У спеціалізовану вчену раду Д12.105.01
Донбаської державної машинобудівної
академії

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу **Грудкіної Наталії Сергіївни**

«Розвиток енергетичних методів аналізу технологічних режимів та удосконалення процесів точного об'ємного штампування видавлюванням»,

представленої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.05 – процеси та машини обробки тиском, 13. – Механічна інженерія

Актуальність теми дисертаційної роботи

Подальший розвиток сучасних технологій машинобудування потребує створення нових та удосконалення існуючих методик їх розрахунків. Це у повній мірі відноситься і до процесів холодного штампування. Технологія холодного об'ємного штампування (ХОШ) дозволяє отримувати якісні та складні за конфігурацією деталі та напівфабрикати, які відповідають вимогам сучасного виробництва. Тенденції до використання більш складних комбінованих схем у ХОШ призвели до необхідності створення відповідних достатньо громіздких математичних моделей, реалізація яких потребує значних витрат часу. Одним з напрямків, що дозволяє інтенсифікувати аналіз таких процесів є використання розроблених уніфікованих кінематичних модулів.

Якщо для відносно простих схем деформування вже напрацьовано досить великий досвід використання цього підходу, то для процесів зі складною геометрією заготовки та осередку деформації це знаходиться у стадії розвитку з огляду питань щодо адекватності моделей реальним процесам штампування та громіздкості отримуваних математичних моделей.

Вхід. № 273/05
30 04 2021 р.
ДДМА

Тому застосування модульного підходу до процесів комбінованого видавлювання з декількома ступенями течії металу з використанням кінематичних модулів зі складною геометрією ще є недостатньо обґрунтованим і розробка та впровадження технологій на його основі представляє значні труднощі.

Зважаючи на викладене, тема дисертації **Грудкіної Н. С.**, мета якої полягає в підвищенні ефективності процесів точного об'ємного штампування на основі розвитку наукових основ енергетичних методів аналізу і розробки методики проектування технологічних процесів і оснащення, *є актуальною*.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами

Тема дисертаційної роботи відповідає науковому напрямку «Розвиток ресурсозберігаючих процесів обробки тиском на основі створення нових технологічних способів і методик аналізу закономірностей пластичного деформування» наукової школи «Обробка металів тиском» (ОМТ) Донбаської державної машинобудівної академії (ДДМА). Робота виконана в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт за планами Міністерства освіти і науки України, які проводилися на кафедрі ОМТ ДДМА (№ 0115U003123, 0115U004736, 0117U001164, 0119U000242), де авторка була виконавцем, та на кафедрі КДіМПМ ДДМА (№ 0120U101973), де авторка є відповідальним виконавцем, а також в рамках спільних науково-дослідних робіт з рядом підприємств..

Ступінь обґрунтованості і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій

Найбільш важливі наукові положення і результати роботи викладені в загальних висновках дисертації. Основні результати теоретичної частини роботи засновані на дослідження силового і деформаційного режимів процесів видавлювання, які проведені з використанням енергетичних методів і методу скінченних елементів.

Отримані рішення успішно пройшли експериментальну перевірку, для чого авторка використовувала метод фізичного моделювання та методи тензометрії та ділильних сіток. Для оцінки точності отриманих результатів експериментальних досліджень використовувалися методи статистичної обробки дослідних даних.

Це дозволяє вважати достовірними та обґрунтованими наукові положення, висновки та рекомендації, які наведені у роботі.

Наукова новизна одержаних результатів

Можна вказати на наступні основні результати дисертаційного дослідження, що мають вагому наукову новизну.

1. Вперше на основі енергетичного методу балансу потужностей із застосуванням кінематичних модулів складної конфігурації розроблено комплекс математичних моделей процесів видавлювання, використання яких дозволяє встановити енергосилові режими та визначити оптимальну конфігурацію інструменту із наявністю конструктивних особливостей у вигляді складних елементів перехідних ділянок, в тому числі із заокругленням.

