

## **ВІДГУК**

офіційного опонента, доктора технічних наук, професора  
**КУХАРА Володимира Валентиновича**  
на дисертацію **КОЛІСНИКА Миколи Анатолійовича**  
на тему: **«Розвиток процесів штампування обкочуванням на основі аналізу  
механіки формоутворення складнопрофільних виробів»**,  
подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії  
за спеціальністю 132 Матеріалознавство  
(галузь знань 13 Механічна інженерія)

### **1. Оцінка структури та змісту дисертації**

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків та списку використаних джерел і додатків, що включає 208 сторінок, у тому числі додатків на 29 сторінках. Основний текст дисертації розміщено на 159 сторінках, серед яких є сторінки, повністю зайняті рисунками (стор. 138 – рис. 4.1, стор. 139 – рис. 4.2, стор. 141 – рис. 4.4 та 4.5) та таблицею (стор. 80 – табл. 2.2); сумарно робота містить 72 рисунки і 3 таблиці. Список використаних джерел нараховує 159 найменування на 19 сторінках (стор. 160 – 178).

### **2. У дисертаційній роботі виконано такі завдання:**

1. Обґрунтовано вибір підходу до оцінки граничного стану матеріалу заготовок у процесах штампування обкочуванням (ШО) шляхом аналізу найбільш поширених у світовій літературі критеріїв руйнування та їх взаємозв'язку з теорією підсумовування пошкоджень.

2. Досліджено напружено-деформований стан матеріалу заготовки під час формування складнопрофільних виробів методом прямого витискування за методом ШО, а також побудовані аналітичні вирази для рівнянь траєкторій деформування часток матеріалу небезпечних ділянок заготовки.

3. Розроблено моделі деформовності для описання накопичення пошкоджень у матеріалі небезпечних ділянок заготовки під час процесів прямого витискування методом штампування обкочуванням, проведено відповідне моделювання, а також досліджено ефективність комп'ютерного моделювання для оцінки та порівняння результатів прогнозування напружено-деформованого стану й пошкоджень у матеріалі.

4. Розроблено експериментальне обладнання та вибрано матеріали для досліджування процесів штампування обкочуванням, здійсню фізичне моделювання процесу ШО та розроблено рекомендації щодо проектування процесів формування складнопрофільних виробів методом ШО.

Відповідно до поставленої мети та завдань, спрямованих на її досягнення,

побудований план роботи, який розкривається у вступі, чотирох розділах та висновках дисертаційної роботи.

Дисертація Колісника М.А. за структурою, мовою та стилем викладення відповідає паспорту спеціальності та вимогам пп. 9, 10, 11, 12 «Порядку проведення експерименту з присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінетом Міністрів України від 6 березня 2019 року № 167.

### **3. Експертиза змісту розділів дисертації**

У вступі обґрунтовано актуальність обраного напрямку дослідження, що зумовлена необхідністю впровадження енерго- та ресурсозберігаючих технологій обробки матеріалів тиском для формування складнопрофільних деталей - важливого завдання сучасного матеріалознавства. Такий підхід, у свою чергу, вимагає глибокого аналізу ще двох ключових задач матеріалознавства, тісно пов'язаних із темою дисертації: оцінки процесів накопичення мікропошкоджень у матеріалі та моделювання його деформовності в умовах штампування обкочуванням як одного з перспективних методів пластичного формоутворення. У вступній частині також чітко сформульовано мету та основні завдання дослідження, визначено предмет, об'єкт і методологічні засади наукової роботи. Представлено відомості щодо наукової новизни, практичної значущості отриманих результатів, їх апробації, а також структури й обсягу дисертаційної роботи.

У першому розділі дисертаційної роботи виконано глибокий і всебічний аналіз процесів штампування обкочуванням (ШО), зосереджений на їх реалізації на сферорухомих пресах та установках торцевого розкочування, що активно використовуються в сучасних технологіях виготовлення складнопрофільних деталей із металів та сплавів. Автором систематизовано основні схеми ШО, зокрема осаджування, прямого та зворотного витискування, що забезпечують необхідні умови пластичного формозмінення заготовок.

