

136 МЕТАЛУРГІЯ

УДК 621.778

DOI: 10.31498/2225-6733.52.2025.351010

**ОЦІНКА ВПЛИВУ МАСШТАБНОГО ФАКТОРУ
НА РУЙНУВАННЯ ПРЯМОКУТНИХ ПРОФІЛІВ ПРИ ВОЛОЧІННІ
З ВИКОРИСТАННЯМ НОРМАЛІЗОВАНОГО КРИТЕРІЮ КОКРОФТА-ЛЕТЕМА****Таратута К.В.**канд. техн. наук, доцент, Запорізький національний університет, м. Запоріжжя,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6671-9670>, e-mail: taratutazp@gmail.com

Профілі прямокутної форми з електротехнічної міді найчастіше застосовують у кабельній промисловості та трансформаторобудуванні. Для виготовлення профілів прямокутної форми, в залежності від розміру та призначення, використовують процеси безперервного лиття, прокатки, пресування чи волочіння. В останньому випадку виготовляють прямокутні профілі малих типорозмірів, висотою від 0,1 мм до 5,0 мм, шириною від 1,0 мм до 50,0 мм. При таких сортаментах спостерігається значні відмінності геометричних параметрів найменшого профілю у порівнянні з найбільшим. Так площа перерізу найменшого профілю відрізняється від найбільшого у 2500 раз. Також слід враховувати багатократне перевищенням ширини профілю у порівнянні з товщиною. Вплив розмірів заготовки на параметри процесу волочіння, при незмінних інших технологічних параметрах, характеризується як масштабний фактор. Масштабний фактор необхідно враховувати для уникнення руйнування (обриву) заготовки в процесі волочіння, особливо при налаштуванні обладнання на новий сортament заготовок або при зміні матеріалу, що деформується. Для запобігання руйнуванню прямокутного профілю з одночасним збереженням технологічних параметрів волочіння в роботі поставлена мета визначення номінальних та критичних значень критерію Кокрофта-Летема для волочіння мідних прямокутних профілів при різних геометричних розмірах заготовки. Досягнення поставленої мети реалізовано за рахунок комп'ютерного моделювання процесу волочіння зі змінними геометричними параметрами заготовки. В процесі волочіння незмінними залишалися наступні параметри: матеріал заготовки, початкова межа плинності та витривалості матеріалу, витяжка заготовки, відносний обтиск по висоті та ширині заготовки, кут нахилу твірної волочильного інструменту, коефіцієнт тертя. Оцінка вірогідності обриву профілю здійснювалась з використанням нормалізованого критерію Кокрофта-Летема. Встановлено, що спостерігається вплив масштабного фактору на величину нормалізованого критерію Кокрофта-Летема при волочінні мідних прямокутних профілів. При волочінні мідних заготовок з встановленими постійними технологічними параметрами номінальне значення нормалізованого критерію Кокрофта-Летема становить 0,53-0,58 для заготовок з питомою площею поверхні у осередку деформації $0,314-0,218 \text{ м}^2/\text{мм}^3$. Встановлено, що питома площа поверхні в зоні контакту заготовки з волокою відносно об'єму металу у осередку деформації зменшується зі збільшенням геометричних розмірів заготовки. Критичне значення нормалізованого критерію Кокрофта-Летема становить від 0,7 (для зразків з площею поверхні у осередку деформації, що припадає на одиничний об'єм $0,207 \text{ м}^2/\text{мм}^3$) до 0,85 (для зразків з площею поверхні у осередку деформації, що припадає на одиничний об'єм $0,828 \text{ м}^2/\text{мм}^3$). Після перевищення критичного значення нормалізованого критерію Кокрофта-Летема починається руйнування дроту. Тобто при збільшенні геометричних розмірів заготовки (у встановленому діапазоні) вірогідність обриву збільшується. Практична значимість роботи полягає у визначенні номінальних та критичних значень нормалізованого критерію Кокрофта-Летема при волочінні мідних прямокутних профілів для оптимізації маршруту волочіння та зниження вірогідності обриву заготовки, що деформується.

Ключові слова: волочіння, прямокутний профіль, мідна заготовка, нормалізований критерій Кокрофта-Летема.

Постановка проблеми

Процес волочіння дозволяє отримати вироби з високою точністю розмірів, низькою шорсткістю та значним зміцненням матеріалу. В процесі волочіння отримують вироби з заданим профілем. Найрозповсюдженим є суцільний та полий (трубний) круглий профіль, однак у виробництві виникає необхідність отримання фасонних профілів, таких як прямокутник, квадрат, шестигранник, трапеція. Інші форми профілів менш розповсюджені у волочильному виробництві. Профілі прямокутної форми з електротехнічної міді найчастіше застосовують у кабельній промисловості та

трансформаторобудуванні. Волочіння прямокутних профілів має ряд особливостей, пов'язаних з багатократним перевищенням ширини профілю у порівнянні з товщиною. Це призводить до необхідності більш ретельного вибору обтиску як по ширині, так і по висоті профілю. Зазвичай для запобігання коробленню з подальшим обривом профілю застосовують незначні обтиски по ширині профілю. Це призводить до неповного заповнення каналу волоки, з подальшим вільним розширенням. В результаті спостерігається коливання ширини профілю поза межами встановлених допусків.

Тому дослідження спрямовано на визначення вірогідності руйнування прямокутних профілів при волочінні заготовок однакової форми, але різних розмірів при змінному обтіску по ширині заготовки, з використанням нормалізованого критерію Кокрофта-Летема.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

В процесах обробки металів тиском для оцінки пошкоджень та руйнувань металу, що деформується, застосовуються енергетичні критерії руйнування. До найпоширеніших критеріїв відносяться: нормалізований критерій Кокрофта-Летема (Normalized Cockcroft-Latham), безпосередньо критерій Кокрофта-Летема (Cockcroft-Latham), критерій Броззо (Brozzo), критерій Айда (Ayada) та ін. [1-4].

Визначення критерія руйнування у різних дослідженнях проводилось зазвичай при виборі різних технологічних параметрах пластичної деформації [5, 6].

В роботі [7] представлено дослідження витягування труб з використанням методів верхньої межі та енергетичного методу. Процес витягування було змодельовано за допомогою програмного забезпечення ABAQUS. Результати моделювання встановили критичне значення пошкодження за критерієм руйнування Кокрофта-Летема на рівні 0,862.

В роботі [8] межу витягування труби з алюмінієвого сплаву Al-6061-T6 та еластопластичну поведінку процесу витягування досліджували на основі фундаментальних теорій значних деформацій та механіки пошкоджень. Математичне обчислювальне рівняння щодо максимального значення пошкодження Кокрофта-Летема було перетворено на відповідний дискретний вираз, який легко програмувати за допомогою коду скінченних елементів, таким чином було розроблено відповідний числовий алгоритм скінченних елементів для розрахунку пошкоджень. Завдяки підходу, який передбачає взаємну підтримку фізичних експериментів та числового моделювання для визначення критичного значення пошкодження, критерій тріщеноутворення для сплаву Al-6061-T6 був оцінений як 1,34. Отриманий критерій тріщеноутворення був введений як важливий конструктивний аспект процесу витягування труб.

Прогнозування руйнування при холодному листовому витягуванні за модифікованим критерієм Кокрофта-Летема представлено у роботах [9, 10]. У представлений роботі було проведено порівняльний аналіз різних критеріїв руйнування. У процесі листового витягування рекомендоване значення критерію руйнування Normalized Cockcroft-Latham для сталі 30ХГСА не має перевищувати 0,6 для забезпечення протікання процесу без руйнування. Показано, що при витягуванні заготовки діаметром 95 мм зі сталі 30ХГСА критичні пошкодження за критерієм Normalized Cockcroft-Latham знаходяться в межах 1,35...1,4.

Визначення значень критерія Кокрофта-Летема для сталі Ст.45 при гарячому формуванні з

температурою 900°C-1200°C, для оцінки вірогідності розтріскування металу, проведено у роботі [11]. Представлена методологія дослідження включає експериментальні випробування (випробування на розтяг) та числове моделювання, проведене в програмі DEFORM-3D. Встановлено, що граничне значення критерія Кокрофта-Летема коливаються у межах 0,849-0,726.

