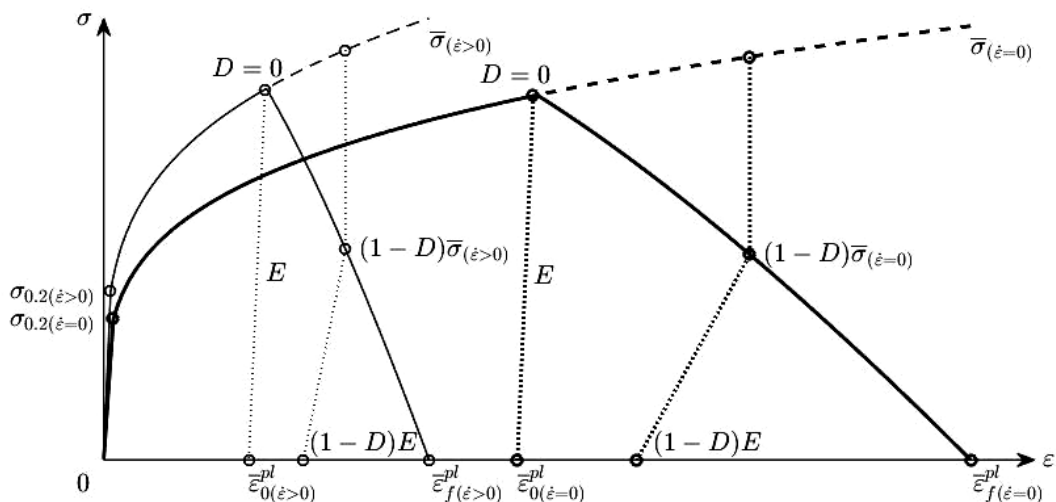


Рисунок 1 – Характерні криві деформації матеріалу з ізотропним зміцненням без пошкоджень (---) та при наявності пошкоджень (—) при статичній швидкості деформації ( $\dot{\epsilon} = 0$ ) та швидкості більшій за статичну ( $\dot{\epsilon} > 0$ )

На рис. 1 можна бачити, що до певного значення еквівалентної пластичної деформації  $\bar{\epsilon}_0^{pl}$  модуль пружності матеріалу  $E$  залишається незмінним, а пошкодження в матеріалі відсутні ( $D = 0$ ). При подальшому збільшенні еквівалентної пластичної деформації в матеріалі накопичуються пошкодження до настання повного руйнування при  $\bar{\epsilon}_f^{pl}$ , коли сумарне значення пошкоджень сягає  $D = 1$ .

Еквівалентна пластична деформація руйнування  $\bar{\epsilon}_f^{pl}$  для пластичних матеріалів може бути визначена з діаграми пластичності в залежності від показника напруженого стану. Проте цей показник є інтегральним, оскільки в експериментах визначається для всього зруйнованого перетину, хоча в локальних об'ємах мають місце як більші так і менші значення пластичної деформації. Насамперед, це пояснюється тим, що ці локальні об'єми руйнуються не одночасно і мають в ці моменти дещо різні показники напруженого стану. Проте визначити їх експериментально не представляється можливим і за результат беруть узагальнені значення.

Такий підхід стосовно скінченних елементів запропонував Хіллерборг (Hillerborg) [10], де використовується концепція крихкого руйнування, що визначає енергію, необхідну для відкриття одиничної області тріщини, як параметр матеріалу. При такому підході втрата міцності після виникнення пошкоджень характеризується зниженням напруження. Очевидно, що пластична деформація руйнування  $\bar{\epsilon}_f^{pl}$  буде різною для скінченних елементів різного розміру і тому не може використовуватися в якості параметра матеріалу для специфікації закону розвитку пошкоджень в матеріалі.

Підхід Хіллерборга дозволяє закон розвитку пошкоджень в матеріалі визначити у вигляді еквівалентного пластичного переміщення  $\bar{u}^{pl}$  або розсіювання енергії руйнування  $G_f$ , що зводить до мінімуму залежність результатів від сітки скінченних елементів.

Реалізація цієї концепції в МСЕ вимагає визначення характеристичної довжини  $L$ , пов'язаної з точкою інтегрування. Енергія руйнування тоді визначається як:

$$G_f = \int_{\bar{\epsilon}_0^{pl}}^{\bar{\epsilon}_f^{pl}} L \bar{\sigma} d\bar{\epsilon}^{pl} = \int_0^{\bar{u}_f^{pl}} \bar{\sigma} d\bar{u}^{pl}, \quad (4)$$

де  $\bar{u}_f^{pl}$  – ефективне пластичне переміщення, при якому відбувається повне руйнування.