Значну увагу приділено конструктивним і технологічним особливостям торцеобкочувального обладнання, зокрема застосуванню циліндричних та конічних валків. Висвітлено ключову особливість таких процесів - можливість керування напрямленим плином матеріалу заготовки шляхом зміщення вершини конічного валка та її просторового положення відносно осі обертання. Це відкриває широкі можливості для формування внутрішніх і зовнішніх буртів та фланців зі значними геометричними співвідношеннями, що суттєво розширює технологічний потенціал методу.

Автор справедливо наголошує, що розглянуті процеси ШО належать до ресурсозберігаючих технологій, які є ключовими для сучасної інженерії та матеріалознавства. Зменшення енергетичних і матеріальних витрат, а також мінімізація технологічних втрат відповідають вимогам сталого розвитку й екологічно орієнтованого виробництва.

У роботі також порушено фундаментальні питання матеріалознавства, зокрема вплив інтенсивного пластичного деформування на накопичення мікропошкоджень у матеріалі (порожнин, мікротріщин), які можуть призводити до руйнування виробів. Обґрунтовано важливість оцінки цих процесів з метою забезпечення надійності та довговічності деталей. Автор аргументовано підкреслює

необхідність моделювання деформовності заготовок для визначення рівня накопичених пошкоджень, що безпосередньо впливає на механічні характеристики кінцевих виробів.

У завершенні розділу обґрунтовано доцільність використання сучасних методів аналізу напружено-деформованого стану (НДС) та моделювання граничного стану матеріалу, а також вказано на потребу в критичному переосмисленні та порівнянні моделей руйнування, що представлені у світовій науковій літературі. Такий підхід формує методологічну базу для подальших етапів дисертаційного дослідження.

У другому розділі дисертаційної роботи здійснено ґрунтовний аналіз сучасного стану наукових досліджень, присвячених вивченню процесів руйнування матеріалів в умовах пластичного деформування. Автором слушно підкреслено, що попри велику кількість наукових публікацій, переважна їх більшість зосереджується на визначенні граничних деформацій за умов стаціонарного деформування, тоді як питанням моделювання траєкторій деформування макрочастинок матеріалу у небезпечних зонах заготовок, а також можливих механізмів підсумування пошкоджень приділяється не співставно менше уваги.

У роботі аргументовано показано, що більшість моделей руйнування, представлених у науковій літературі у вигляді інтегральних співвідношень, фактично є варіантами функціональних залежностей між граничною деформацією та одним або двома безрозмірними показниками напружено-деформованого стану при стаціонарному деформуванні. Незважаючи на різноманіття формального представлення, всі ці моделі ґрунтуються на лінійному принципі накопичення пошкоджень, з якого випливають одні й ті самі закономірності руйнування, під час описання певних класів нестаціонарного деформування.

Особливої уваги заслуговує встановлення автором зв'язку між емпіричними критеріями руйнування та теорією підсумовування пошкоджень. Виявлено, що форма граничної лінії у відповідних координатах суттєво залежить від значення граничної деформації при рівномірному стисненні, що дозволяє глибше зрозуміти механізми пластичного руйнування та підвищити точність інженерних прогнозів.

Значна частина аналітичного огляду спирається на джерела з високими наукометричними показниками, індексовані в міжнародних базах Scopus і Web of Science, що підтверджує актуальність обраної тематики, її інтегрованість у сучасний науковий дискурс та відповідність світовим тенденціям розвитку науки. Отримані аналітичні висновки не лише уточнюють і поглиблюють наявні уявлення про механізми руйнування, а й демонструють інноваційний характер дослідження, формуючи міцне теоретичне підґрунтя для подальших експериментальних і прикладних робіт.

У третьому розділі дисертації розглянуто напружено-деформований стан матеріалу заготовок як один із ключових параметрів, для проведення оцінки деформовності матеріалу заготовок під час процесів штампування обкочуванням. Дослідження проведено на прикладі прямого та зворотного витискування, зокрема при формуванні торцевих зубців зубчатої муфти, що дозволило забезпечити прикладну спрямованість отриманих результатів.

