

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу Боровіка Павла Володимировича «Розвиток теоретичних основ та вдосконалення технології і обладнання процесів операцій розділення в прокатному виробництві», представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.05 – «Процеси та машини обробки тиском»

1. Оцінка структури та змісту дисертації

Дисертація складається зі вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел та трьох додатків. Список використаних джерел містить 414 найменувань, додатки складаються з 21 сторінки. Обсяг основного тексту дисертації містить 270 сторінок, а також 176 рисунків і 30 таблиць.

У **вступі** кваліфікаційної роботи наведено її загальну характеристику, обґрунтовано актуальність теми, а також показано відповідність роботи до стратегій розвитку та відродження вітчизняного машинобудування, наведено мету і задачі досліджень, дана характеристика об'єкта, предмета та методів дослідження. Описано особистий внесок здобувача. Визначено наукову новизну, практичну цінність отриманих результатів та наведено відомості щодо апробації роботи.

В **першому розділі** за результатами аналізу технологій, обладнання, методів розрахунку визначені перспективи розділових операцій у прокатному виробництві, обґрунтовано вибір напрямку дослідження, що потребує розвитку і узагальнення теоретичних основ процесів розділення, а на їх основі – розробки уніфікованих математичних моделей і практичних рекомендацій.

Відзначено, що все це здатні забезпечити сучасні методи математичного моделювання з найбільш повним обсягом інформації при високому ступеню адекватності.

Стверджується, що ефективне поліпшення техніко-економічних показників процесів розрізання металопрокату на ножицях можливе за рахунок розвитку наукових і практичних основ застосування методу скінчених елементів (МСЕ)

для вирішення задач в яких поєднуються теорії пружності, пластичності та руйнування та враховуються змінні умови протікання процесу. Проте це потребує обґрунтування типу скінченних елементів, правил контролю і управління їх геометрією в зоні розділення, процедурою формування та зростання тріщини, а також врахування впливу пружних характеристик ножиць та термодинамічних ефектів в матеріалі під час розділення.

На основі аналізу стану питання визначено мету і задачі роботи.

У другому розділі автор визначався з напрямками та методами досліджень технологій і обладнання розділових процесів листового і сортового металопрокату. За основу теоретичних досліджень був обраний МСЕ, а для підвищення ефективності його застосування – елементи теорії планування експерименту та статистичної обробки, а для оцінки адекватності та отримання нових функціональних зв'язків – методи кореляційного і регресійного аналізу.

Експериментальні дослідження проводили переважно шляхом фізичного моделювання на лабораторному обладнанні з подальшою статистичною обробкою результатів, насамперед, для підтвердження адекватності та достовірності розроблених математичних моделей та розширення і уточнення вихідних даних для їх розробки.

Третій розділ присвячений розробці прикладних аспектів моделювання процесів розділення методом скінченних елементів. Автором було проаналізовані та напрацьовані практичні основи моделювання з використанням скінченно-елементного програмного комплексу Abaqus, стосовно типу скінченних елементів та застосування підходу Лагранжа-Ейлера щодо елементів безпосередньо в осередку розрізання.

Також автором зазначається, що при вивченні напружено-деформованого стану (НДС) інструмент слід приймати абсолютно жорстким, застосовуючи аналітичні поверхні або скінченні елементи, а контактну взаємодію деформованого металу та інструменту слід описувати законом тертя Кулона з обмеженням дотичного контактного напруження. При цьому пластичні властивості деформованого матеріалу слід описувати моделлю пластичності Мізеса, а модель руйнування феноменологічною моделлю для прогнозування

початку пошкодження матеріалу внаслідок зародження, зростання і злиття пустот з використанням підходу Хіллеборга. Крім того є доцільним враховувати жорсткість станини ножиць, а також термодинамічні явища в процесах гарячого розділення.

Автором запропонований алгоритм отримання та обробки даних за результатами моделювання МСЕ, здатний забезпечити деталізовану інформацію, що сприяє виявленню та встановленню нових причинно-наслідкових зв'язків досліджуваних процесів.

Крім того, автором запропоновані алгоритми, щодо визначення механічних властивостей розрізуваних матеріалів в гарячому та холодному станах.