2. Отримав подальший розвиток метод кінематичних модулів для математичного моделювання на основі енергетичного методу балансу потужностей, який відрізняється розширенням можливостей відомих та розробкою кінематичних модулів нових конфігурацій із наявністю похилих меж різної форми, встановленням та використанням їх властивостей, що дає можливість проведення оперативного аналізу силового режиму деформування і постадійного формоутворення деталей в процесах комбінованого послідовного та суміщеного видавлювання з декількома ступенями свободи течії металу.

3. Отримали розвиток методи та прийоми спрощення оцінки приведеного тиску деформування кінематичних модулів трапецеїдальної та трикутної форми із криволінійними межами, завдяки чому вдалося отримати

вираз потужності сил деформування в аналітичному вигляді, що дає можливість проводити подальшу оптимізацію силового режиму з прогнозуванням формозмінення напівфабрикату.

4. Вперше в рамках використання енергетичного методу балансу потужностей обгрунтовано можливості використання швидкості течії металу у поздовжньому напрямку у якості кінематичного параметру, що варіюється, для осьового трапецеїдального модуля виключно за умови наявності додатної радіальної складової швидкості суміжних модулів, що дозволило отримати дані щодо прогнозування силового режиму та приростів напівфабрикату у вигляді інженерних формул.

5. Отримали розвиток уявлення про особливості формування осередку деформації в осьовій зоні розвороту до радіальної течії металу, суть новизни яких полягає у встановленні оптимальної форми у вигляді комплексу прямокутного та трапецеїдального кінематичних модулів з криволінійною межею розділу течії металу всередині заготовки, що сприяло зниженню прогнозованої оцінки силового режиму в процесах з наявністю радіальної складової течії металу.

6. Отримали розвиток уявлення про особливості вбудовуваності розроблених та узагальнення існуючих кінематичних модулів складної конфігурації та їх комплексів, суть новизни яких полягає у встановленні обмежень щодо раціональності їх використання у розрахункових схемах із урахуванням особливостей формування різних осередків деформації та конфігурації суміжних модулів, що забезпечило підвищення оперативності енергетичного методу балансу потужностей з визначення оптимального силового режиму та керування формоутворенням напівфабрикату.

Значимість роботи для практики

Практичну цінність дисертаційної роботи складають наступні її основні результати:

- рекомендації з вибору кінематичних модулів складної конфігурації із виокремленням властивостей та особливостей використання, які дозволяють виділити перспективні напрямки розробки нових кінематичних модулів з криволінійними межами, що сприятиме розширенню можливості енергетичного методу балансу потужностей (ЕМБП) для моделювання нових способів комбінованого видавлювання складних деталей в умовах додаткових впливів;

- методика розрахунків процесів комбінованого видавлювання та осадження, в тому числі із застосуванням кінематичних модулів з двома ступенями свободи течії, що дозволяють оперативно і повно досліджувати процеси деформування напівфабрикату із прогнозуванням силового режиму, формоутворення та дефектоутворення;

- удосконалення способів послідовного та суміщеного комбінованого видавлювання за рахунок визначення оптимальної форми інструменту із наявністю конструктивних особливостей у вигляді складних елементів перехідних ділянок в формі фасок і заокруглень та встановлення закономірностей формоутворення та дефектоутворення, що дозволяють підвищити ступінь керованості течією металу;

- методики проектування технологічних процесів та технічні рішення виготовлення складнопрофільованих деталей типу гільз, втулок і стаканів, що дозволяють знизити витрати на технологічну підготовку виробництва і процесів радіального і комбінованого радіально-поздовжнього видавлювання порожнистих і суцільних деталей з фланцем, що сприяють розширенню можливостей процесів штампування за рахунок ускладнення конфігурації отримуваних деталей і виключення можливості дефектоутворення.