Автором виконано теоретичний аналіз напруженого стану в області вершини зубця із застосуванням положень теорії пластичного згину смуги. Це дало змогу встановити характер розподілу показника напруженого стану у пластичній зоні. Показано, що найбільш жорсткі напруження концентруються у вершині зубців, де спостерігаються мінімальні деформації, тоді як максимальні деформації виникають в основі зубця - в умовах, наближених до всебічного стиску.

На основі аналізу напружено-деформованого стану розроблено математичні моделі траєкторій деформування частинок металу в координатах «показник напруженого стану – накопичена деформація», що є необхідним елементом для побудови математичних моделей деформовності заготовок. Автором розроблено дві комплексні моделі, що описують процес накопичення пошкоджень у найбільш небезпечних зонах заготовки при прямому та зворотному витискуванні. Кожна з моделей включає три складові: аналітичний опис траєкторії деформування, апроксимацію кривої граничних деформацій та модель підсумовування пошкоджень.

В обох моделях використано трипараметричну форму кривої граничних деформацій, характерну для стаціонарного деформування, а як модель підсумовування застосовано степеневу залежність у двох варіантах: модель В. А. Огороднікова та модель, засновану на лінійному принципі накопичення пошкоджень.

Значну увагу приділено побудові параметричних рівнянь траєкторій деформування. Для процесу прямого витискування визначено функціональні залежності між показником напруженого стану, накопиченою деформацією та параметром траєкторії. Встановлено, що у відповідності з моделлю В.А. Огороднікова, показник нелінійності накопичення пошкоджень у цих умовах є додатним і меншим за одиницю. Числове моделювання при підвищених значеннях цього показника виявило монотонне зростання граничної деформації, що акцентує на важливості накопичення експериментальних даних у цій області.

Для моделювання процесу зворотного витискування автор запропонував оригінальний підхід до побудови траєкторій деформування із застосуванням базисної сплайн-функції, утвореної комбінацією синуса та дотичної з подальшими геометричними перетвореннями. Ця модель також має три параметри й демонструє здатність адекватно описувати зміну напружено-деформованого стану в технологічному процесі.

Використовуючи розроблені моделі, можна здійснювати моделювання деформовності заготовок шляхом варіювання параметрів, що відображають механічні властивості матеріалу та умови технологічного процесу, визначаючи таким чином величину використаного ресурсу пластичності або граничні пластичні деформації до моменту руйнування.

У четвертому розділі дисертаційної роботи розкрито два взаємопов'язані аспекти дослідження - комп'ютерне та фізичне моделювання процесу торцевого штампування обкочуванням (ШО) складнопрофільних деталей. Застосування скінченно-елементного аналізу дало змогу дослідити не лише процес формозмінення заготовки, але й розподіл накопичених пластичних деформацій у її об'ємі.

Автор показав, що сучасні програмні комплекси на основі методу скінченних елементів достатньо достовірно відтворюють геометричне формування деталі, однак мають певні обмеження у точності при оцінюванні напруженого стану та процесів пошкодження матеріалу. Це стало підставою для виконання фізичного моделювання, що дозволило перевірити результати числового аналізу в реальних умовах.

Для реалізації експериментального підходу розроблено обкочувальну приставку з конічним валком, яку адаптовано до конструкції токарно-гвинторізного верстата. Як об'єкт фізичного моделювання обрано деталь типу «Доїльний стакан», що дало можливість практично відтворити процес формування її нижньої частини шляхом торцевого обкочування.

У результаті досліджень встановлено вплив геометричних і кінематичних параметрів процесу на характер деформування заготовки. Зокрема, надано технологічні рекомендації щодо вибору кута між віссю валка та віссю обертання заготовки, величини радіального зміщення вершини валка, а також швидкості обертання шпинделя. Отримані дані мають прикладне значення для проектування технологічних режимів формування деталей складної форми методом торцевого ШО, з урахуванням реальних умов виробництва.

У загальних висновках наведено найбільш важливі наукові та практичні результати дослідження, що базуються на теоретичному узагальненні та практичному вирішенні поставлених завдань.