Рівняння (4) вводить визначення еквівалентного пластичного переміщення  $\bar{u}^{pl}$ , оскільки робота руйнування пов'язана з межею текучості після ініціації пошкоджень (робота на одиницю площі тріщини). При цьому до моменту початку пошкодження  $\dot{u}^{pl} = 0$ , після початку пошкодження  $\dot{u}^{pl} = L\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}$  або  $d\bar{u}^{pl} = Ld\bar{\epsilon}^{pl}$ .

Визначення характеристичної довжини залежить від геометрії і формулювання елемента та використовується тому, що напрямок, в якому відбувається руйнування, заздалегідь невідомо. Отже, елементи з великими пропорціями матимуть досить різну поведінку в залежності від напрямку, в якому вони розтріскуються: через цей ефект зберігається деяка чутливість сітки, і рекомендуються елементи, які мають пропорції, близькі до одиниці.

Складність визначення характеристичної довжини  $L$  при моделюванні процесів розділення міститься в тому, що за рахунок пластичних деформацій в міру наближення до руйнування розмір цих елементів, за рахунок зменшення розмірів перерізу в зоні руйнування, поступово зменшується, а їх пропорції змінюються.

Застосування описаної вище моделі властивостей матеріалу (1)-(4) за результатами моделювання МСЕ дозволило скорегувати результати залежностей сили різання та підвищити кореляцію з експериментальними кривими, проте максимальні значення сил різання також коливались в межах 15% в порівнянні з експериментом.

На рис. 2,а можна бачити, що величина відносної похибки дуже добре корелює ( $R = -0,92658$ ) з відносним подовженням  $\delta$  при розриванні, що може свідчити про її системність, через втрату одного з факторів. Зокрема при використанні моделі текучості [8] за величину швидкості деформації, при статичних випробуваннях, приймали  $\dot{\epsilon}_s = 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ , хоча насправді її значення може коливатися в досить широкому діапазоні. Тому на наступному етапі, методом перебору визначали швидкість деформації, при статичних випробуваннях з метою отримання мінімальної відносної похибки моделювання МСЕ:

$$\Delta P(\dot{\epsilon}_s) \rightarrow \min . \quad (5)$$

В результаті були отримані дані, котрі при обробці методом найменших квадратів, дозволили отримати рівняння регресії, щодо визначення швидкості деформації, при статичних випробуваннях:

$$\dot{\epsilon}_s = e^{-3,5-21\delta} . \quad (6)$$

На рис. 2,б представлені розрахункові значення швидкості деформації, при статичних випробуваннях та визначені з рівняння (6), коефіцієнт кореляції між якими становить  $R = 0,98964$ .

Застосування рівняння (6) при повторному моделюванні МСЕ дозволило зменшити відносну похибку до  $\pm 7\%$ .

В якості порівняння з експериментальними даними отриманих результатів, на рисунку 3 показані криві питомого опору різанню для досліджуваних марок сталі.

**Висновки.** За результатами даної роботи встановлено, наступне:

- концепція крихкого руйнування, що визначає енергію, необхідну для відкриття одиничної області тріщини, як параметр матеріалу, може застосовуватися при моделюванні процесів холодного розділення методом скінченних елементів;
- величина швидкості деформації, при статичних випробуваннях, має тісний зв'язок із відносним подовженням матеріалу при розриванні, а врахування цього фактору дозволяє уточнити модель механічних властивостей матеріалу та підвищити достовірність математичного моделювання процесів холодного розділення металу на ножицях;
- результати роботи можуть бути рекомендовані для дослідження розділових операцій прокатного виробництва при прийнятті проектно-конструкторських і технологічних рішень.