В роботі [12] встановлено, що граничне значення нормалізованого критерію Кокрофта-Летема для титанового сплаву Ti6Al4V, сформованого за кімнатної температури, становить 0,354. Числові результати показують, що розподіл досліджуваного критерію пошкодження не є рівномірним у перерізі, де відбувається розтріскування. Його вищі значення розташовані в центральних шарах матеріалу, тоді як нижчі можна спостерігати в зовнішніх шарах перерізу.

Дослідження руйнування на розтяг міді та малоуглецевої сталі у процесі багатопрхідного волочіння з діаметрів 25,4 мм (і менше) до 11,8 мм проведено в роботі [13]. Безкиснева мідь показала ознаки того, що руйнування ініціювалося в центрі зразка. М'яка малоуглецева сталь, очевидно, також розламалася в центрі, але повний розрив відбувся одразу після того, як розтягувальне напруження досягло свого максимуму. Були досліджені теорії руйнування Кокрофта-Летема, а також Чена та Кобаяші, і було виявлено, що існує достатній збіг. Також було виявлено, що для цих конкретних випробувань критерій максимального розтягувального напруження дав більш переконливі результати.

Критерії пластичного руйнування за Кокрофтом-Летемом для кольорових матеріалів також розглянуті в роботі [14]. Нормалізовані критерії Кокрофта-Летема для стискальних випробувань проведено для двох матеріалів на основі сплаву міді – CuCrZr та алюмінієвого сплаву – ENAW7075T0. Критичний стан характеризується як стан, в якому пластична обробка завершена та починається руйнування матеріалу. Критерій пластичного руйнування за Кокрофтом-Летемом, отриманий в результаті лабораторних фізичних експериментів на стиснення, для сплаву CuCrZr становить 0,24 при кімнатній температурі.

Масштабні фактори у процесах обробки металів тиском мають складну природу виникнення та залежать від багатьох чинників, включаючи матеріал, метод обробки, температуру, швидкість деформації та ін. Тому їх детальне вивчення та облік при проектуванні та виробництві виробів мають велике значення. Вплив масштабних факторів і, як їх складової, геометричних параметрів на параметри процесів обробки металів тиском розглянуті у роботах вітчизняних та закордонних науковців [15-17]. У процесі волочіння масштабні фактори, що впливають на руйнування заготовки в процесі пластичної деформації, можна розділити на декілька груп: зміна геометричних параметрів (абсолютних розмірів), зміна технологічних параметрів, зміна напруженого стану та зміна мікроструктури металу. Зміна геометричних параметрів, у першу чергу,

пов'язана з розмірами зразків, а також з наявністю ефекту товщини металу (при деформації стрічкових профілів). Вважається, що під час пластичної деформації масштабний фактор може впливати на зміну пластичності металу та появу нерівномірності деформації [18-21].

Дослідження впливу масштабного фактору на процес руйнування профілів прямокутної форми під час волочіння у науковій літературі представлено недостатньо. У поточному дослідженні зосередимо увагу на оцінці впливу на процес волочіння прямокутних профілів зміни геометричних параметрів (абсолютних розмірів) заготовки. Тим більше, що процес волочіння профілів круглої та прямокутної форми має ряд суттєвих відмінностей як геометричних, так і технологічних.

Мета статті

Мета статті є дослідження впливу масштабного фактору на обривність (руйнування) заготовки під час волочіння прямокутних профілів при змінному обтіску по ширині заготовки, з використанням нормалізованого критерію Кокрофта-Летема.

Виклад основного матеріалу

Мідні прямокутні профілі малого перерізу найчастіше отримують двома способами. Перший спосіб включає на першому етапі прокатку профілів, а на другому етапі – процес холодного волочіння. Другий спосіб включає на першому етапі процес волочіння у ролікових волоках, а на другому етапі – процес холодного волочіння. При виробництві прямокутних профілів в якості волок використовують як монолітні твердосплавні волоки зі сплавів ВК6, ВК8, так і волоки збірної конструкції.

У поточному дослідженні обрано процес моделювання чистового етапу холодного волочіння мідних профілів у монолітній волоці з використанням програмного комплексу DEFORM. Програмний комплекс DEFORM завдяки високій достовірності отриманих результатів широко використовується при моделюванні процесу волочіння. Програма дозволяє обрати один з можливих критеріїв руйнування матеріалу, а саме: Cockcroft-Latham (критерій Кокрофта-Летема), Normalized Cockcroft-Latham (нормалізований критерій Кокрофта-Летема), McCintock (критерій МакКлінтока), Freudenthal (критерій Фродентала), Rise -Tracy (критерій Райса-Трейсі), Oyane (критерій Ояне), Oyane Negative (негативний критерій Ояне), Ayada (критерій Ойада), Ayada Negative (негативний критерій Ойада), Osacada (критерій Осакада), Brozzo (критерій Броззо), Zhao-Kuhn (критерій Чжао-Куна), max prin stress / UTS (критерій максимального головного напруження).

Критерій Cockcroft-Latham – це один з найпоширеніших критеріїв руйнування металів при пластичній деформації, який враховує накопичення енергії внаслідок пластичної деформації під дією максимального

головного напруження. Критерій припускає, що руйнування (тріщиноутворення, надрив, тощо) настає тоді, коли накопичена робота пластичної деформації під дією головного розтягуючого напруження досягає певного порогового рівня «С».

Критерій Normalized Cockcroft-Latham (NCL)- це модифікована форма оригінального критерію Cockcroft-Latham, яка використовується для оцінки руйнування матеріалу при пластичній деформації, зокрема у процесах обробки тиском (штампування, прокатка, тощо).

Критерій McCintock – цей критерій використовується для передбачення виникнення тріщин у матеріалах під час пластичної деформації. Він заснований для обліку накопичення мікроушкоджень у матеріалі, які можуть призвести до утворення та зростання тріщин.

Критерій Freudenthal – цей критерій застосовується для оцінки руйнування пластичних матеріалів, коли руйнування пов'язане з накопиченням пластичної деформації, незалежно від конкретного виду напруженого стану.

Критерій Rise -Tracy – це критерій, що враховує механізм пороутворення та зростання пор у розрахунках пластичного руйнування. Він особливо популярний у 3D-моделюванні руйнування металів, коли важливою рисою є точність при високому рівні тривісного розтягування.

Критерій Oyane – це критерій пластичного руйнування, розроблений спеціально для врахування впливу гідростатичного тиску на процес утворення тріщин у металах – особливо при обробці тиском.

Критерій Oyane Negative – це критерій, в якому враховується лише негативний (стискаючий) гідростатичний тиск при руйнуванні.

Критерій Ayada – це критерій крихкої/пружної руйнації, розроблений для листового формування, особливо ефективний при низьких триаксальності напружень.

Критерій max prin stress / UTS (Maximum Principal Stress Criterion), також відомий як критерій Ранкіна (Rankine) – цей критерій використовується для оцінки міцності матеріалів, особливо крихких, і заснований на порівнянні максимального головного напруження з тимчасовим опором розриву (UTS – Ultimate Tensile Strength).

Узагальнююча модель (розрахункова формула) для кожного критерію описані у роботах [23, 24].

Окремо слід зазначити наявність у літературі вітчизняних критеріїв руйнування, що не входять до програмних комплексів DEFORM, ABAQUS, ANSYS LS-DYNA [25-27].

Вибір одного з можливих критеріїв руйнування розглядається у наукових працях вітчизняних та закордонних вчених та залежить від багатьох чинників, основні з яких це матеріал, температура, коефіцієнт тертя та ступінь пластичної деформації [25, 28, 30- 4 та ін.].

Критерій Кокрофта-Летема рекомендується для процесів пластичної деформації, як найбільш

універсальний при різних режимах навантаження та матеріалах.

Критерій Кокрофта-Летема у загальному вигляді описується формулою (1).

$$C = \int^{\bar{\epsilon}} \sigma^* d\bar{\epsilon}, \quad (1)$$

де $\bar{\epsilon}$ – накопичена ефективна деформація, σ^* – максимальне головне напруження.