**Список використаних джерел** є інформативним, достатньо повно охоплює зазначену галузь знань та відображає великий обсяг оброблених джерел.

Матеріали дисертації викладені достатньо логічно та послідовно і відповідають вимогам відповідно до вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації», на здобуття наукового ступеня доктор філософії.

На основі проведеної експертизи слід констатувати наявність наступних необхідних елементів у роботі.

#### **4. Актуальність теми дисертаційного дослідження**

Актуальність теми дисертаційного дослідження не викликає сумнівів і повністю відповідає сучасним пріоритетам розвитку машинобудування та матеріалознавства. Робота спрямована на вирішення важливої науково-технічної проблеми - створення та впровадження новітніх ресурсозберігаючих технологічних процесів металообробки, що є необхідною умовою підвищення ефективності виробництва в умовах зростаючих вимог до енергетичної економічності, якості та екологічності технологій.

Серед напрямів, що мають особливе значення в контексті сталого розвитку, виокремлюється розширення можливостей обробки матеріалів тиском (ОМТ) як маловідходного та високоефективного методу формоутворення. Разом із тим, широкому застосуванню таких технологій перешкоджають об'єктивні складнощі: обмежена стійкість оснащення, ризик руйнування заготовок через недостатню

пластичність, а також ймовірність втрати форми внаслідок втрати стійкості під час деформування. Подолання цих проблем вимагає достовірного прогнозування напружено-деформованого стану, накопичення пошкоджень та деформовності матеріалу, що, у свою чергу, потребує вдосконалення теоретичного і розрахункового апарату механіки формоутворення.

Дисертантом справедливо звернуто увагу на практичну важливість проблематики для аграрно-промислового комплексу, де поширене використання складнопрофільних порожнистих деталей, зокрема виробів із зовнішніми фланцями та внутрішніми буртами. Традиційні методи їх виготовлення передбачають значні витрати на оснащення та технологічні операції (пряме і зворотне витискування, роздавання, обтиснення, зварювання), що часто є економічно недоцільним при дрібносерійному виробництві.

У цьому контексті актуальним і обґрунтованим є вибір об'єкта дослідження - процесу штампування обкочуванням (ШО), який характеризується порівняно низькими зусиллями деформування та сприятливими умовами формоутворення тонкостінних елементів складної геометрії. Його технологічна гнучкість, простота оснащення й універсальність обладнання дозволяють розглядати ШО як перспективний напрямок у виробництві широкої номенклатури деталей.

Разом із тим, для ефективного впровадження процесів ШО необхідним є подальший розвиток моделей механіки формоутворення, що охоплюють кінематику течії матеріалу, закономірності накопичення пошкоджень та оцінку напружено-деформованого стану. Саме цим проблемам і присвячене представлене дисертаційне дослідження, що підтверджує його високу актуальність як у науковому, так і в прикладному контексті.

#### **5. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами**

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертаційної роботи відповідає пріоритетному напрямку з переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2027 року, який визначений в Законі України від 07.09.2011 р. № 942 «Нові ресурсозберігаючі, енергоощадні та екологічно безпечні процеси одержання конкурентоспроможних речовин і матеріалів та виробів із них» і науковому напрямку «Розвиток феноменологічної теорії руйнування матеріалів при великих пластичних деформаціях та розробка на цій основі нових і вдосконалення існуючих технологій обробки металів тиском» Вінницького національного аграрного університету. Робота виконана в рамках двох ініціативних науково-дослідних робіт (НДР) на інженерно-технологічному факультеті (№ ДР 0117U006830 «Розвиток процесів штампування обкочуванням на основі аналізу механіки формоутворення складнопрофільних виробів» (13.11.2017р. по 21.12.2021р.), № ДР 0122U002110 «Розвиток процесів штампування обкочуванням на основі аналізу механіки формоутворення складнопрофільних виробів та створення поверхневих шарів деталей із застосуванням газодинамічного напилення» (18.13.2022р. по 03.2026р.), із залученням дисертанта у ролі основного виконавця.