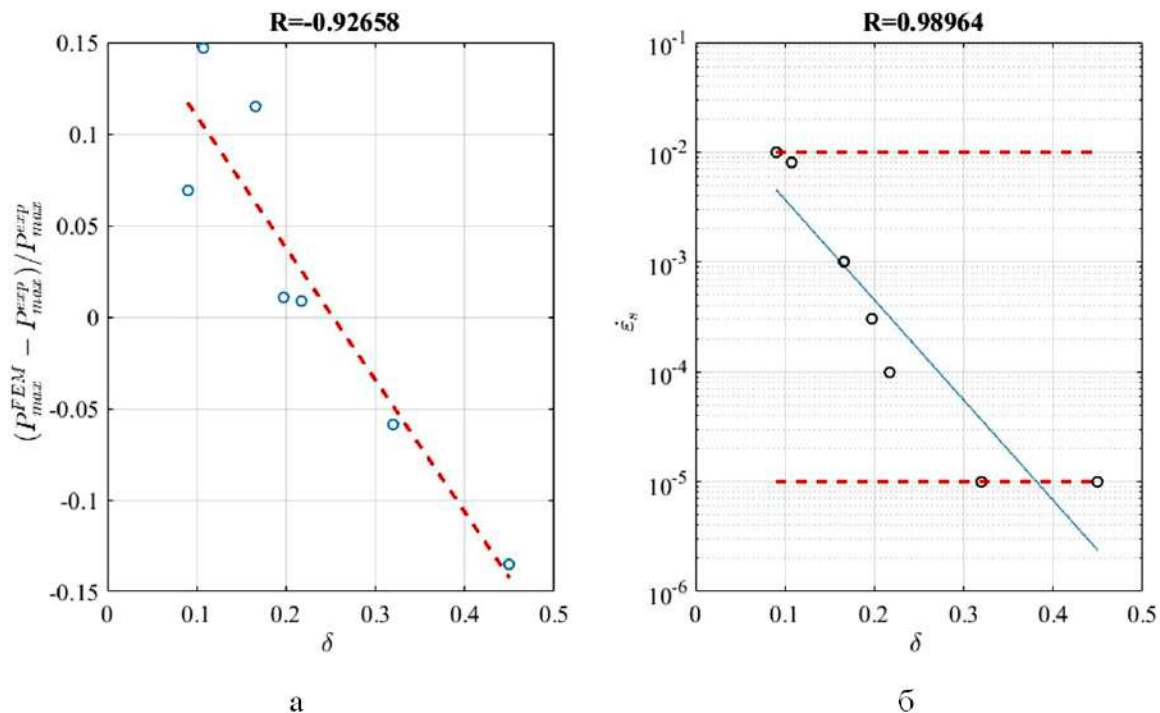


Рисунок 2 – Залежності величини відносної похибки  $\Delta P_{max}$  з відносним подовженням  $\delta$  при розриванні (а) та розрахункові значення швидкості деформації  $\dot{\epsilon}_s$  (б), при статичних випробуваннях, визначені при моделюванні МСЕ (o) та розраховані (—) з рівняння (6)