У **четвертому розділі** на основі розроблених підходів автором розроблено ряд моделей стосовно процесів поперечного розрізання для деяких типів ножиць з точки зору енергосилових параметрів та показників якості розрізаного металопрокату на базі яких виконано теоретичні дослідження. Так стосовно процесу розрізання паралельними ножами в гарячому стані досліджено вплив хімічного складу сталей та швидкості руху ножів на опір, а для умов холодного розрізання встановлено вплив механічних властивостей розрізуваного матеріалу та кінематичних параметрів реалізації процесу на опір розрізанню та відносне проникнення ножів до сколювання. Стосовно процесів розділення гарячого та холодного розділення фігурними ножами квадратних, круглих і складних профілів та процесів поперечного розрізання листового металопрокату шевронними та дуговими ножами автором виконані дослідження та розроблені рекомендації щодо їх вдосконалення, зокрема встановлено які саме впливають на якість розрізання та силові характеристики ножів певних конструкцій.

В **п'ятому розділі** представлені математичні моделі та аналіз на їх основі процесів поздовжнього різання металопрокату на дискових та ножицях з дуговим ножом. Зокрема щодо сталої швидкості листа в ножах дискових ножиць при обрізанні бічних кромek товстих листів, автором встановлено, що в умовах гарячого і холодного розрізання, вона становить 0,9...0,95 окружної швидкості диска. Стосовно процесу перекочування ножа при обрізанні бічних кромek на здвоєних кромкообрізних ножицях, автор, на прикладі чотирьох марок сталей

розрізуваних в умовах стану 2800, вказує на необхідність отримання уточненої математичної моделі розрахунку відносного проникнення до сколювання. Також досліджено процес розрізання тонких листів і смуг багатодисковими ножицями.

В шостому розділі наведені результати експериментальних досліджень процесів поздовжнього та поперечного розрізання металопрокату на ножицях паралельними та фігурними ножами в гарячому та холодному станах. Автор вказує, що отримані результати в цілому підтверджують адекватність розроблених скінченно-елементних моделей про що свідчить високий ступінь кореляції. Додатково досліджене питання щодо впливу зношування різальних кромки ножів на якість розрізання та значення коефіцієнту збільшення сили розрізання через знос різальних кромки і збільшення бічного зазору.

В сьомому розділі представлено ряд емпіричних та регресійних моделей, котрі адаптовані до автоматизованого проектування, а також практичні рекомендації та технічні рішення щодо підвищення ефективності процесів і обладнання поперечного і поздовжнього розрізання металопрокату із застосуванням розроблених математичних моделей, методик розрахунку та технічних рішень новизна яких підтверджена патентами України на корисні моделі.

Кожний розділ дисертаційної роботи закінчується висновками до нього. Наприкінці роботи представлено загальні висновки до дисертації, в яких відображені основні результати досліджень.

Список використаних джерел є інформативним та в достатній мірі охоплює область обробки тиском щодо процесів розділення в прокатному виробництві та містить великий обсяг оброблених джерел.

Додатки містять в собі дані з довідникової інформації та акти впровадження результатів роботи.

2. Актуальність теми дисертаційного дослідження

В сучасному промислово-економічному стані України її металургійна галузь є базовою складовою, котра має конкурувати на світовому ринку металопрокату для чого необхідно забезпечувати високий рівень якості готової

продукції та підвищений рівень виходу придатного. В даному контексті операції поздовжнього та поперечного розрізання металопрокату і обладнання, що їх реалізує, мають також забезпечувати високу продуктивність, мінімізацію енерговитрат та відходів. Однак багатофакторність процесів та обладнання на яких сфокусовано увагу потребує системного підходу, який дозволить узагальнити якісні ті кількісні оцінки стосовно енергосилових параметрів та показників якості. В рамках сучасних наукових підходів до вирішення практичних задач найбільш застосовуваним є МСЕ, але його застосування в задачах стосовно розділових операцій прокатного виробництва потребує ґрунтовних науково-практичних рекомендацій. В рамках реалізації даного підходу формується перспектива розробки науково обґрунтованих практичних рішень та комендацій стосовно технологій та обладнання операцій розрізання на ножицях в умовах прокатного виробництва.

З цієї точки зору, дисертація на тему «Розвиток теоретичних основ та вдосконалення технології і обладнання процесів операцій розділення в прокатному виробництві», яка вирішує проблему вдосконалення техніко-економічних показників процесів поздовжнього і поперечного розділення листового і сортового металопрокату є актуальною.