Дисертаційні дослідження проводились у відповідності до договорів між Вінницьким національним аграрним університетом, ТОВ «Агромаш-Калина» та ТОВ «Краснянське СП «Агромаш» про що свідчать акти впровадження в виробництво. Також впровадженою у навчально-методичний процес та наукову роботу кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки ВНАУ.

## **6. Наукова новизна отриманих результатів**

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Показано що низка найвідоміших у всьому світі критеріїв руйнування є імплементацією різних апроксимацій кривої або поверхні граничних деформацій при стаціонарному деформуванні у найпростішу модель підсумовування пошкоджень за лінійним принципом.

2. встановлено зв'язок між емпіричним критерієм руйнування матеріалу бічної поверхні циліндричних зразків при торцевому стисненні та теорією підсумовування пошкоджень, що дозволяє узагальнити та теоретично обґрунтувати емпіричні спостереження.

3. Виявлено домінуючий вплив граничної деформації при рівномірному стисненні на форму граничної лінії в координатах «осьова – колова логарифмічні деформації» та показано, що зі збільшенням граничної деформації при рівномірному стисненні за незмінності інших умов форма граничної лінії наближається до прямої, що є підтвердженням емпіричного критерію руйнування.

## **7. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації, та їх достовірність**

Наукові положення, висновки та рекомендації дисертаційної роботи є повністю обґрунтованими як з наукової, так і з технічної точки зору. Високу ступінь достовірності отриманих результатів забезпечує розробка та застосування математичних моделей деформовності матеріалу заготовки під час процесів штампування обкочуванням, що адекватно відображають характер напружено-деформованого стану та процеси накопичення пошкоджень. Проведене з використанням цих моделей моделювання дозволило отримати узгоджені з теоретичними положеннями та експериментальними спостереженнями результати.

У процесі дослідження для побудови комп'ютерних моделей і формулювання теоретичних висновків було використано сучасну універсальну систему скінченно-елементного аналізу, що призначена для високоточного моделювання складних тривимірних процесів деформування. Достовірність результатів, зокрема в частині моделювання пластичного формозмінення заготовок під час штампування обкочуванням, підтверджується практичною ефективністю даного інструменту у розв'язанні як лінійних, так і нелінійних, стаціонарних та нестаціонарних задач механіки деформівного твердого тіла.

Експериментальні дослідження виконувалися із використанням лабораторного та промислового обладнання, а практична ефективність запропонованих технічних рішень підтверджується відповідними актами впровадження.

## **8. Практична значимість отриманих результатів**

1. Для забезпечення фізичного моделювання процесу ШО складно профільних заготовок в лабораторних умовах розроблено та виготовлено оригінальну обкочувальну приставку з конічним обкочувальним валком для токарно-гвинторізних верстатів. Запропонована конструкція розширює експериментальні можливості дослідження процесу ШО та може бути використана для вдосконалення технології обробки в умовах промислових та навчально-дослідних лабораторій.

2. Підтверджено можливість використання програмних комплексів для аналізу та оптимізації процесу торцевого штампування обкочуванням, що знижує потребу в дорогих експериментальних випробуваннях, в той же час, виявлені недоліки у відтворенні напруженого стану та пошкоджень можуть слугувати основою для подальшого вдосконалення існуючих програмних моделей, що покращить точність прогнозування залишкового ресурсу деталей;

3. Отримані рекомендації щодо оптимального вибору технологічних параметрів процесу ШО, що сприяє підвищенню якості формоутворення деталей типу «стакан» та можуть бути використані для вдосконалення виробничих процесів, зокрема у виготовленні деталей зі складною геометрією методом обкочування.

4. Розроблені моделі та їх програмна реалізація в середовищі системи комп'ютерної математики забезпечують гнучке налаштування параметрів процесу (механічних властивостей матеріалу, режимів навантаження) та комплексний аналіз їхнього впливу на деформування заготовки. Зокрема, вони дозволяють розраховувати використаний ресурс пластичності матеріалу та визначати граничні деформації перед руйнуванням у небезпечних зонах заготовки під час прямого витискування методом ШО. Це значно прискорює процес оцінки, скорочує потребу у фізичних експериментах, мінімізує ризик передчасного виходу деталей з ладу та сприяє підвищенню їхньої довговічності.