Методичні матеріали та рекомендації з проектування процесів і оснащення комбінованого видавлювання і штампування в роз'ємних матрицях передані для промислового освоєння на ПрАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» (НКМЗ, м. Краматорськ), ПАТ «Енергомашспецсталь» (ЕМСС, м. Краматорськ),

ПАТ Дружківський завод металевих виробів» (ДЗМВ, м. Дружківка) і ТОВ «Завод рейкових скріплень» (ЗРС, м. Дніпро). Результати досліджень використовуються в навчальному процесі при викладанні курсів «Теорія процесів кування і штампування» і «Холодне об'ємне штампування», проведенні практичних занять, та виконанні лабораторних і проектних робіт студентами.

Оцінка змісту та завершеності дисертації

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, шести розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний об’єм роботи 485 сторінок, в тому числі 310 сторінок основного тексту, 184 рисунків та 20 таблиць, список використаних джерел з 302 найменувань та 7 додатків, що включають зокрема список опублікованих праць за темою дисертації і перелік науково-технічних конференцій.

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, приведена загальна характеристика, сформульована мета і завдання дослідження, показано зв'язок роботи з науковими програмами і темами, виділені предмет та об'єкт дослідження, особистий внесок здобувача, наведені наукова новизна і практична цінність результатів роботи, їх апробація і практичне застосування.

В першому розділі розглянуті сучасні тенденції та шляхи розвитку технологій об'ємного пластичного деформування.

Встановлено, що процеси холодного видавлювання, комбінованого послідовного та суміщеного з декількома ступенями свободи течії, завдяки техніко-економічним перевагам знаходять все більше застосування на виробництві. Проведено аналіз стану теорії і технології точного об'ємного штампування (ТОШ) складнопрофільованих порожнистих та стрижневих деталей. Проведено аналіз основних здобутків вітчизняних та закордонних авторів з розвитку теоретичних методів, скінчено-елементного аналізу та експериментальних досліджень процесів ТОШ видавлюванням. Встановлено, що інтенсифікації освоєння процесів об'ємного пластичного формоутворення

за новими технологічними схемами сприятиме створення математичних розрахункових моделей із визначення енергосилового режиму та поетапної формозміни із виокремленням основних факторів керування формоутворенням та можливостями зниження силових параметрів. На основі проведеного аналізу сформульовані мета роботи і завдання дослідження.

Наведені висновки по розділу.

В другому розділі обґрунтовано вибір напрямків досліджень і прийнятих методів та методик теоретичного і експериментального дослідження, а також скінченно-елементного моделювання процесів холодного видавлювання.

У якості основного методу теоретичних досліджень процесів комбінованого суміщеного та послідовного радіально-поздовжнього видавлювання обраний енергетичний метод балансу потужностей.

Метод скінченних елементів обраний для прогнозування особливостей формоутворення напівфабрикату в умовах неоднозначних пластичних течій, особливо при моделюванні процесів з декількома ступенями свободи течії металу та отримання інформації про напружено-деформований стан заготовки.

Для експериментального дослідження деформованого стану заготовок обраний метод координатних сіток, який дозволяє вивчити закономірності формування характерних зон пластичної течії й розподілу ступеня деформації всередині заготовки. Експерименти проведено із використанням універсально-переналагоджуваної установки, яка дозволяє здійснювати видавлювання в рухомих і роз'ємних матрицях за кінематичними схемами комбінованого видавлювання з вимірюванням сил деформування. Для вимірювання сил тертя безпосередньо в процесах видавлювання використано пристрої у вигляді пластотрибометрів, заснованих на способі радіального видавлювання.

Приведені висновки по розділу.

Третій розділ присвячений розвитку методу кінематичних модулів стосовно узагальнення основних характеристик та властивостей, аналізу проблем застосування та прийомів їх вирішення, виокремленню напрямків подальшої розробки нових кінематичних модулів складної конфігурації.

Для розвитку методу кінематичних модулів в рамках використання ЕМБП були проаналізовані кінематично можливі поля швидкостей (КМПШ) відомих кінематичних модулів трапецеїдальної та трикутної форми із визначенням їх можливих варіацій, властивостей та наявності обмежень.