Зв'язок з державними науковими програмами, планами та темами:

Дисертаційна робота Боровіка П.В. виконана в рамках держбюджетних НДР «Розвиток теоретичних основ безперервного розливання нержавіючих та автолистових сталей» (№ ДР 0110U000094); «Визначення механізмів та створення теорії електроімпульсної консолідації нових порошкових матеріалів» (№ ДР 0114U002537), госпдоговірної НДР з Міністерством освіти і науки України «Фізичне і математичне моделювання процесів твердіння» (№ ДР 0109U000834). Також робота має виконувалась в частині кафедральних НДР «Удосконалення технологічних процесів в галузі механіки машин» і «Удосконалення технологій та обладнання процесів правки листового і сортового металопрокату на основі розвитку методів по їх автоматизованому розрахунку і проектуванню».

У цих роботах автор брав участь як відповідальний виконавець.

3. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих в дисертації та їх достовірність

Як з наукової так і з практичної точки зору, представлені в роботі наукові положення, висновки та рекомендації є цілком обґрунтованими. Дисертант чітко визначив мету і головні задачі наукового дослідження, описав його об'єкт та предмет. Комплексний підхід в вирішенні поставлених задач був сформований завдяки використанню попередніх експериментальних даних, які слугували базою для формування МСЕ моделей розділових процесів. Адекватність всіх моделей була практично підтвердження за результатами лабораторних експериментів.

На базі розроблених скінченно-елементних моделей, за рахунок застосування методів чисельних рішень, експериментальних досліджень та використання методів кореляційного і регресійного аналізу, автор створив нові алгоритми, здатні врахувати нові фактори та підвищити точність розрахунку сили та визначення показників якості. Все це свідчить про достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації. Застосований набір експериментальних методів та використаних теоретичних та практичних підходів є достатньо успішним для досягнення поставленої мети.

4 Наукова новизна отриманих результатів

В дисертації містяться положення, що характеризуються наступною новизною:

1. Вперше обґрунтовано узагальнений підхід до розробки методом скінченних елементів математичних моделей процесів гарячого та холодного розрізання на ножицях, що дозволяє теоретично досліджувати якісні та енергосилові показники процесів розрізання і вдосконалювати технологічні режими та обладнання.

2. Вперше на базі розробленого алгоритму з отримання та обробки даних моделювання методом скінченних елементів безпосередньо в зоні розрізання встановлено вплив змінної в часі швидкості деформації на функціональні зв'язки «опір розрізанню»-«напруження» та «відносне проникнення ножів»-«деформація».

3. Вперше шляхом скінченно-елементного моделювання та з використанням експериментальних даних процесу гарячого розрізання паралельними ножами встановлено функціональні зв'язки та кількісні оцінки впливу на опір розрізанню варіації хімічного складу розрізуваних сталей та швидкості руху ножів з урахуванням термодинамічних ефектів в металі та пружних характеристик ножиць, що дозволило підвищити точність розрахунку енергосилових параметрів.

4. Розширено розуміння процесів холодного розрізання та встановлено вплив на величину відносного проникнення ножів в метал до сколювання сукупної взаємодії геометричної форми і висоти поперечного перерізу профіля, а також механічних властивостей матеріалу і швидкості руху ножа, що дозволило уточнити інтегральні значення енергосилових параметрів розрізання на ножицях.

5. Уточнено величину коефіцієнту збільшення сили розрізання внаслідок зношення різальних кромek і збільшення бічного зазору для поперечного розрізання, що дозволяє при проектуванні підвищити точність визначення максимального навантаження на ножиці.

6. Уточнено за результатами об'ємного моделювання методом скінченних елементів процесів поперечного розділення фасонними (профільованими) ножами різних типів та встановлено вплив їхніх геометричних параметрів на навантаження ножиць та залишкову деформацію в зонах розділення.

7. Вперше визначено та надано оцінку впливу сукупності сил зовнішнього опору на кінематику руху металу при розрізанні товстих листів на дискових ножицях, що дозволило формалізувати умови синхронізації при комбінуванні процесів розрізання дисковими ножами та правлення листів, які сприяють розширенню розрізуваного сортаменту та запобіганню можливих дефектів форми готових листів.

