

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**

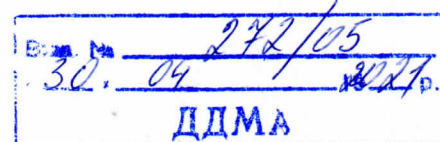
**та удосконалення процесів точного об'ємного штампування видавлюванням»,**  
представленої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю  
05.03.05 – процеси та машини обробки тиском

**Актуальність теми дисертаційної роботи**

На даний час у контексті розвитку машинобудівних галузей промисловості велика увага приділяється питанням ресурсо- і енергозбереження, підвищення якості продукції та розширення технологічних можливостей процесів. У цьому плані, значні потенційні можливості мають процеси точного об'ємного штампування видавлюванням з підвищеним ступенем свободи течії металу. Широке їх застосування стримується тим, що зараз недостатньо розвинені методи розрахунку і програмні засоби для проектування відповідного деформуючого інструменту і технологій.

Особливістю зазначених процесів є дуже складний осередок деформації, що складається з безлічі взаємозалежних ділянок. В цьому випадку, розрахунок пластичної течії займає багато часу, навіть при використанні таких потужних і оптимізованих програмних комплексів, як QForm або DEFORM.

Проектування процесів базується на розрахунку великого числа можливих варіантів, що багаторазово збільшує обсяг обчислень. Для отримання оптимальних рішень необхідно значно скоротити час розрахунку, а також мати обґрунтовані рекомендації з проектування геометрії інструменту та режимів деформування. Такі можливості надає модульний підхід до проектування технологій точного об'ємного штампування, який запропонований і розвивається в ДДМА. Він заснований на принципі декомпозиції, згідно з яким складне завдання розбивається на блоки.



Мистецтво полягає в тому, щоб окремі блоки допускали досить прості рішення, об'єднуючи які потім можна було б отримати рішення вихідної задачі. В рамках модульного підходу до проектування технологій штампування, такими блоками є окремі ділянки складного осередку деформації, які називаються кінематичними модулями. В даний час вже розроблено цілий ряд стандартних модулів, але їх поки явно недостатньо для опису складних схем штампування, які пов'язані з великою варіативністю пластичної течії. Представлена дисертація спрямована на вирішення цієї проблеми, що обґрунтовує її актуальність.

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

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» Донбаської державної машинобудівної академії. 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 наукових положень, висновків та рекомендацій, які сформульовані в дисертації, їх достовірність**

Висунуті у дисертації наукові положення та отримані висновки і рекомендації є достатньо обґрунтованими внаслідок того, що основні результати теоретичної частини роботи засновані на застосуванні енергетичного методу балансу потужностей та методів кінцевих елементів, що є загальновідомими та найуживанішими в рамках аналізу процесів холодного видавлювання. Для спрощення складних нелінійних співвідношень використані класичні нерівності. В роботі показано, що залежності, які отримані, дають результати досить близькі до вихідних.

Отримані рішення щодо прогнозування силового режиму, формоутворення напівфабрикату та дефектоутворення у вигляді утягнень експериментально перевірялися із застосуванням методу фізичного моделювання та методу тензометрії і діляльних 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, наведені у роботі.

### Наукова новизна одержаних результатів та практична значимість

Оцінюючи найважливіші здобутки дисертаційного дослідження, варто вказати на наступні основні результати, 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 заокругленнями.

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 приведенного 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 обґрунтовано можливість 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.

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 студентами лабораторних і проектних робіт.

### **Оцінка змісту дисертації, її завершеності в цілому**

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

**У вступі** обґрунтовано актуальність проблеми та показано зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами та темами. Сформульовано мету та задачі, що вирішені, окреслено об'єкт, предмет та методи досліджень. Відображена наукова новизна, практична цінність, апробація та публікації отриманих результатів із зазначенням особистого внеску здобувачки.

**В першому розділі** розглянуті сучасні тенденції вдосконалення процесів пластичного деформування, що знаходяться у площині пошуку резервних можливостей деформування за базовими схемами та розвитку процесів на основі їх поєднання із додаванням ступенів свободи течії металу. Встановлено, що інтенсифікації освоєння процесів точного об'ємного штампування видавлюванням за новими технологічними схемами сприятиме розробка розрахункових моделей із можливістю визначення оптимального силового режиму, поетапного формозмінення напівфабрикату та можливості дефектоутворення.

**В другому розділі** обґрунтовано вибір прийнятих методів та методик теоретичного і експериментального дослідження процесів холодного видавлювання.

Обрано у якості основного методу теоретичних досліджень та аналізу процесів комбінованого радіально-поздовжнього видавлювання енергетичний метод балансу потужностей. Метод кіневих елементів обраний для отримання інформації про напружено-деформований стан заготовки, особливості формування осередків пластичної деформації та поверхонь розділу течії всередині заготовки та прогнозування формоутворення напівфабрикату, особливо при моделюванні процесів з двома ступенями свободи течії. Для експериментального дослідження деформованого стану

заготовок обраний метод координатних сіток, експерименти проведено на універсально-переналагоджуваних установках; для вимірювання сил тертя безпосередньо в процесах видавлювання використано пристрої у вигляді пластотрибометрів.