Проведений аналіз дозволив систематизувати кінематичні модулі трикутної та трапецеїдальної форми.

Визначено напрямки розвитку ЕМБП з огляду на необхідність побудови нових кінематичних модулів складної форми, які дозволять моделювати течію металу зі зміною напрямків та враховуватимуть форму перехідних ділянок інструменту.

Викладені висновки по розділу.

Четвертій розділ присвячений розробці нових кінематичних модулів трапецеїдальної та трикутної форми, які дозволяють враховувати конструктивні особливості інструменту у вигляді заокруглень та фасок, та розширенню можливостей раніше відомих за рахунок ускладнення форми похилої межі.

У якості альтернативи при моделюванні процесів послідовного комбінованого радіально-прямого видавлювання проаналізовано раціональність заміни найуживанішого осьового модуля прямокутної форми на комплекс із двох суміжних кінематичних модулів, один з яких є трапецеїдальним з похилою межею.

Додатково досліджено та розширено можливості використання відомих трапецеїдальних кінематичних модулів із двома ступенями свободи течії металу за рахунок побудови рішень для похилих меж криволінійної форми.

Зроблено висновки по розділу.

У п'ятому розділі проведено дослідження процесів послідовного та суміщеного комбінованого радіально-поздовжнього видавлювання порожнистих і суцільних деталей з фланцем.

Для процесів комбінованого видавлювання із наявністю декількох ступенів свободи течії металу із приєднаним осередком деформації основні

дослідження були спрямовані на визначення положення границі межування двох суміжних осередків деформації із одним ступенем свободи течії металу, що наближене до реальних умов.

Дослідження процесів комбінованого видавлювання з декількома ступенями свободи течії металу стосувалися визначення раціональних меж використання похилих меж криволінійної форми та можливості використання кінематичних параметрів у якості варійованих для оптимізації приведеного тиску деформування.

Узагальненням цих досліджень є рекомендації щодо меж використання кожної із розрахункових схем відповідно до геометричних співвідношень, стадії процесу та можливого дефектоутворення у вигляді утяжин.

Наведені висновки по розділу

У шостому розділі виконано систематизацію та узагальнення результатів теоретичних і експериментальних досліджень для їх підготовки до практичного використання. Розглянуто основні етапи проектування процесів комбінованого суміщеного та послідовного видавлювання та запропоновано відповідні технологічні рекомендації. Розроблено програму з використанням безкоштовного середовища «Delphi Community Edition», яка містить два основні модулі. Перший модуль дозволяє отримати дані щодо КМПШ, розрахункових залежностей приведеного тиску деформування та рекомендацій щодо використання кінематичних модулів з непаралельною течією із урахуванням форми, розташування, властивостей та обмежень, що накладаються на форму похилої межі, конфігурацію суміжних модулів та осередку деформації досліджуваної розрахункової схеми згідно із основними ознаками розробленої класифікації. Другий модуль містить банк розрахункових математичних моделей дослідження процесів радіально-зворотного видавлювання порожнистих деталей з фланцем, що відповідають різним співвідношенням процесу із можливістю поповнення.

Запропоновано спосіб комбінованого видавлювання для виготовлення порожнистих деталей складного профілю із формуванням на заключному

етапі зовнішнього фланця на бічній поверхні, що розташований в придонній частині деталі, згідно розрахункової схеми, яка дозволяє дослідити можливість дефектоутворення у вигляді утяжин на другому етапі процесу деформування.

Надано технологічні рекомендації з проектування процесів радіально-поздовжнього отримання деталей з фланцем та осьовим відростком, типу гільз, втулок і стаканів, а також програмне забезпечення для розрахунку технологічних силових режимів та формоутворення і дефектоутворення, що забезпечують необхідні показники якості та допустимі співвідношення геометричних параметрів. З застосуванням такої методики розроблені і передані на ряд підприємств ресурсозберігаючі технології комбінованого видавлювання порожнистих і стержневих деталей з фланцем і типу гільз і втулок, стаканів з фланцем. На нові технічні рішення, що дозволяють істотно розширити номенклатуру отримуваних виробів, отримані патенти України на корисну модель.