5. Практичне значення отриманих результатів

Практична цінність роботи, що відображена в її результатах стосується розвитку наукових і практичних основ застосування методу скінченних елементів при вирішенні комбінованих задач з урахуванням змінних умов протікання

процесів розрізання на ножицях в прокатному виробництві. В дисертаційній роботі мають практичне значення для вдосконалення процесів розрізання на ножицях в прокатному виробництві наступні результати:

1. Нові спосіб, методика розрахунку кінематичних параметрів та конструкція шевронного ножа, зокрема з регульованим кутом нахилу різальних площин та шевронного ножа з постійним кутом нахилу різальних площин, що дозволяють збільшити відсоток листів, котрі відповідають підвищеним вимогам площинності (пат. № 122024, 104285, 90095 Україна).

2. Практичні рекомендації щодо профілювання фасонних ножів для розрізання квадратних заготовок в гарячому стані, котрі дозволяють покращити якість торцевої поверхні розрізуваної заготовки.

3. Технічні рішення спрямовані на вдосконалення процесу поздовжнього розрізання дисковими ножами шляхом внесення конструктивних змін та/або суміщенням з процесами правки, які спрямовані на розширення сортаменту і підвищення якості розрізання (пат. № 63571, 72820, 87339, 122009 Україна).

4. Методики та програмні засоби з автоматизованого розрахунку механічних властивостей матеріалів, які дозволяють підвищити точність визначення розрахункових навантажень на обладнання та показників якості при проектуванні і розробці технологічних режимів та можуть бути використані в системах автоматизованого керування.

Основні практичні результати роботи були використані на ДП «УкрНТЦ «Енергосталь» (м. Харків), ПАТ «НДіПТІМ» (м. Краматорськ), ПрАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» (м. Краматорськ), НВП «Дніпроенергосталь» (м. Запоріжжя).

Окремі результати дисертаційної роботи також використовуються на кафедрі «Машинобудування та прикладна механіка» Східноукраїнського національного університету ім В. Даля.

6. Рекомендації з використання результатів дисертації

Результати дисертаційної роботи можуть бути ефективно використані на металургійних підприємствах та підприємствах важкого машинобудування, що виробляють металургійне обладнання, інших підприємствах де використовуються ножиці для розрізання металопродукції. Також результати рекомендується використовувати в науково-дослідних інститутах України, в яких проводяться розробки в області розділових операцій прокатного виробництва.

В вищих навчальних закладах України результати можуть бути використані при підготовці фахівців в області обробки металів тиском та галузевого машинобудування.

7. Повнота викладення основних результатів дисертації в наукових фахових виданнях

Матеріали дисертаційної роботи та її основні положення опубліковані в 54 друкованих наукових працях, що повністю відображають її зміст. Серед них 46 статей опубліковано в наукових збірниках та журналах і 8 патентів України на корисну модель. 36 робіт опубліковано у наукових фахових виданнях України. Із загального числа всіх публікацій 16 включено в міжнародні наукометричні бази, з яких 4 – в журналах включених до *Web of Science Core Collection*, 22 роботи опубліковані в матеріалах міжнародних науково-технічних конференцій.

8. Апробація результатів дисертаційної роботи

Результати дисертації доповідалися та обговорювалися на 25 конференціях.

9. Зауваження

1. Сучасна теорія деформовності передбачає ґрунтовний аналіз напружено-деформованого стану, побудови шляхів деформування, діаграм пластичності для відповідних умов деформування тощо. В роботі здобувача більшістю з цих аспектів знехтувано, лише фрагментально згадані діаграми пластичності. Наприклад, на стор. 93 діаграма пластичності наведена без цифр та назви матеріалу, а діаграма сталі Ст.3, яка використана в розрахунках і згадується на стор. 158, не наведена, є лише посилання. Діаграми пластичності автором для

розглядуваних матеріалів не будувались, хоча коректність такої характеристики суттєво впливає на конкретні кількісні результати розрахунків граничного стану процесу різання. Вплив шляхів деформування на граничні деформації в роботі не розглядався. Проте саме від їх виду залежить вибір того чи іншого критерію деформовності, розбіжність розрахунку за якими в окремих випадках може відрізнятись в рази (див. роботи рецензента). З цієї точки зору вибір критерію руйнування, який застосований в роботі, є необґрунтованим.