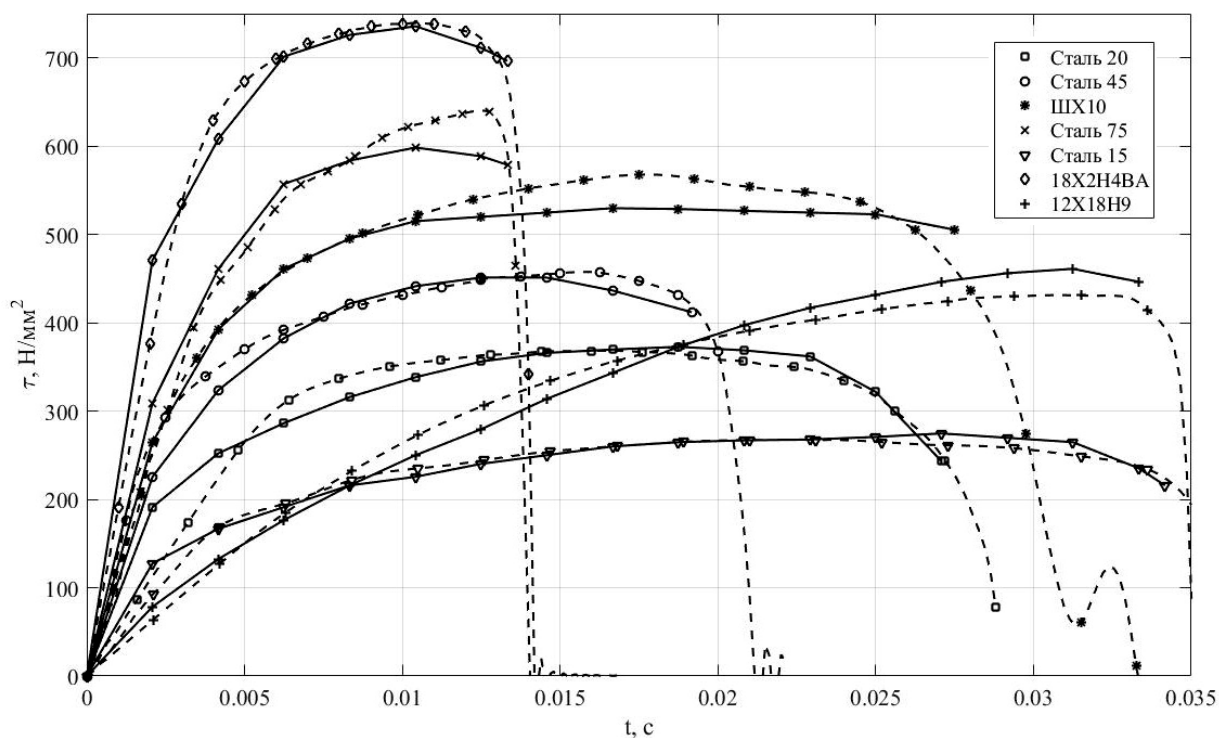


Рисунок 3 – Криві питомого опору різанню за результатами моделювання МСЕ (.....) і експериментальними даними (—) Целікова

## ЛІТЕРАТУРА

1. Лукашин Н. Д., Кохан Л. С., Якушев А. М. Конструкция и расчет машин и агрегатов металлургических заводов : учебник для вузов. М. : ИКЦ «Академкнига», 2003. 456 с.
2. Siddhartha Ray. Principles and Applications of Metal Rolling. Cambridge University Press, 2016. 320 p.
3. Amar Khennane. Introduction to Finite Element Analysis Using MATLAB and Abaqus. CRC Press, 2013. 487 p.
4. Боровік П. В. Теоретичні дослідження процесів обробки металів тиском на основі методу скінчених елементів : навч. посіб. Алчевськ : ДонДТУ, 2012. 170 с.
5. Strain and stress conditions at crack initiation during shearing of medium- and high-strength steel sheet / E. Gustafsson et al. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*. 2017.
6. Numerical modelling and simulation of sheet metal cutting processes / P. Reimer et al. *VII European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*. 2016.
7. Bohdal L. Application of FEM and vision-based methods to analysis of shearing processes in the aspect of scrap reduction. *Annual Set the Environment Protection*. 2015. Vol. 17. P. 90-103.
8. Боровік П. В. Метод построения кривых текучести и пластичности при трехмерном моделировании процессов холодной резки на ножницах. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Сер. : *Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*: зб. наук. пр. Харків : НТУ «ХПІ», 2018. № 31 (1307). С. 8-13.
9. Боровік П. В. Теоретичні дослідження процесів обробки металів тиском на основі методу скінчених елементів : навч. посіб. Алчевськ : ДонДТУ, 2012. 170 с.
10. Hillerborg A., Modeer M., Petersson P. E. Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements. *Cement and Concrete Research*. 1976. Vol. 6. P. 773-782.

Надійшла до редколегії 09.09.2020.

УДК 621.771: 378.147

DOI 10.31319/2519-2884.tm.2020.14  
 МАКСИМЕНКО О.П., д.т.н., професор  
 НІКУЛІН О.В., к.т.н., доцент  
 НАКОНЕЧНА Т.В.\*, к.ф.-м.н., доцент

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, Україна  
 \*Дніпровський національний університет ім. О. Гончара, м. Дніпро, Україна

### ВИКОРИСТАННЯ ІННОВАЦІЙНИХ ОСВІТНІХ ТЕХНОЛОГІЙ У МАГІСТЕРСЬКІЙ ПІДГОТОВЦІ МЕТАЛУРГІВ

**Вступ.** У зв'язку з модернізацією української системи вищої освіти все більше уваги приділяється проблемі підвищення якості навчання та досягнення високого рівня підготовки випускників. Закон України «Про вищу освіту» зазначає, що зміст вищої освіти, обумовлений цілями та потребами суспільства, це – система знань, умінь і навичок, професійних, світоглядних і громадянських якостей, котрий має бути сформовано в процесі навчання з урахуванням перспектив розвитку суспільства, науки, техніки, технології, культури та мистецтва [1]. Задачі вдосконалення у вищій освіті визначаються