**В третьому розділі** для розвитку методу кінематичних модулів в рамках використання ЕМБП проаналізовані кінематично можливі поля швидкостей (КМПШ) відомих кінематичних модулів трапецеїдальної та трикутної форми із визначенням їх можливих варіацій, узагальнених властивостей, обмежень щодо форми похилої межі (у формі чверті кола), можливостей виродження та аналізу проблем їх використання та прийомів їх подолання. Проведений аналіз дозволив систематизувати кінематичні модулі трикутної та трапецеїдальної форми за формою, розташуванням, кількістю ступенів свободи течії, варіативністю похилої межі, обмеженнями, що накладаються на суміжні модулі. Визначено напрямки розвитку та підвищення оперативності ЕМБП з огляду на необхідність розробки кінематичних модулів трикутної та трапецеїдальної форми, які враховуватимуть форму перехідних ділянок інструменту.

**Четвертій розділ** присвячений подоланню виявлених прогалин у існуючій базі уніфікованих модулів, а саме розробці кінематичних модулів трапецеїдальної та трикутної форми, що враховують конструктивні особливості інструменту у вигляді заокруглень та фасок. Розширення можливостей раніше відомих кінематичних модулів досягнуто за рахунок ускладнення форми похилої межі та виявлення основних прийомів спрощення розрахунків приведенного тиску деформування та їх вплив на отримані оптимальні параметри процесу деформування. У якості альтернативи при моделюванні процесів послідовного радіально-прямого видавлювання запропонована заміна осьового модуля прямокутної форми на комплекси із двох суміжних кінематичних модулів, один з яких є трапецеїдальним з похилою межею двох типів, та визначено нераціональність одного з комплексів з огляду на наявність одномоментного переходу від прямого видавлювання до радіального в зоні розвороту, що не відповідає дійсності. Рекомендовано використання комплексу, що містить трапецеїдальний модуль з ненульовою вертикальною складовою в КМПШ для довільних суміжних кінематичних модулів. Розширено можливості використання відомих кінематичних модулів трапецеїдальної форми із двома ступенями свободи течії металу за рахунок побудови рішень для похилих меж криволінійної форми.

**П'ятий розділ присвячений** дослідженню процесів послідовного та суміщеного комбінованого радіально-поздовжнього видавлювання порожнистих і суцільних деталей з фланцем. Для процесів комбінованого видавлювання із наявністю присьоданого осередку деформації основні дослідження було спрямовано на визначення положення

границі межування двох суміжних осередків деформації із одним ступенем свободи течії металу, яке наближене до дійсного, що дозволило знизити прогнозовані оцінки силового режиму деформування та приростів напівфабрикату із відхиленням, що не перевищує 7–10 %. Дослідження процесів комбінованого радіально-зворотного видавлювання з декількома ступенями свободи течії металу стосувалися розширення можливостей із прогнозування утягнення в донній частині на випадок положення пуансону нижче товщини фланцевої зони аж до товщини дна, яка прямує до нуля, та виявлення умов використання кінематичних параметрів в якості варіативних для оптимізації приведеного тиску деформування. Узагальненням цих досліджень є рекомендації щодо меж використання кожної із розрахункових схем відповідно до геометричних співвідношень, осередку деформації та можливого дефектоутворення у вигляді утягнення. Для запропонованого способу комбінованого видавлювання для виготовлення складнопрофільованих порожнистих деталей із формуванням на заключному етапі зовнішнього фланця на бічній поверхні отримане рішення, що дозволяє прогнозувати появу утягнення на основі характеру змінення кінематичного параметру у вигляді швидкості течії металу у прямому напрямку, що визначає швидкість течії металу при прямому видавлюванні для формування відростку (рис. 8а), що підтверджене моделюванням в Qform2/3D.

**У шостому розділі** виконано систематизацію та узагальнення результатів теоретичних і експериментальних досліджень для їх підготовки до практичного використання. Розглянуто основні етапи проектування процесів комбінованого видавлювання та запропоновано відповідні технологічні рекомендації. Розроблено програму з використанням безкоштовного середовища «Delphi Community Edition», яка містить два основні модулі. Перший з модулів дозволяє отримати дані щодо КМПШ, розрахункових залежностей приведенного тиску деформування та рекомендацій щодо доцільності 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 аналізу процесів радіально-зворотного видавлювання порожнистих деталей з фланцем, що відповідають різним співвідношенням процесу, в тому числі оцінку можливості дефектоутворення у вигляді утягнення у вигляді діаграми. Запропоновано спосіб комбінованого видавлювання для виготовлення складнопрофільованих порожнистих деталей із формуванням на заключному етапі зовнішнього фланця на бічній поверхні,

що розташований в придонній частині деталі, та розрахункову схему, що дозволяє дослідити можливість дефектоутворення у вигляді утягнення на другому етапі процесу деформування.