## **9. Апробація матеріалів дисертації**

Основні результати роботи доповідались на науково-технічних конференціях позитивну оцінку від провідних науковців: Всеукраїнській науково-технічній конференції «Сучасні проблеми виробництва, переробки сільськогосподарської продукції, машинобудування та енергетичних систем АПК» (28-30 листопада 2017 р., ВНАУ, Вінниця, Україна); IV Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні технології та інтенсифікація розвитку національного виробництва» (30 листопада 2017 р., ТДСДС, Тернопіль, Україна); Міжнародній науково-практичній конференції «Молодь і технічний прогрес в АПК» (4 квітня 2019 р., ХНТУСГ, Харків, Україна); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інженерно-технологічне забезпечення аграрного сектору економіки: сучасний стан, проблеми та перспективи» (21-22 жовтня 2020 р., ВНАУ, Вінниця, Україна); Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи інноваційної діяльності вагпромиловий інженерії» (19-20 листопада 2020 р., ВНАУ, Вінниця, Україна); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Реалізація європейського зеленого курсу в Україні: погляд молодих учених» (14-15 травня 2021 р., ВНАУ, Вінниця, Україна); II Міжнародній науково-технічній конференції «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту-2021» (13 –



15 травня 2021 р., ВНТУ, Вінниця, Україна); Міжнародній науково-методичній інтернет-конференції «Проблеми вищої математичної освіти: виклики сучасності» (11-12 жовтня 2022 р., ВНТУ, Вінниця, Україна); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інноваційні підходи агропромислової інженерії у контексті євроінтеграції» (19-20 жовтня 2023 р., ВНАУ, Вінниця, Україна); IV Міжнародній науково-методичній інтернет-конференції «Проблеми вищої математичної освіти: виклики сучасності» (20-22 червня 2024 р. ВНТУ, Вінниця, Україна); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інноваційні підходи агропромислової інженерії в контексті глобальних викликів» (17-18 жовтня 2024 р., ВНАУ, Вінниця, Україна).

#### **10. Повнота викладання в опублікованих працях основних наукових та прикладних результатів дисертації**

За результатами проведених теоретичних і експериментальних досліджень опубліковано 30 наукових праць, у тому числі: 15 статей у наукових фахових виданнях України (категорії Б); 4 у фахових виданнях інших держав та 3 у наукових журналах, що входять до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та Web of Science Core Collection; 1 свідоцтво про авторське право на твір; 7 теза у збірнику доповідей наукових конференцій.

Публікації відповідають встановленим вимогам та достатньо повно відображають зміст роботи.

#### **11. Зауваження по змісту і оформленню дисертації**

1. У дисертації ґрунтовно проаналізовано велику кількість моделей руйнування, проте бракує чітких рекомендацій щодо їхнього пріоритетного застосування стосовно процесів штампування обкочуванням.

2. У розділах 2 і 3 розрахунки виконано із застосуванням кривих граничних деформацій для стаціонарного деформування. Оскільки процес ШО має яскраво виражену нестаціонарну природу оцінка граничної пластичної деформації матеріалу може виявитися суттєво залежною від принципу підсумування пошкоджень: лінійного чи нелінійного. Подібні розрахунки в роботі здійснені, проте відсутні системні порівняння.

3. Під час аналізу моделі руйнування Макклінтока, в дисертації зачеплено надзвичайно важливе питання про існування зв'язку між коефіцієнтом зміцнення та величиною граничних пластичних деформацій. Проте ці важливі наукові результати не оформлені в завершені висновки і не знайшли відображення у науковій новизні.

4. Крім того, у моделюванні та фізичному експерименті не розглянуто вплив швидкості обертання валка, яка прямо пов'язана з інтенсивністю деформації та тепловиділенням. Відомо, що швидкість може змінювати не лише напружено-деформований стан, але й кінетику накопичення пошкоджень.

5. Хоча запропоновано дві моделі деформованості з урахуванням накопичення пошкоджень, відсутній аналіз чутливості параметрів моделі, а також не вказано похибки апроксимації та критерії відповідності експериментальним даним, що ускладнює їх практичне використання у виробничих умовах.