Критерій Кокрофта-Летема (не нормалізований) представляє собою абсолютне значення максимального головного напруження.

У свою чергу, нормалізований критерій Кокрофта-Летема представляє собою відносну (безрозмірну) величину, що дозволяє зробити оцінку руйнування більш універсальною, стабільною та незалежною від конкретного процесу деформування.

Нормалізований критерій Кокрофта-Летема є показником граничної деформації металу. Він заснований на оцінці повної роботи деформації на одиницю об'єму у точці руйнування [3] та описується формулою (2):

$$C = \int^{\bar{\epsilon}} \frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon}, \quad (2)$$

де $\bar{\epsilon}$ – накопичена ефективна деформація, σ^* – максимальне головне напруження, $\bar{\sigma}$ – головне напруження по Мізесу.

Комп'ютерне моделювання процесу волочіння прямокутних профілів із міді марки М1 проводились при зміні ступеня деформації, від мінімальної деформації до максимальної деформації (що викликає руйнування) заготовки, при незмінній деформації по висоті заготовки.

Властивості міді марки М1 обрані із стандартизованої бази програми DEFORM-3D.

Для опису пластичної поведінки матеріалу використана розширена узагальнена модель Джонсона-Кука:

$$\sigma = (A + B \cdot \epsilon_p^n) \cdot \left[1 + C \ln \left(\frac{\epsilon_p}{\epsilon_0} \right) \right]^\alpha (D - E(T^*)^m), \quad (3)$$

$$T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}},$$

$$D = D_0 \cdot \exp[k(T - T_b)],$$

де ϵ_p – еквівалентна пластична деформація, $\dot{\epsilon}_p$ – швидкість пластичної деформації, ϵ_0 – стандартна (базова) швидкість деформації, A – початковий опір матеріалу, B – коефіцієнт зміцнення деформацією, n – показник ступеня зміцнення деформацією, C – коефіцієнт залежності від швидкості деформації, α – експонента для нелінійної залежності швидкості, T – температура матеріалу, T_{room} – температура навколишнього середовища, T_{melt} – температура плавлення матеріалу, T^* – нормалізована температура, m – коефіцієнт температурного пом'якшення, D – множник для температурного пом'якшення, E – коефіцієнт, що регулює вплив температури на опір, D_0 – початкове значення D , k – коефіцієнт температурної залежності, T_b – базова температура для експоненційного закону.

Робочий інструмент (волока) представляє абсолютно тверде тіло; матеріал дроту вважається однорідним, ізотропним; середовище, що деформується, – пластичне. Температурні умови прийнято ізотермічні.

З метою визначення впливу масштабного фактору на руйнування дроту при зміні відносного обтиску по сторонам прямокутного профілю при волочінні обрані три зразка з діапазоном розмірів: по ширині від 2 мм до 8 мм, по висоті від 6 мм до 24 мм.

Причому відносний обтиск по висоті у всіх варіантах залишається постійним, а відносний обтиск по ширині профілю змінюється у відповідності до вищеписаних варіантів.

Максимальний відносний обтиск по ширині для всіх зразків становить 25%. Максимальний відносний обтиск по висоті для всіх зразків становить 20%. Максимальна витяжка для всіх заготовок $\mu = 1,67$. Кут нахилу твірної волочильного інструменту по ширині і по висоті становить для всіх зразків 10 град. Геометричні та технологічні параметри процесу волочіння відображені у табл. 1.

Таблиця 1

Геометричні та технологічні параметри

№	Максимальна ширина заготовки, B_0 , мм	Мінімальна ширина заготовки, B_1 , мм	Максимальна висота заготовки, H_0 , мм	Мінімальна висота заготовки, H_1 , мм	Довжина заготовки до волочіння, L , мм.	Швидкість волочіння, мм/с	Площа поверхні у осередку деформації, що припадає на одиничний об'єм, $\text{мм}^2/\text{мм}^3$
1	8,0	6,0	2,5	2,0	35	0,75	0,825 - 1,252
2	16,0	12,0	5,0	4,0	70	1,50	0,425 - 0,626
3	32,0	24,0	10,0	8,0	140	3,00	0,207 - 0,314

Для поступового збільшення обтиску по ширині заготовки була змодельована заготовка ступінчастої форми, що розширюється по ширині. Загалом заготовка включала 14 ступенів по ширині та одну по висоті. При вході кожної наступної ступені у осередок деформації збільшуються технологічні параметри, а саме

витяжка, абсолютний та відносний обтиск по ширині заготовки. Це дозволяє скоротити процес моделювання та не використовувати декілька заготовок з різною витяжкою.

Для дослідження масштабного фактору, а саме впливу геометричних параметрів на руйнування

заготовки в процесі волочіння, обрано три заготовки з різними геометричними параметрами, але з однаковими параметрами деформації. Для забезпечення однакової витяжки у кожний проміжок часу для кожної з трьох заготовок встановлювалась різна швидкість волочіння. Так для найменшої заготовки з параметрами $H_1^{№1} \times B_1^{№1} = 2,0 \times 6,0$ мм швидкість волочіння складала $v_1 = 0,75$ мм/с, а для найбільшої заготовки з

параметрами $H_1^{№3} \times B_1^{№3} = 8,0 \times 24,0$ мм швидкість волочіння складала $v_1 = 3,0$ мм/с.

Коефіцієнт геометричної подібності заготовок дорівнює 2. Коефіцієнт подібності – це число, що дорівнює відношенню подібних сторін подібних фігур. Геометричні параметри заготовки №3 (найбільшої за розмірами) представлена на рис. 1.

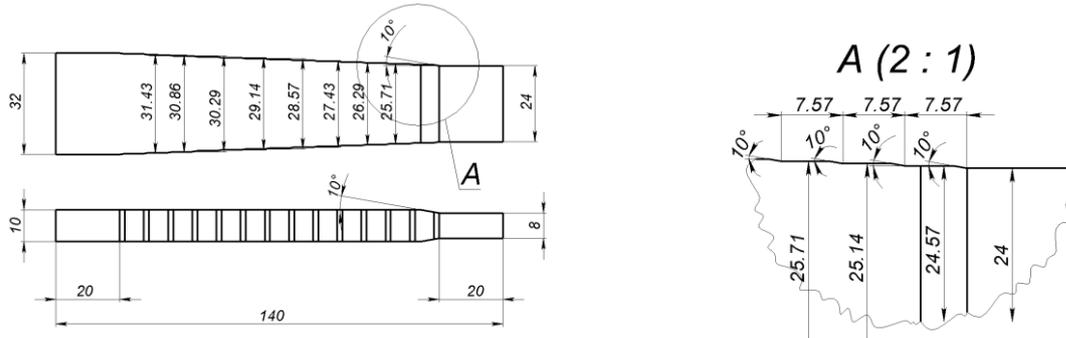
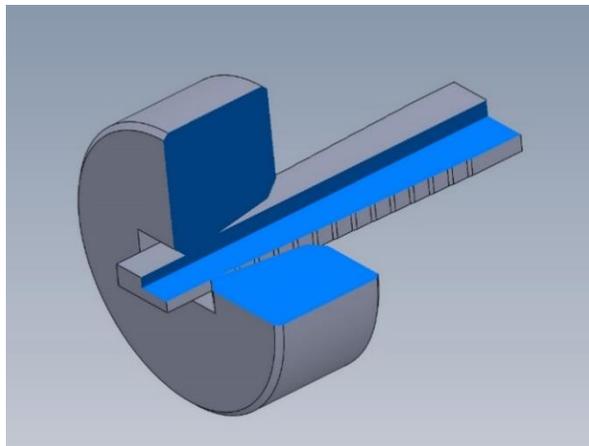


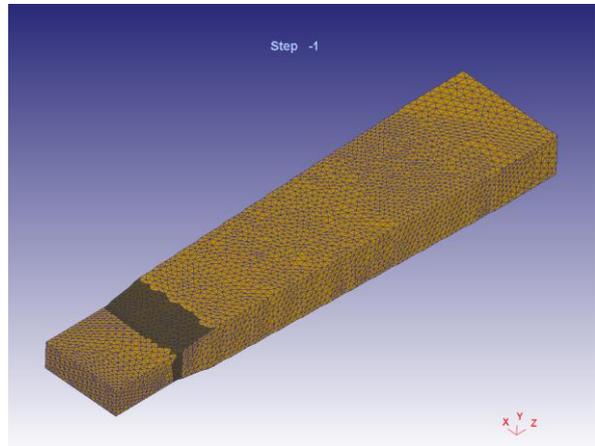
Рис. 1 – Геометричні параметри заготовки №3

Підготовка до моделювання починалась зі створення моделі трьох заготовок та трьох волок у програмі SolidWorks з подальшим збереженням у форматі STL (від англ. stereolithography) – формат файлу, який широко застосовують для зберігання тривимірних моделей об'єктів для використання в адитивних технологіях (рис. 2а). При 3D моделюванні у місці контакту

заготовки та каналу волочильного інструменту утворювалась деформаційна зона (рис. 2б). Причому розміри деформаційної зони по висоті заготовки в процесі деформації були незмінними, а по ширині заготовки збільшувались, досягаючи максимальних значень при руйнуванні заготовки.