2. На стор. 91 наведені формули (2.7), (2.8) з посиланням не на першоджерело. Наприклад, розрахунок використаного ресурсу пластичності за формулою (2.8) запропонував, з точністю до позначень, В.Л. Колмогоров, а показник (2.7) - Бабичков. Натомість посилання здійснено на теоретичні матеріали по Abaqus. В роботі немає огляду робіт вчених з наукових шкіл В.А. Огороднікова, Г.Д. Деля та ін., які відомі не тільки в Україні і пострадянському просторі, але й на світовому рівні. Адже робота присвячена операціям розділення, які характеризуються вичерпанням ресурсу пластичності.

3. Висновок автора, у вигляді речення на стор. 94 «Таким чином, очевидно, що пластична деформація руйнування буде різною для скінченних елементів різного розміру і тому не може використовуватися в якості параметра матеріалу для специфікації закону розвитку пошкоджень в матеріалі» є необґрунтованим і таким, що порушує основні засади феноменологічної теорії деформовності. Якщо говорити про специфіку застосування цієї теорії до МСЕ, то тут питання повинно стояти не в сумнівності величини пластичної деформації як міри до вивчення пошкоджень, а в особливостях рутинних процедур формування сітки кінцево-елементного моделювання, наприклад, її розмірів в залежності від конкретної задачі, величини градієнтів деформацій, напружень тощо.

4. В роботі варто було приділити більше уваги вивченню (як теоретичному так і експериментальному) таких специфічних параметрів прийнятих моделей матеріалу, як: «характеристична довжина», «еквівалентне пластичне переміщення», «показник накопичення пошкоджуваності», «показник швидкісного зміцнення», які використовуються для моделювання МСЕ.

Незрозуміло, в який спосіб автор експериментально вивчає ці характеристики для досліджуваних матеріалів, адже характеристики конкретного матеріалу можуть сильно відрізнятися від аналогічних даних, взятих з літературних джерел.

5. В п. 3.7 автор приділяє увагу вибору моделі матеріалу, і зокрема, алгоритму побудови кривої зміцнення. Проте, обчислення показника зміцнення (3.5) в такий спосіб може бути справедливим для матеріалів, які при випробовуваннях на розтяг не утворюють шийки.

6. Модель матеріалу, взята за основу (3.2), (3.10), (3.11) відповідає двопараметричній степеневій моделі зміцнення П. Людвіга. Але, визначення параметрів кривої течії за стандартними механічними характеристиками, як показано в роботах рецензента, сильно чутливо до відхилень «реальної кривої зміцнення» від зазначеної апроксимації. Наприклад, для матеріалів, які мають площадку текучості, такий підхід не дасть належного практичного результату через невизначеність однієї із реперних точок – пластичної деформації, що відповідає напруженню текучості.

7. Варто було виконати аналіз впливовості факторів в отриманих регресійних моделях, наприклад (7.18). Цей аналіз, зазвичай, супроводжується побудовою діаграм Парето. Також не відкинуто в моделі фактори та їх поєднання, які є статистично незначущі – це перевантажує модель непотрібною інформацією.

10. Ідентичність автореферату змісту дисертації

Зміст автореферату достатньо повно розкриває основні положення дисертації та відповідає вимогам до оформлення.

11. Загальна оцінка дисертаційної роботи

Представлена дисертація виконана на достатньому професійному рівні, в повній мірі проілюстрована графічним і табличним матеріалом, доступно викладена за мовою і стилем, логічна за структурою висвітлення матеріалу.

Загальним висновком щодо роботи можна стверджувати, що вона є завершеним самостійним науковим дослідженням, виконаним на актуальну тему, має наукову і практичну цінність.

Зазначені зауваження, в цілому, не впливають на якість, а також загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи здобувача та можуть бути використані як побажання для подальшої роботи з наукового пошуку.

Дисертаційна робота Боровіка Павла Володимировича «Розвиток теоретичних основ та вдосконалення технології і обладнання процесів операцій розділення в прокатному виробництві» є завершеною науковою працею, що вирішує актуальну науково-технічну проблему в напрямку вдосконалення техніко-економічних показників процесів поздовжнього і поперечного розділення листового і сортового металопрокату

Оцінюю дану роботу позитивно, вона відповідає кваліфікаційним вимогам до докторських дисертацій, викладеним в п. 9 та п. 10 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року № 567. Таким чином вважаю що її автор, Боровік Павло Володимирович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.05 – «Процеси та машини обробки тиском».

Офіційний опонент

Зав. кафедри опору матеріалів та прикладної механіки,
Вінницький національний технічний університет,
доктор технічних наук, професор

Грушко О. В.