Загальні висновки наведено наприкінці роботи і в них відмічені основні результати досліджень з обґрунтуванням рекомендацій з практичного використання отриманих результатів.

Список використаних джерел із 302 найменувань достатньо повно охоплює предметну галузь, відображає опрацювання здобувачем значної кількості сучасних іноземних джерел.

Виходячи з аналізу основної частини дисертації, можна зробити висновок, що мета дисертаційної роботи у ході виконання досліджень була досягнута, а дисертація є завершеною науковою працею.

Повнота викладення результатів в опублікованих працях

Матеріали дисертаційної роботи опубліковані в 40 роботах, з яких 10 – у в міжнародних наукових журналах, які входять до бази даних Scopus та WoS, , 14 – у фахових та періодичних зарубіжних виданнях, в тому числі 7 з них одноосібні, 11 робіт – в матеріалах міжнародних конференцій, 2 роботи

опубліковано в галузевих збірниках. На нові технічні рішення отримано 3 патенти України.

Апробація роботи

Результати роботи пройшли досить хорошу апробацію, вони докладені і обговорені на всеукраїнських і міжнародних науково-технічних конференціях за напрямком роботи та на науковому семінарі при спеціалізованій вченій раді Д.12.105.01 (ДДМА, 2020).

Відповідність змісту автореферату основним положенням дисертації

За структурою та змістом автореферат відповідає вимогам, встановленими МОН України. У тексті автореферату відображено основні положення, зміст, результати і висновки здійсненого Грудкіною Н. С. дисертаційного дослідження. Зміст автореферату відображає основні положення дисертації.

Оцінка оформлення автореферату та роботи

Дисертаційна робота та автореферат реферат добре оформлені та ілюстровані. Дисертаційна робота написана чіткою і лаконічною мовою. Хоча в роботі є певні помилки технічного характеру, але кількість їх зовсім не значна і вони не впливають на загальне позитивне враження.

Зауваження по дисертації та автореферату

1. В роботі для теоретичного аналізу процесів холодного об’ємного штампування (ХОШ) використаний метод балансу потужностей (МБП), в якому потужності на подолання опору деформування заготовок, подолання сил зсуву між об’ємами та подолання сил тертя на контактуючих поверхнях визначаються шляхом інтегрування при допущенні, що напруження текучості є постійною величиною. В роботі не відображено, яким чином враховується зміцнення при аналізі процесів ХОШ вказаним методом.
2. Авторка використовує вислів потужність сил зрізу. На наш погляд правильніше використовувати – потужність на подолання сил зсуву між модулями чи об’ємами.

3. При аналізі холодного формоутворення виробів актуальною задачою є визначення можливості руйнування здеформованого металу. Авторка показала можливість встановлення з використанням МБП дефектоутворення у вигляді утяжин, але не відмічені шляхи вирішення вказаної задачі.
4. В роботі для проведення чисельних експериментів використаний метод скінченних елементів. Але в роботі та авторефераті не відображено – яка модель металу використана при комп'ютерному моделюванні процесів ХОШ та які скінченні елементи використані по формі і розмірах.
5. Враховуючи можливості існуючих скінченно-елементних програм і сучасних комп'ютерів, які дозволяють достатньо точно визначати енерго-силові параметри (ЕСП), розподіл питомих зусиль на деформуючому інструменті, напружено-деформований стан кінцеві форми і розміри напівфабрикатів та виробів, Тому актуальність використання складних аналітичних залежностей для визначення енергосилових параметрів замість використання чисельного аналізу потребує певного обґрунтування.
6. В роботі для представлення осередку деформації використовуються модулі з досить складною геометрією та відповідними компонентами поля швидкостей течії металу, що дозволяє підвищити адекватність опису течії металу та деформованого стану заготовки, але отримані вирази достатньо громіздкі. При цьому авторка пропонує спрощувати вже отримані залежності зокрема для інтенсивності швидкостей деформації математичними методами. Чи не має в такому підході системного протиріччя, адже можна відразу використовувати вже відомі відносно прості рішення?
7. При оцінюванні похибки лінеаризації авторка порівнює значення для приведеного тиску декількох модулів за аналітичними залежностями, отриманими за умов використання лінеаризації, з відповідними значеннями, отриманими чисельними методами з використанням формул