а



б

Рис. 2 – Модель волочильного інструменту з заготовкою (секторний переріз) та зони контакту заготовки та волочильного інструменту перед деформацією: а – модель у програмі SolidWorks; б – модель заготовки у програмі DEFORM

Визначення питомої площі поверхні у осередку деформації (рис. 2б) проведено з використанням наближеної формули (4):

$$S_v^{kp} = \frac{S^{kp}}{V^{kp}}, \quad (4)$$

де S^{kp} – контактна площа поверхні заготовки у осередку деформації,

$$S^{kp} = \frac{(H_0^{kp} + H_1)(B_0^{kp} - B_1) + (B_0^{kp} + B_1)(H_0^{kp} - H_1)}{4 \cdot \tan(\alpha)}$$

H_0^{kp} , B_0^{kp} – відповідно, висота та ширина заготовки на вході у осередок деформації; H_1 , B_1 – відповідно, висота та ширина заготовки на виході з осередку деформації; α – кут нахилу твірної волочильного інструменту; V^{kp} – об'єм заготовки у осередку деформації,

$$V^{kp} = \frac{ctg(\alpha)}{12} (H_0^{kp} - H_1 + B_0^{kp} - B_1)x$$

$$x \left(H_0^{kp} B_0^{kp} + H_1 B_1 + \sqrt{H_0^{kp} B_0^{kp} \cdot H_1 B_1} \right).$$

У результаті волочіння трьох заготовок на кожному кроці відносного обтиску по ширині визначались геометричні параметри осередку деформації для кожної заготовки окремо.

Відносний обтиск по ширині заготовки визначено за формулою (5):

$$\varepsilon_B = \frac{B_0 - B_1}{B_0} 100\%, \quad (5)$$

де B_0 – ширина заготовки до волочіння, B_1 – ширина заготовки після волочіння.

Значення питомої площі поверхні у осередку деформації, розраховані за формулою (4), представлені на рис. 3.

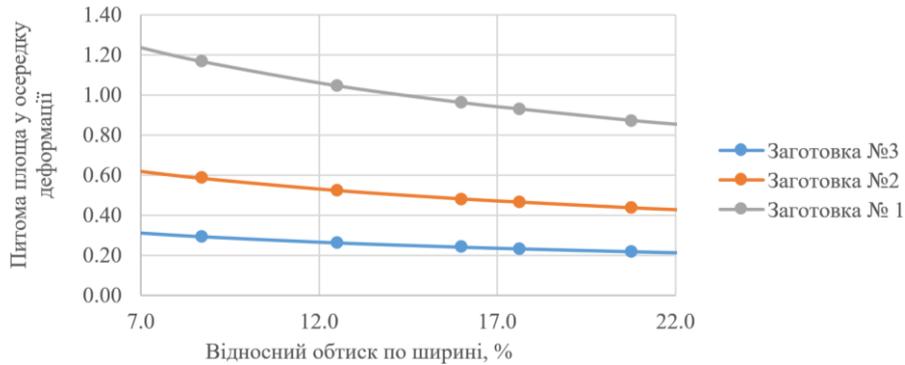


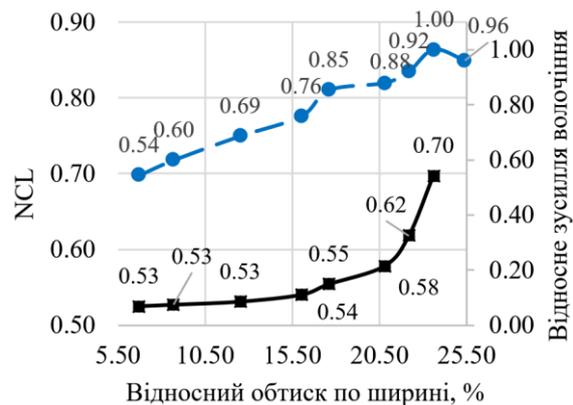
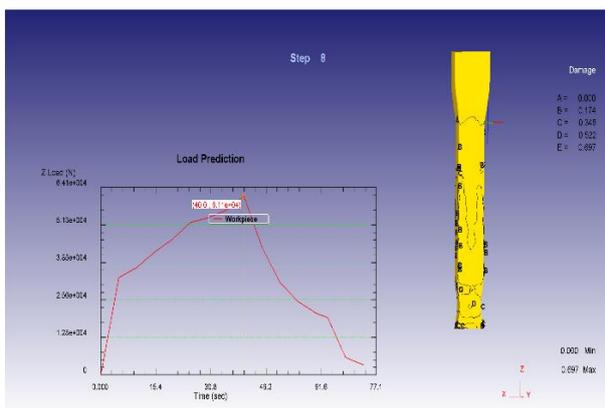
Рис. 3 – Питома площа поверхні у осередку деформації

На рис. 4а, 5а, 6а показані графіки «зусилля-переміщення» та епюри інтенсивності зміни нормалізованого критерію Кокрофта-Летема. Зони з позначкою «А» мають найменше значення нормалізованого критерію Кокрофта-Летема, з подальшим зростанням до максимального значення у зонах «Е». Критичне значення критерію руйнування при моделюванні визначається на кроці, який відповідає максимальному відносному зусиллю волочіння.

Розподіл значень критерію руйнування в залежності від збільшення відносного обтиску по ширині заготовок у процесі волочіння представлено на рис. 4б, 5б,

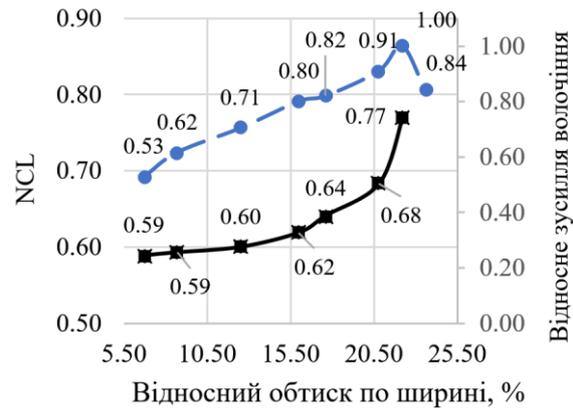
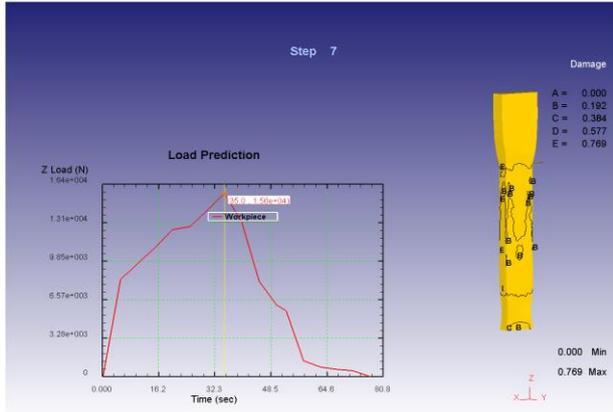
6б. Також на цих рисунках представлено графіки зміни відносного зусилля волочіння. Максимальне значення відносного зусилля волочіння відповідає критичному значенню нормалізованого критерію Кокрофта-Летема.