Надано технологічні рекомендації з проектування процесів радіально-повздожнього видавлювання деталей з фланцем, деталей типу гільз, втулок і стаканів, програмне забезпечення для розрахунку технологічних силових режимів, формоутворення і дефектоутворення, що забезпечують необхідні показники якості та допустимі співвідношення геометричних параметрів. Результати досліджень та розроблені на їх основі методи розрахунків, технічні рішення та програмні модулі передані на підприємства ПрАТ «Новокраматорський машинобудівний завод», ПАТ «Енергомашспецсталь», ПАТ «Дружківський завод металевих виробів» та ТОВ «Завод рейкових скріплень» та використовуються також в наукових дослідженнях і навчальному процесі ДДМА.

Висновки належним чином відображають основні результати дисертаційної роботи.

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.

**Список використаних джерел** з 302 джерел достатньо повно охоплює предметну галузь та відображає опрацювання здобувачем значної кількості сучасних вітчизняних та іноземних джерел.

#### **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 сім з них одноосібні, 11 робіт – в матеріалах міжнародних конференцій, дві роботи опубліковано в галузевих збірниках. На нові технічні рішення отримано три патенти України.

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



## **Оцінка оформлення автореферату та 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. Дисертаційна робота та автореферат реферат добре оформлені та ілюстровані. Зміст автореферату і основних положень дисертації є ідентичним. Незважаючи на наявність невеликої кількості помилок технічного характеру, це не впливає на загальне позитивне враження.

### *Зауваження за дисертацією*

1. Проектування технологій ОМТ базується як на попередній оцінці характеристик процесу (силові параметри і кінематика пластичної течії), так і на прогнозі показників якості деформованого металу (вичерпання ресурсу пластичності, механічні властивості, характеристики мікроструктури і текстури). У дисертації же основна увага приділена розрахунку характеристик процесів штампування і лише в розділі 5.3.2, для однієї зі схем, аналізується вичерпання ресурсу пластичності металу.

У зв'язку з цим, опонент вважає, що побудовані в дисертації поля швидкості, які можливі кінематично, можна було б використовувати більш ефективно.

Крім уже згаданого ресурсу пластичності (після оцінки величини показника жорсткості напруженого стану), вони дозволяють розрахувати еквівалентну деформацію, а по ній оцінити характеристики міцності металу. У поєднанні з самоузгодженою в'язко-пластичної моделлю (див., Напр., [Toth, L., Estrin, Y., Lapovok, R., & Gu, C. (2010). A model of grain fragmentation based on lattice curvature. *Acta Materialia*, 58 (5), 1782 - 1794] і наведені там посилання), поля швидкості дають можливість спрогнозувати параметри мікроструктури і текстури матеріалу.

2. У розробленій автором прикладній програмі (розділ 6 Дисертації) бажано було б передбачити підпрограму автоматизованого розбиття осередку деформації на стандартні модулі. Це розширило б коло користувачів програмного забезпечення, яке розроблено автором.

3. Побудова полів швидкості, які можливі кінематично, бажано було б уніфікувати. Для цього потрібно використати загальний вираз для соленоїдальних полів, а граничні умови задовольнити за допомогою R-функцій (див, напр., [Y. Beygelzimer, et al. (2009), *Kinematics of metal flow during twist*

extrusion investigated with a new experimental method . Journal of Materials Processing Technology, 209, 7, 3650-3656]). Це дозволило б істотно розширити спектр можливих рішень.

4. У розділі 1 варто було б більше уваги приділити аналізу показників якості металу і сучасним методам проектування технологій штампування.

5. У розділі 3.2.1. криволінійна межа модуля задається то функцією  $z(r)$  (див., наприклад, співвідношення, (3.1), (3.2)), то функцією  $g(r)$  (див., наприклад, (3.5), (3.16)).

### Висновок

Зауваження, які зроблені при аналізі матеріалів дисертації, незначно знижують її загальну високу оцінку і швидше є побажаннями на майбутнє.

Дисертація є завершеною науковою працею. Отримані в ній науково обґрунтовані розробки вносять помітний внесок у розвиток методів аналізу та проектування технологічних способів і режимів процесів точного об'ємного штампування видавлюванням, що забезпечує вирішення важливої проблеми підвищення ефективності процесів пластичного деформування.

Це дозволяє оцінити роботу, як таку, що відповідає вимогам п. 9 та 10 "Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника", затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 № 567, що пред'являються до дисертацій доктора наук.

Авторка дисертації **Грудкіна Наталія Сергіївна заслуговує присудження їй наукового ступеня доктора технічних наук** за спеціальністю 05.03.05 - процеси і машини обробки тиском.

Офіційний опонент,  
головний науковий співробітник Донецького фізико-технічного  
інституту ім. О.О.Галкіна НАН України, д.т.н., проф.

Я.Ю. Бейгельзімер

Підпис Бейгельзімера Я.Ю. засвідчено  
Вчений секретар ДонФТІ НАН України

В.Ю. Дмитренко

