

УДК 621.777.01

DOI: 10.15587/1729-4061.2022.254867

Розрахунок початкової стадії процесу радіально-зворотного видавлювання з використанням трикутного кінематичного модуля

Н. С. Грудкіна, В. М. Левченко, І. С. Алієв, Ю. Г. Дьяченко, Р. І. Сивак,
Л. П. Суховірська

Складні за формою деталі із суцільних або порожнистих заготовок доцільно виготовляти способами комбінованого радіально-поздовжнього видавлювання. Однак використання процесів комбінованого видавлювання з декількома ступенями свободи течії вимагає попередньої оцінки формоутворення, що відповідає дійсності, з урахуванням особливостей формування осередків деформації на різних етапах деформування. При деформуванні високих заготовок може спостерігатися наявність проміжної жорсткої зони, що відокремлює два автономних осередки деформації. При побудові розрахункової схеми початкової стадії процесу комбінованого радіально-зворотного видавлювання порожнистих деталей з фланцем враховано наявність проміжної жорсткої зони. Необхідність удосконалення розробленої розрахункової схеми викликана суттєвими відхиленнями прогнозованих приростів деталі від експериментально отриманих розмірів деталі. У якості альтернативи осьовому прямокутному кінематичному модулю нижнього осередку деформації запропоновано використання осьового трикутного модуля, ефективність застосування якого продемонстрована при моделюванні процесу радіально-поздовжнього видавлювання з роздачею. Виявлено раціональність запропонованої заміни, як із прогнозування силового режиму процесу деформування, так і поетапного формозмінення деталі. Це дозволило знизити прогнозовані оцінки до 10 % за приростами розмірів деталі згідно порівняльного аналізу з експериментально отриманими даними. Рекомендовано використання розробленої схеми для моделювання початкової стадії процесу для відносно високих заготовок при $H_0/h_1 > 4..6$, обмеженням є виродження проміжної жорсткої зони. Це сприятиме виробленню рекомендацій щодо розширення можливостей використання комбінованого радіально-зворотного видавлювання порожнистих деталей з фланцем на виробництві.

Ключові слова: комбіноване видавлювання, моделювання процесів, енергетичний метод, кінематичний модуль, силовий режим, формоутворення.

1. Вступ

Сучасний розвиток механіки суцільного середовища та деформованого твердого тіла забезпечує вирішення широкого спектра практичних задач обробки матеріалів тиском (ОМТ). Методи ОМТ все частіше розглядаються у якості альтернативи класичних способів формоутворення деталей шляхом зняття стружки. Основна частина досліджень присвячена вирішенню конкретних практичних задач із розробки технології виготовлення виробів із заданими характеристиками [1–4]. Причому різноманітність можливостей з точки зору ви-

користання того чи іншого методу обробки тиском робить саме вибір найдоцільнішого з можливих першочерговою актуальною задачею [1, 5]. Цей вибір перш за все обумовлений можливостями та особливостями виробництва та відповідною енергоємністю та економічною ефективністю [2, 5]. Дослідження останніх років, присвячені вирішенню теоретичних задач сприяють розширенню технологічних можливостей процесів пластичного деформування [6, 7]. Це стосується перш за все розширення можливостей з оцінки та прогнозування енергосилових режимів, поетапного формоутворення та дефектоутворення напівфабрикату [8–10]. Тенденції до розширення номенклатури і матеріалів деталей, отриманих холодним видавлюванням, вказує на необхідність продовження досліджень процесів комбінованого видавлювання [10, 11]. Ці процеси з одного боку дозволяють зменшити кількість переходів штампування складно профільованих деталей, але з іншого боку є найменш дослідженими з точки зору забезпечення відповідності напівфабрикату розмірам готової деталі. Таким чином, саме побудова адекватної математичної моделі процесів з декількома ступенями свободи течії металу, сприятиме отриманню оцінки формоутворення напівфабрикату, що відповідає дійсності. А це в свою чергу на етапі проектування дозволить визначитися із можливостями комбінованого видавлювання для отримання якісної деталі.

2. Аналіз літературних джерел і постановка проблеми

Найбільш повно на даному етапі досліджено базові процеси видавлювання та комбінованого послідовного видавлювання (з одним ступенем свободи течії металу). Дослідження різних видів відхилення форми деталі, дефектоутворення та можливості використання процесів радіального видавлювання продемонстровано в роботі [12]. Методом скінченних елементів досліджено вплив конструктивних параметрів штампів, напружено-деформований стан при виготовленні порожнистих латунних деталей методом холодного прямого видавлювання з роздачею на конусному пуансоні [13]. Можливості використання методу верхньої оцінки для визначення геометричних розмірів мертвої зони, енергетичних параметрів досліджено для процесу кутового видавлювання [14]. Дослідження даних процесів дозволили апробувати можливості теоретичних методів та скінченно-елементного моделювання з точки зору отримання адекватних оцінок навантажень на інструмент, сил розкриття матриць, напружено-деформованого стану та дефектоутворення. Однак з точки зору дослідження формоутворення більшу цікавість викликають саме процеси комбінованого видавлювання з декількома ступенями свободи течії, що дозволяють отримати складно профільовані деталі за один перехід [11]. З іншого боку для цих процесів необхідною стає нова задача – оцінка відповідності прогнозованих розмірів напівфабрикату розмірам готового виробу.