у загальному вигляді. Незрозуміло, чи можна порівнювати одні наближені значення з іншими наближеними значеннями, адже чисельні методи мають власну похибку, яка теж потребує оцінювання.

8. Для модулів з криволінійною поверхнею використовуються параметри оптимізації, від яких залежить геометрія модуля та характер течії металу у відповідній зоні заготовки. Незрозуміло, який критерій для розрахунку таких параметрів використовували в роботі та чи будуть ці оптимальні значення незмінними при вбудовуванні таких модулів у складені схеми процесів ХОШ.
9. Не зрозуміло, чому в роботі при теоретичному аналізі використаний коефіцієнт тертя величиною μ=0,3. Хоча авторка відмічає, що для процесів ХОШ характерна величина цього коефіцієнту μ=0,08-0,16.
10. На енерго-силові параметри при отриманні напівфабрикатів чи виробів процесами холодного видавлювання впливає величина швидкості деформування, яка визначає швидкості течії кінематичних модулів, що запропоновані авторкою роботи. Не зрозуміло, чи враховується такий вплив в аналітичних дослідженнях ?.
11. В дисертації потрібно було б виконати порівняння форми і розмірів осередків деформації, які отримані при аналізі всіх розглянутих процесів ХОШ з використанням МСЕ та із застосуванням МБП, а також привести такі дані в авторефераті.
12. В роботі чомусь не розглядаються схеми комбінованого видавлювання з розділеним осередком деформації.
13. В авторефераті не повністю описані складові, які входять в наведені рівняння. Зокрема W виразі (2) стор.12, ε і γ в формулі (6) та κ_1 в рівнянні (7).

Висновок

Дисертаційна робота Грудкіної Наталії Сергіївни «Розвиток енергетичних методів аналізу технологічних режимів та удосконалення процесів точного об'ємного штампування видавлюванням» є самостійно

виконаною, завершеною науковою працею на актуальну тему, у якій, на основі виконаних авторкою досліджень, отримані нові науково-технічні результати.

Зауваження, які зроблені при аналізі матеріалів дисертації, незначно знижують її загальну високу оцінку.

Це дозволяє оцінити роботу, як таку, що відповідає вимогам Постанови КМУ «Порядок присудження наукових ступенів» від 24.07.2013 № 567 (зі змінами), які висуваються до докторських дисертацій, Наказу Міністерства освіти і науки «Про затвердження вимог до оформлення дисертацій» від 12.01.2017 р. № 40, чинним пунктам Наказів Міністерства освіти і науки України «Про опублікування результатів дисертацій на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук» від 23.09.2019 р. №1220 та Листу МОН України від 04.12.2015 р. № 1/9-586 «Про опублікування результатів дисертацій у періодичних виданнях».

Авторка дисертації **Грудкіна Наталія Сергіївна заслуговує присудження їй наукового ступеня доктора технічних наук** за спеціальністю 05.03.05 - процеси та машини обробки тиском, 13. – Механічна інженерія.

Офіційний опонент,
професор кафедри «Технології виробництва
літальних апаратів» Національного технічного
університету України "Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського",
доктор технічних наук, професор Володимир Калюжний

Підпис проф. Калюжного В.Л. ***засвідчую:***

Учений секретар Національного технічного
університету України "Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського"
кандидат технічних наук, доцент Валерія Холявко