6. Цілком поділяю позицію автора щодо доцільності використання

показника напруженого стану у формі відношення першого інваріанту тензора напружень до інтенсивності напружень, що є більш зручною для аналізу. Водночас, з огляду на переважне застосування у зарубіжних публікаціях альтернативного варіанта з середнім напруженням у чисельнику, доцільно було б приділити цьому питанню більш детальний аналіз і порівняння варіантів.

7. Аналіз критерію IDS у дисертації подано надто стисло. Зокрема, не розкрито залежність показника напруженого стану від умов навантаження, а також не пояснено, яким чином визначаються його значення при рівномірному двовісному розтягу та стиску для матеріалів із початковою анізотропією граничних деформацій. Це створює певні труднощі, особливо з огляду на те, що для ізотропних матеріалів відповідні значення традиційно становлять +2 та -2. У зв'язку з тим, що подальший аналіз у роботі стосується виключно початково ізотропних матеріалів, виникає сумнів щодо доцільності включення огляду критерію IDS до складу дисертаційного дослідження.

8. Одним із ключових результатів дисертаційного дослідження є обґрунтування умови до властивостей матеріалу, наслідком якої є справедливості емпіричного критерію руйнування. Водночас зазначений критерій описується не лише кутовим коефіцієнтом, але й сталою  $C$ , що входить до рівняння (2.45). У зв'язку з цим рекомендую автору у подальших дослідженнях, спираючись на запропонований ним підхід, розглянути також питання визначення й інтерпретації цього параметра.

9. У роботі стверджується про можливість утворення елементів зі складним профілем із тонкостінних заготовок методом ШО без втрати стійкості, проте не подано межових умов стабільності плину матеріалу, зокрема – не розглянуто можливість локалізації деформації або виникнення флаттер-ефекту в зонах з малою товщиною.

10. При розгляді формоутворення фланців і бортів акцент зроблено на осьовій та коловій деформації, тоді як радіальні компоненти напруженого стану в тонкостінних ділянках можуть бути критичними для передчасного руйнування. Цей аспект не знайшов достатнього відображення в побудові моделей.

11. У написанні слова «складнопрофільних» у назві на титульному аркуші, в анотації та додатках дисертації спостерігається невідповідність: у деяких випадках воно написано разом (злитно), а в інших — окремо («складно профільних»).

## **12. Перевірка роботи на антиплагіат**

Перевірка дисертації на академічну доброчесність була здійснена з використанням програмного забезпечення StrikePlagiarism. Рівень оригінальності тексту становить 91,07%, що відповідає вимогам академічної доброчесності. Зафіксовані текстові співпадіння стосуються переважно автоцититування з наукових праць автора, а також використання загальноновживаних термінів і визначень. Текст дисертації вирізняється чітко вираженим авторським стилем і є результатом самостійного дослідження.

### 13. Загальні висновки по дисертації

В цілому наведені зауваження не впливають на якість, наукову новизну та практичну значимість дисертації, тому їх можна розглянути як побажання. Вони можуть бути використані в подальшій роботі для розвитку процесів ШО.

Дисертаційна робота **Колісника Миколи Анатолійовича** «Розвиток процесів штампування обкочуванням на основі аналізу механіки формоутворення складнопрофільних виробів» є завершеною науковою працею, що виконана автором особисто на належному рівні, яка має наукову новизну і практичну цінність. Робота вирішує важливу науково-технічну проблему – розробка математичного апарату для аналізу механіки формоутворення складнопрофільних виробів і на цій основі розвиток відповідних процесів штампування обкочуванням.

Дисертаційна робота **Колісника М. А.** не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для матеріалознавства. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п.6–9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач **Колісник Микола Анатолійович** заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань **13 «Механічна інженерія»** за спеціальністю **132 «Матеріалознавство»**.

Офіційний опонент,

доктор технічних наук професор,  
професор кафедри металургії та  
організації виробництва,  
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

Підпис проф. В. Кухара засвідчую:

Вчений секретар  
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»,  
кандидат наук з державного управління



Володимир КУХАР



Максим КАРАКАЙ