Як видно з рис. 4б, критичне значення, при якому відбувається руйнування найбільшої заготовки №3 розмірами $H_1^{№3} \times V_1^{№3} = 8,0 \times 24,0$ мм, для нормалізованого критерію Кокрофта-Летема становить 0,7. Для цієї заготовки питома площа поверхні у осередку деформації (при критичному значенні нормалізованого критерію Кокрофта-Летема) складає $0,207 \text{ мм}^2/\text{мм}^3$.



- – нормалізований критерій Кокрофта-Летема;
- – відносне зусилля волочіння, R_n/R_{max} .

Рис. 4 – Нормалізований критерій Кокрофта-Летема та відносне зусилля волочіння R_n/R_{max} заготовки №3: а – діаграма зміни зусилля волочіння та нормалізованого критерію Кокрофта-Летема; б – графік впливу відносного обтиску по ширині



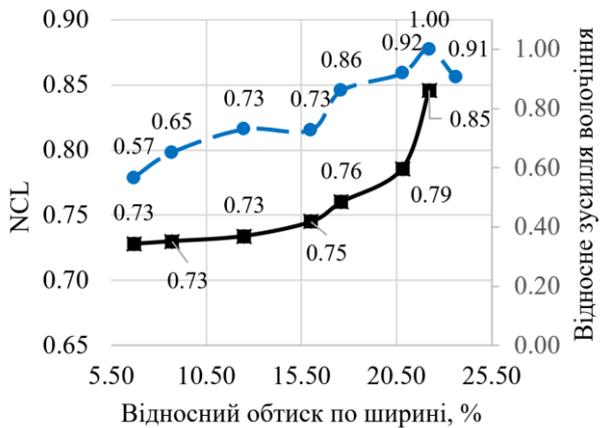
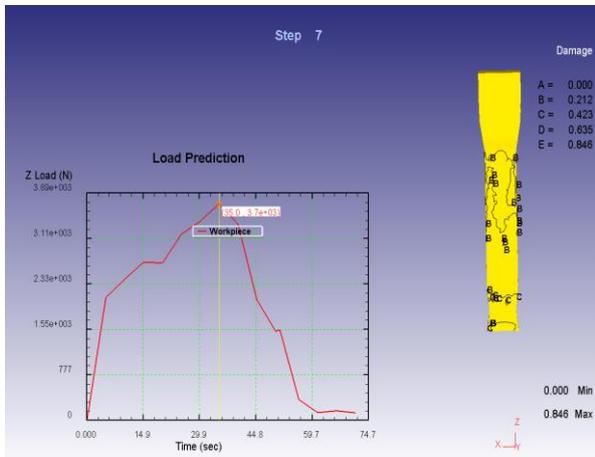
а б

—■— нормалізований критерій Кокрофта-Летема;
—●— відносне зусилля волочіння, Rn/Rmax.

Рис. 5 – Нормалізований критерій Кокрофта-Летема та відносне зусилля волочіння Rn/Rmax заготовки №2: а – діаграма зміни зусилля волочіння та нормалізованого критерію Кокрофта-Летема; б – графік впливу відносного обтиску по ширині

Для заготовки №2 розмірами $H_1^{№2} \times B_1^{№2} = 4,0 \times 12,0$ мм, критичне значення нормалізованого критерію Кокрофта-Летема становить 0,77. Для цієї заготовки питома площа поверхні у осередку деформації (при критичному значенні нормалізованого критерію Кокрофта-Летема) складає $0,425 \text{ мм}^2/\text{мм}^3$.

Для заготовки №1 розмірами $H_1^{№1} \times B_1^{№1} = 2,0 \times 6,0$ мм, критичне значення нормалізованого критерію Кокрофта-Летема становить 0,85. Для цієї заготовки питома площа поверхні у осередку деформації (при критичному значенні нормалізованого критерію Кокрофта-Летема) складає $0,828 \text{ мм}^2/\text{мм}^3$.



а б

—■— нормалізований критерій Кокрофта-Летема;
—●— відносне зусилля волочіння, Rn/Rmax.

Рис. 6 – Нормалізований критерій Кокрофта-Летема та відносне зусилля волочіння Rn/Rmax заготовки №1: а – діаграма зміни зусилля волочіння та нормалізованого критерію Кокрофта-Летема; б – графік впливу відносного обтиску по ширині

При волочінні мідних заготовок з встановленими постійними технологічними параметрами, номінальне значення нормалізованого критерію Кокрофта-Летема становить від 0,53-0,58 (для зразків з питоною площею

поверхні у осередку деформації $0,314-0,218 \text{ мм}^2/\text{мм}^3$ до 0,73-0,76 (для зразків з питоною площею поверхні у осередку деформації $1,252-0,929 \text{ мм}^2/\text{мм}^3$).

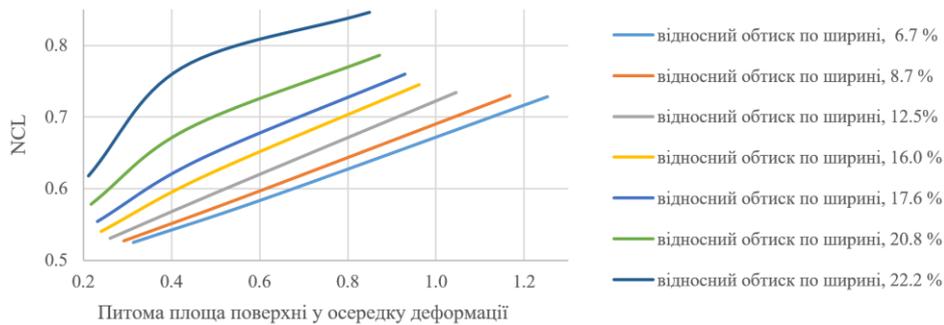


Рис. 7 – Графік впливу масштабного фактору на нормалізований критерій Кокрофта-Летема

При збільшенні розмірів зразків питома площа поверхні у осередку деформації відносно об'єму зменшується. Тобто номінальне значення нормалізованого критерію Кокрофта-Летема збільшується при зменшенні розміру заготовки. Це свідчить про те, що при однакових технологічних параметрах зі зменшенням геометричних розмірів заготовки вірогідність руйнування (обриву) прямокутного мідного дроту зменшується.

Отримані у дослідженні результати корелюються з роботами інших авторів щодо впливу геометричних параметрів деформованого зразка на процес волочіння. Так, у роботах [21, 22, 29] зазначається, що при зменшенні розміру дроту (за інших рівних умов) збільшується контактна площа, що припадає на об'єм деформційної зони, що може призводити до збільшення температури металу у осередку деформації. Також масштабний фактор проявляється у тому, що при однаковому фізичному стані металу межа міцності при волочінні збільшується зі зменшенням діаметру та товщини зразка. Вплив масштабного фактору на процес волочіння стає значущим при волочінні профілів тонких та надтонких розмірів.

Значення нормалізованого критерію Кокрофта-Летема, отримані у поточному дослідженні, також корелюються з іншими роботами. В роботах [9, 10], для процесу листового формування, номінальні значення нормалізованого критерію Кокрофта-Летема визначені на рівні 0,6, а критичні пошкодження за критерієм Normalized Cockcroft-Latham знаходяться в межах 1,35...1,4 при деформації сталі 30ХГСА.

Таким чином, дослідження щодо значень нормалізованого критерію Кокрофта-Летема у процесах пластичної деформації необхідно проводити з урахуванням різних фізико-механічних властивостей матеріалів, що деформуються, та з урахуванням відмінностей у технологічних параметрах деформації.

Кокрофта-Летема від масштабного фактору, що характеризується питомою площею поверхні у осередку деформації відносно об'єму заготовки у осередку деформації.

Аналіз представлених результатів показав, що при збільшенні розмірів зразків питома площа поверхні у осередку деформації відносно об'єму зменшується. Тобто менше значення питомої площі поверхні у осередку деформації (за інших рівних умов) відповідає більшим геометричним параметрам заготовки, і навпаки, зі зменшенням розміру заготовки відбувається збільшення питомої площі поверхні у осередку деформації при волочінні прямокутних профілів.

На основі розрахунків методом скінченних елементів визначено значення нормалізованого критерію Кокрофта-Летема у процесі волочіння прямокутних профілів. Так номінальне значення нормалізованого критерію Кокрофта-Летема становить 0,53-0,58 для заготовок з питомою площею поверхні у осередку деформації 0,314-0,218 мм²/мм³. В свою чергу, критичне значення нормалізованого критерію Кокрофта-Летема становить від 0,7 (для зразків з площею поверхні у осередку деформації, що припадає на одиничний об'єм 0,207 мм²/мм³) до 0,85 (для зразків з площею поверхні у осередку деформації, що припадає на одиничний об'єм 0,828 мм²/мм³). Після перевищення критичного значення нормалізованого критерію Кокрофта-Летема починається руйнування дроту. Тобто при збільшенні геометричних розмірів заготовки (у встановленому діапазоні) вірогідність обриву збільшується.

Подальші дослідження впливу масштабного фактору на обривність (руйнування) заготовки під час волочіння доцільно зосередити на врахуванні видів матеріалів, що деформуються, їх механічних властивостей та зміні технологічних параметрів під час волочіння.

Перелік використаних джерел

[1] Bao Y., Wierzbicki T. On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2004. Vol. 46, no. 1. Pp. 81-98. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2004.02.006>.

Висновки

У ході моделювання процесу холодного волочіння виявлено вплив масштабного фактору на процес руйнування мідних профілів прямокутної форми. Було визначено залежність нормалізованого критерію

- [2] Михалевич В. М., Добранюк Ю. В., Краєвський В. О. Порівняльне дослідження моделей граничних пластичних деформацій. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2018. No. 2(8). С. 56-64.
- [3] Cockcroft M. J., Latham D. J. Ductility and workability of metals. *Journal of the institute of metals*. 1968. Vol. 96. Pp. 33-39.
- [4] Di Donato S., Donati L., Negozio M. Copper Wire Multi-Pass Drawing: Process Modeling and Optimization. *Key Engineering Materials*. 2022. Vol. 926. Pp. 499-510. DOI: <https://doi.org/10.4028/p-g4wbpz>.
- [5] Damage Prediction in the Wire Drawing Process / González A., Cruchaga M., Celentano D., Ponthot J.-P. *Metals*. 2024. Vol. 14, no. 10. Article 1174. DOI: <https://doi.org/10.3390/met14101174>.
- [6] Analysis of Causes of Defects Appearance in Wire Drawing / J. Švejcár et al. *Defect and Diffusion Forum*. 2020. Vol. 405. Pp. 217-222. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ddf.405.217>.
- [7] Pouyafar V., Bolandi H., Meshkabadi R. Tube drawing analysis using upper bound and energy methods and validation by Cockcroft-Latham failure criteria. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2021. Vol. 44, no. 1. Article 9. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40430-021-03302-z>.
- [8] A Study on Al-6061-T6 Tube Drawing Limit Based on Critical Damage Value / Guo Z. Q., Wang Y. X., Zhou J., Chen B. *Advanced Materials Research*. 2010. Vol. 102-104. Pp. 69-73. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.102-104.69>.
- [9] Орлюк М. В. Граничні значення критеріїв руйнування при моделюванні процесів витягування в середовищі DEFORM. *Обробка матеріалів тиском*. 2017. № 2(45). С. 22-29.
- [10] Орлюк М. В., Піманов В. В. Використання програмного комплексу DEFORM для оптимізації операцій листового формування. *Обробка матеріалів тиском*. 2022. № 1(51). С. 110-116. DOI: [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2022-1\(51\)110](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2022-1(51)110).
- [11] Wójcik Ł., Pater Z. Comparison Analysis of Cockcroft – Latham Criterion Values of Commercial Plasticine and C45 Steel. *Acta Mechanica et Automatica*. 2018. Vol. 12, no. 4. Pp. 286-293. DOI: <https://doi.org/10.2478/ama-2018-0044>.
- [12] Gontarz A., Piesiak J. Determining the Normalized Cockcroft-Latham Criterion for Titanium Alloy Ti6Al4V in Tensile Testing At Room Temperature. *Proceedings of the World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering (MCM 2015)*, Barcelona, 20-21 June 2015. Article 248.
- [13] Thomsen E. G. Tensile Fracture of Drawn Copper and Mild Steel. *Journal of Engineering for Industry*. 1982. Vol. 104, no. 1. Pp. 91-96. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3185805>.
- [14] Cockcroft-Latham Ductile Fracture Criteria for Non Ferrous Materials / T. Kvačák et al. *Materials Science Forum*. 2014. Vol. 782. Pp. 373-378. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.782.373>.
- [15] Juul K. J., Nielsen K. L., Niordson C. F. Steady-state numerical modeling of size effects in micron scale wire drawing. *Journal of Manufacturing Processes*. 2017. Vol. 25. Pp. 163-171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.12.005>.
- [16] Al-Tamimi A., Darvizeh R., Davey K. Scaling of metal forming processes. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 207. Pp. 1069-1074. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.1132>.
- [17] Kukhar V. V., Grushko A. V., Vishtak I. V. Shape Indexes for Dieless Forming of the Elongated Forgings with Sharpened End by Tensile Drawing with Rupture. *Solid State Phenomena*. 2018. Vol. 284. Pp. 408-415. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.284.408>.
- [18] Chan W. L., Fu M. W., Yang B. Study of size effect in micro-extrusion process of pure copper. *Materials & Design*. 2011. Vol. 32, no. 7. Pp. 3772-3782. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.03.045>.
- [19] Scale effects in metal-forming friction and lubrication / Nielsen P. S., Paldan N. A., Caloon M., Bay N. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2011. Vol. 225, no. 9. Pp. 924-931. DOI: <https://doi.org/10.1177/1350650111405254>.
- [20] Numerical Modelling and Mechanical Characterization of Pure Aluminium 1050 Wire Drawing for Symmetric and Axisymmetric Plane Deformations / O. M. İkmaraş et al. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*. 2020. Vol. 7, no. 4. Pp. 539-548. DOI: <https://doi.org/10.18280/mmep.070405>.
- [21] Ніколаєв В. О. Технологія волочіння металу. Навчальний посібник. Запоріжжя: ЗДІА, 2003. 155 с.
- [22] Огородніков В. А., Співак О. Ю., Грушко О. В. Деформація волочінням і фізико-механічні властивості тонких термопарних дротів : монографія. Вінниця: ВНТУ, 2014. 112 с.
- [23] Ступицький В. В. Аналіз та вибір критерію локального руйнування під час імітаційного моделювання процесів різання у системі DEFORM 2D. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні*. 2012. № 729. С. 107-115.
- [24] Михалевич В. М., Добранюк Ю. В. Моделювання напружено-деформованого та граничного станів поверхні циліндричних зразків при торцевому стищенні : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2013. 180 с.
- [25] Грушко О.В., Огородніков В. А., Слободянюк Ю. О. Деформовність маловуглецевого дроту процесі його багатоступінчастого холодного волочіння. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2019. Вип. 144, № 3. С. 103-110.

- DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2019-144-3-103-110>.
- [26] Грушко О. В., Кириця І. Ю. Критерії деформовності з врахуванням властивостей матеріалу в параметрі напруженого стану. *Обробка матеріалів тиском*. 2022. № 1(51). С. 30-37. DOI: [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2022-1\(51\)30](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2022-1(51)30).
- [27] Лінійні та нелінійні моделі в теорії підсумовування пошкоджень / Михалевич В. М., Добрянюк В. Ю., Тютюнник О. І., Колісник М. А. *Обробка матеріалів тиском*. 2024. № 1(53). С. 100-108. DOI: [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2024-1\(53\)100](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2024-1(53)100).
- [28] Використання критеріїв руйнування програмного комплексу DEFORM для аналізу процесів витягування / Огрудков Я. А., Максимів І. М., Застеба М. О., Орлюк М. В. *Інновації молоді в машинобудуванні* : збірка праць XIII Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених та студентів, м. Київ, 19-30 травня 2020 р. № 2. С. 409-414.
- [29] Wang C., Guo B., Shan D. Friction related size-effect in microforming – a review. *Manufacturing Review*. 2014. Vol. 1. Article 23. DOI: <https://doi.org/10.1051/mfreview/2014022>.
- [30] Grushko A. V., Kukhar V. V., Slobodyanyuk Y. O. Phenomenological Model of Low-Carbon Steels Hardening during Multistage Drawing. *Solid State Phenomena*. 2017. Vol. 265. Pp. 114-123. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.265.114>.
- [31] Теоретичне визначення міцності композитного матеріалу в умовах всебічного стиснення / Білодєденко С.В., Іщенко А.О., Рассохін Д.О., Бем Р. *Теорія і практика металургії*. 2024. № 2. С. 60-69. DOI: <https://doi.org/10.15802/tpm.2.2024.09>.
- [32] Основи механіки руйнування. Навчальний посібник / Маборода В. С., Бобіна М. М., Лоскутова Т. В., Мініцька Н. В. Київ: НТУУ «КПІ», 2010. 124 с.
- [33] Долгов О. М. Механіка руйнування: підручник. Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2019. 166 с.
- [34] Кириця І. Ю. Феноменологічні критерії руйнування. *Вісник Хмельницького національного університету: Технічні науки*. 2022. Вип. 309, № 3. С. 75-81. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2022-309-3-75-81>.

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF THE SCALE FACTOR ON THE DESTRUCTION OF RECTANGULAR PROFILES DURING DRAWING USING THE NORMALIZED COCKROFT-LATHAM CRITERION

Taratuta K.V.

PhD (Engineering), associate professor, Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6671-9670>, e-mail: taratutazp@gmail.com

Rectangular profiles made of electrical copper are most often used in the cable industry and transformer construction. For the manufacture of rectangular profiles, depending on the size and purpose, continuous casting, rolling, pressing or drawing processes are used. In the latter case, rectangular profiles of small standard sizes are produced, with a height of 0.1 mm to 5.0 mm, a width of 1.0 mm to 50.0 mm. With such assortments, significant differences in the geometric parameters of the smallest profile compared to the largest are observed. Thus, the cross-sectional area of the smallest profile differs from the largest by 2500 times. It should also be taken into account that the profile width is many times greater than the thickness. The influence of the workpiece dimensions on the parameters of the drawing process, with other technological parameters unchanged, is characterized as a scale factor. The scale factor must be taken into account to avoid the destruction (breakage) of the workpiece during the drawing process, especially when adjusting the equipment to a new range of workpieces or when changing the deformable material. To prevent the destruction of a rectangular profile while maintaining the technological parameters of drawing, the aim of the work is to determine the nominal and critical values of the Cockcroft-Latham criterion for drawing copper rectangular profiles with different geometric dimensions of the workpiece. The achievement of this goal was achieved through computer modeling of the drawing process with variable geometric parameters of the workpiece. During the drawing process, the following parameters remained unchanged: workpiece material, initial yield strength and toughness of the material, workpiece extraction, relative crimping along the height and width of the workpiece, the angle of inclination of the generating drawing tool, friction coefficient. The probability of profile breakage was assessed using the normalized Cockcroft-Latham criterion. It has been established that the scale factor has an effect on the value of the Normalized Cockcroft-Latham criterion during the drawing of copper rectangular profiles. When drawing copper billets with fixed technological parameters, the nominal value of the normalized Cockcroft-Latham criterion is 0.53 - 0.58 for billets with a specific surface area in the deformation center of 0,314 – 0,218 mm²/mm³. It has been established that the specific surface area in the contact zone of the billet with the drawing relative to the volume of metal in the deformation center decreases with an increase in the geometric dimensions of the billet. The critical value of the Normalized Cockcroft-Latham criterion ranges from 0.7 (for samples

with a surface area in the deformation cell per unit volume of $0,207 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$) to 0.85 (for samples with a surface area in the deformation cell per unit volume of $0,828 \text{ mm}^2/\text{mm}^3$). After exceeding the critical value of the normalized Cockcroft-Latham criterion, the wire begins to break. That is, with an increase in the geometric dimensions of the workpiece (within the established range), the probability of breakage increases. The practical significance of the work lies in determining the nominal and critical values of the normalized Cockcroft-Latham criterion when drawing copper rectangular profiles to optimize the drawing route and reduce the probability of breakage of the deformed workpiece.

Keywords: drawing, rectangular profile, copper billet, Normalized Cockcroft-Latham criterion.

References

- [1] Y. Bao, and T. Wierzbicki, "On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 46, no. 1, pp. 81-98, 2004. doi: [10.1016/j.ijmecsci.2004.02.006](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2004.02.006).
- [2] V. Mykhalevych, Yu. Dobranyuk, and V. Kraevskiy, "Porivnialne doslidzhennia modelei hranychnykh plastychnykh deformatsii" ["Comparative study of border plastic deformations model's"], *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu – Bulletin of Mechanical Engineering and Transport*, no. 2(8), pp. 56-64, 2018. (Ukr.)
- [3] M.J. Cockcroft, and D.J. Latham, "Ductility and workability of metals," *Journal of the institute of metals*, vol. 96, pp. 33-39, 1968.
- [4] S. Di Donato, L. Donati, and M. Negrozio, "Copper Wire Multi-Pass Drawing: Process Modeling and Optimization," *Key Engineering Materials*, vol. 926, pp. 499-510, 2022. doi: [10.4028/p-g4wbpz](https://doi.org/10.4028/p-g4wbpz).
- [5] A. González, M. Cruchaga, D. Celentano, and J.-P. Ponthot, "Damage Prediction in the Wire Drawing Process," *Metals*, vol. 14, no. 10, article 1174, 2024. doi: [10.3390/met14101174](https://doi.org/10.3390/met14101174).
- [6] J. Švejcar, M. Juliš, L. Klakurková, P. Gejdoš, and T. Zikmund, "Analysis of Causes of Defects Appearance in Wire Drawing," *Defect and Diffusion Forum*, vol. 405, pp. 217-222, 2020. doi: [10.4028/www.scientific.net/ddf.405.217](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ddf.405.217).
- [7] V. Pouyafar, H. Bolandi, and R. Meshkabadi, "Tube drawing analysis using upper bound and energy methods and validation by Cockcroft-Latham failure criteria," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 44, no. 1, article 9, 2021. doi: [10.1007/s40430-021-03302-z](https://doi.org/10.1007/s40430-021-03302-z).
- [8] Z.Q. Guo, Y.X. Wang, J. Zhou, and B. Chen, "A Study on Al-6061-T6 Tube Drawing Limit Based on Critical Damage Value," *Advanced Materials Research*, vol. 102-104, pp. 69-73, 2010. doi: [10.4028/www.scientific.net/amr.102-104.69](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.102-104.69).
- [9] M.V. Orliuk, "Hranychni znachennia kryteriiv ruinuvannia pry modeliuvanni protsesiv vytyahuvannia v seredovyshchi DEFORM" ["Limit values of failure criteria when modeling stretching processes in the DEFORM environment"], *Obrobka materialiv tyskom – Materials working by pressure*, № 2(45), pp. 22-29, 2017. (Ukr.)
- [10] M. Orliuk, and V. Pimanov, "Vykorystannia prohramnoho kompleksu DEFORM dlia optymizatsii operatsii lystovoho formuvannia" ["Using of the DEFORM software package to optimize sheet metal forming operations"], *Obrobka materialiv tyskom – Materials working by pressure*, № 1(51), pp. 110-116, 2022. doi: [10.37142/2076-2151/2022-1\(51\)110](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2022-1(51)110).
- [11] Ł. Wójcik, and Z. Pater, "Comparison Analysis of Cockroft – Latham Criterion Values of Commercial Plasticine and C45 Steel," *Acta Mechanica et Automatica*, vol. 12, no. 4, pp. 286-293, 2018. doi: [10.2478/ama-2018-0044](https://doi.org/10.2478/ama-2018-0044).
- [12] A. Gontarz, and J. Piesiak, "Determining the Normalized Cockroft-Latham Criterion for Titanium Alloy Ti6Al4V in Tensile Testing At Room Temperature," in *Proc. of the World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering (MCM 2015)*, Barcelona, June 20-21, 2015, article 248.
- [13] E.G. Thomsen, "Tensile Fracture of Drawn Copper and Mild Steel," *Journal of Engineering for Industry*, vol. 104, no. 1, pp. 91-96, 1982. doi: [10.1115/1.3185805](https://doi.org/10.1115/1.3185805).
- [14] T. Kvačakaj et al., "Cockcroft-Latham Ductile Fracture Criteria for Non Ferrous Materials," *Materials Science Forum*, vol. 782, pp. 373-378, 2014. doi: [10.4028/www.scientific.net/msf.782.373](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.782.373).
- [15] K.J. Juul, K.L. Nielsen, and C.F. Niordson, "Steady-state numerical modeling of size effects in micron scale wire drawing," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 25, pp. 163-171, 2017. doi: [10.1016/j.jmapro.2016.12.005](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.12.005).
- [16] A. Al-Tamimi, R. Darvizeh, and K. Davey, "Scaling of metal forming processes," *Procedia Engineering*, vol. 207, pp. 1069-1074, 2017. doi: [10.1016/j.proeng.2017.10.1132](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.1132).
- [17] V.V. Kukhar, A.V. Grushko, and I.V. Vishtak, "Shape Indexes for Dieless Forming of the Elongated Forgings with Sharpened End by Tensile Drawing with Rupture," *Solid State Phenomena*, vol. 284, pp. 408-415, 2018. doi: [10.4028/www.scientific.net/ssp.284.408](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.284.408).
- [18] W.L. Chan, M.W. Fu, and B. Yang, "Study of size effect in micro-extrusion process of pure copper," *Materials & Design*, vol. 32, no. 7, pp. 3772-3782, 2011. doi: [10.1016/j.matdes.2011.03.045](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.03.045).
- [19] P.S. Nielsen, N.A. Paldan, M. Calaon, and N. Bay, "Scale effects in metal-forming friction and lubrication," in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, vol. 225, no. 9, pp. 924-931, 2011. doi: [10.1177/1350650111405254](https://doi.org/10.1177/1350650111405254).
- [20] O. M. Ikumapayi et al., "Numerical Modelling and Mechanical Characterization of Pure Aluminium 1050

- Wire Drawing for Symmetric and Axisymmetric Plane Deformations,” *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, vol. 7, no. 4, pp. 539-548, 2020. doi: **10.18280/mmep.070405**.
- [21] V.O. Nikolaiev, *Tekhnolohiia volochinnia metalu. Navchalnyi posibnyk* [Metal drawing technology. Textbook]. Zaporizhzhia, Ukraine: ZDIA Publ., 2003. (Ukr.)
- [22] V.A. Ohorodnikov, O.Yu. Spivak, and O.V. Hrushko, *Deformatsiia volochinniam i fizyko-mekhanichni vlastyivosti tonkykh termoparnykh drotiv : monohrafiia* [Drawing deformation and physical and mechanical properties of thin thermocouple wires: monograph]. Vinnytsia, Ukraine: VNTU Publ., 2014. (Ukr.)
- [23] V. Stupnytskyu, “Analiz ta vybir kryteriiu lokalnoho ruinuvannia pid chas imitatsiinoho modeliuвання protsesiv rizannia u systemi DEFORM 2D” [“Analysis and selection of the local failure criterion during simulation modeling of cutting processes in the DEFORM 2D system”], *Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika». Optyimizatsiia vyrobnychkykh protsesiv i tekhnichni kontrol u mashynobuduvanni ta pryladobuduvanni – Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Series of Production Processes Optimization and Technical Control in Engineering and Instrumentation*, № 729, pp. 107-115, 2012. (Ukr.)
- [24] V.M. Mykhalevych, and Yu.V. Dobraniuk, *Modelivannia napruzhenno-deformovanoho ta hranychnoho staniv poverkhni tsylindrychnykh zrazkiv pry tortsevomu stysnenni : monohrafiia* [Modeling of stress-strain and limit states of the surface of cylindrical specimens under end compression: monograph]. Vinnytsia, Ukraine: VNTU Publ., 2013. (Ukr.)
- [25] O.V. Grushko, V.A. Ogorodnikov, Yu.O. Slobodianiuk, “Deformovnist malovuhletsevoho drotuv protsesi yoho bahatostupinchastoho kholodnoho volochinnia” [“Deformation of Low-Carbon Wire in the Process of its Multistage Cold Drawing”], *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu – Visnyk of Vinnytsia Polytechnical Institute*, vol. 144, № 3, pp. 103-110, 2019. doi: **10.31649/1997-9266-2019-144-3-103-110**.
- [26] O. Hrushko, and I. Kyrytsia, “Kryterii deformovnosti z vrakhuvanniam vlastyivostei materialu v parametri napruzhenoho stanu” [“Criteria of deformity taking into account the properties of the material in the parameter of the stress state”], *Obrobka materialiv tyskom – Materials working by pressure*, № 1(51), pp. 30-37, 2022. doi: **10.37142/2076-2151/2022-1(51)30**.
- [27] V. Mykhalevych, Y. Dobraniuk, O. Tiutiunyk, and M. Kolisnyk, “Liniini ta nelineini modeli v teorii pidsumovuvannia poshkodzen” [“Linear and non-linear models in damage summation theory”], *Obrobka materialiv tyskom – Materials working by pressure*, № 1(53), pp. 100-108, 2024. doi: **10.37142/2076-2151/2024-1(53)100**.
- [28] Ya.A. Ohrudkov, I.M. Maksymiv, M.O. Zasteba, and M.V. Orliuk, “Vykorystannia kryteriiv ruinuvannia prohramnoho kompleksu DEFORM dlia analizu protsesiv vytyahuvannia” [“Using the DEFORM software package failure criteria for the analysis of pulling processes”], in *Proc. of the XIII Int. Sci.-Techn. Conf. of Young Scientists and Students «Youth Innovations in Mechanical Engineering»*, Kyiv, Ukraine, May 19-30, 2020, № 2, pp. 409-414. (Ukr.)
- [29] C. Wang, B. Guo, and D. Shan, “Friction related size-effect in microforming – a review,” *Manufacturing Review*, vol. 1, article 23, 2014. doi: **10.1051/mfreview/2014022**.
- [30] A.V. Grushko, V.V. Kukhar, and Y.O. Slobodyanyuk, “Phenomenological Model of Low-Carbon Steels Hardening during Multistage Drawing”, *Solid State Phenomena*, vol. 265, pp. 114-123, 2017. doi: **10.4028/www.scientific.net/ssp.265.114**.
- [31] S.V. Bilodedenko, A.O. Ischenko, D.O. Rassokhin, and R. Böhm, “Teoretychne vyznachennia mitsnosti kompozytnoho materialu v umovakh vsebichnoho stysnennia” [“Theoretical determination of the strength of composite material under conditions of comprehensive compression”], *Teoriia i praktyka metalurhii – Theory and Practice of Metallurgy*, no. 2, pp. 60-69, 2024. doi: **10.15802/tpm.2.2024.09**.
- [32] V.S. Maboroda, M.M. Bobina, T.V. Loskutova, and N.V. Minitcka, *Osnovy mekhaniky ruinuvannia. Navchalnyi posibnyk* [Fundamentals of Fracture Mechanics. Textbook]. Kyiv, Ukraine: NTUU «KPI» Publ., 2010. (Ukr.)
- [33] O.M. Dolhov, *Mekhanika ruinuvannia: pidruchnyk* [Fracture mechanics: textbook]. Dnipro, Ukraine: NTU « Dniprovska politekhnika» Publ., 2019. (Ukr.)
- [34] I. Kyrytsia, “Fenomenolohichni kryterii ruinuvannia” [“Phenomenological criteria of destruction”], *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu: Tekhnichni nauky – Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*, vol. 309, № 3, pp. 75-81, 2022. doi: **10.31891/2307-5732-2022-309-3-75-81**.

Стаття надійшла 06.11.2025

Стаття прийнята 09.12.2025

Стаття опублікована 29.12.2025

Цитуйте цю статтю як: Таратута К. В. Оцінка впливу масштабного фактору на руйнування прямокутних профілів при волочінні з використанням нормалізованого критерію Кокрофта-Летема. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 52. С. 102-113. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.351010>.