Дослідження процесів комбінованого видавлювання наразі ведуться за допомогою скінченно-елементного аналізу, теоретично (методом верхньої оцінки та енергетичним методом балансу потужностей (ЕМБП) та експериментально. Основи та методика використання теоретичних методів дослідження та розрахунку процесів холодного видавлювання наведені в основоположних роботах.

В [15] запропоновано новий виклад механіки абсолютно твердих та деформованих тіл, енергетична інтерпретація поняття «сила». Пропоновані визначальні рівняння сприяють підвищенню точності кінематичного та динамічного аналізу, розробці та оптимізації технологічних процесів обробки тиском. В посібнику [16] містяться приклади розв'язання задач з розрахунку силових та кінематичних параметрів процесів обробки металів тиском ЕМБП, в тому числі із використанням пакету Mathcad. Це є дієвим інструментом застосування ЕМБП для більш складних задач, в тому числі з аналізу та моделювання процесів комбінованого видавлювання.

Дослідженню різних аспектів процесів комбінованого зворотно-прямого видавлювання, що знайшли своє впровадження при виготовленні автомобільних деталей, присвячені розробки багатьох вчених. В роботі [17] наведені рекомендації щодо уникнення дефектоутворення у процесі комбінованого зворотно-прямого видавлювання поршневого пальця (the piston-pin). Встановлено, що дефект є характерним для процесів з невеликою товщиною та негативно впливає на якість отриманої деталі. Запропоновано способів регулювання кінематики процесу на основі рухомих інструментів. Отримані результати скінчено-елементного моделювання та висновки узгоджуються з результатами експериментів, однак є обмеженими в рамках досліджуваних параметрів.

Робота [18] присвячена дослідженню одного з етапів виготовлення шестикутних і трохоїдально-подібних бовтів при комбінованому зворотно-прямому видавлюванні. Запропоновано нові кінематично допустимі поля швидкостей для визначення формоутворювального навантаження, ходу видавлювання та характеру деформації щодо ходу пуансону. Теоретично отримані дані дозволяють визначити картину деформації за ходом пуансона, силу видавлювання та формозмінення напівфабрикату.

Вивченню впливу температури деформації і мастил на пластичні властивості магнієвого сплаву (AZ61A) в процесі комбінованого видавлювання стакану з осьовим відростком присвячена робота [19]. Робота доповнює та розширює практику і застосування обробки магнієвого сплаву з використанням техніки пластичного формування.

Питанням визначення сили деформування та формоутворення при одночасному радіальному видавлюванні зовнішніх та внутрішніх фланців з трубчастої присвячена робота [20]. Теоретичні розрахунки величини приведенного тиску деформування на пуансоні та поетапного формоутворення приростів зовнішнього та внутрішнього фланців проведені на основі ЕМБП. Однак результати узгодження прогнозованих даних щодо поетапних приростів деталі з експериментально отриманими не приведено, що значно знижує вагомість отриманих результатів.

Досліджені різні аспекти особливостей протікання процесу комбінованого радіально-зворотного видавлювання. У роботі [21] використаний ЕМБП для визначення силового режиму процесу комбінованого радіально-зворотного видавлювання. Однак отримання відповідних розрахункових формул поетапного формоутворення деталі не здійснено. У роботі [22] скінчено-елементним моделюванням проведено аналіз впливу умов тертя і радіус кривизни матриці на силові параметри деформації. В роботі [23] на основі моделювання у Deform 2D

досліджено особливості течії металу з урахуванням впливу кута торця пуансона в процесах зворотного і комбінованого радіально-зворотного видавлювання заготовок зі сталі, що пройшла загартовування. Однак дані дослідження мають обмежений характер, який визначається комплексом параметрів моделювання, що проводилося. Інтерес викликає аналіз розширення можливостей використання ЕМБП для прогнозування силового режиму та формоутворення напівфабрикату. В роботі [24] обґрунтована необхідність використання розрахункових схем з наявністю проміжної жорсткої зони при початковій стадії для відносно високих заготовок. В роботі [25] визначено умови для забезпечення можливості оптимізації за кінематичним параметром в різних розрахункових схемах та наведені рекомендації. В роботі [26] запропонований алгоритм розрахунку процесів комбінованого видавлювання спрощує розробку технологічних рекомендацій. Це стосується визначення силового режиму видавлювання і попередньої оцінки формозмінення деталі з можливістю керування витіканням металу в процесі деформування. Надано рекомендації щодо застосування розроблених математичних моделей згідно різних геометричних співвідношень процесу радіально-зворотного видавлювання, що суттєво підвищує цінність отриманих результатів. Аналіз дефектоутворення у вигляді утягнення в донній частині досліджено в роботах [27] із побудовою діаграми області дефектоутворення та наданням рекомендацій щодо запобігання цього виду дефекту. Це демонструє можливості ЕМБП з точки зору оцінки силового режиму та формоутворення. Можливості керування формоутворенням напівфабрикату як з точки зору забезпечення необхідних розмірів, так і відстрокування появи дефекту у вигляді утягнення, продемонстровано в роботі [27]. Це підтверджує оперативність ЕМБП та його можливості з огляду трансформації базової розрахункової схеми процесу з урахуванням введення конструктивних особливостей (заокруглень, фасок і т.д.). Однак додаткових досліджень вимагає початкова стадія процесу деформування для відносно високих заготовок, для якої характерна наявність проміжної жорсткої зони, що дозволить зменшити відхилення прогнозованих оцінок приростів напівфабрикату від експериментально отриманих.

Експериментально та скінченно-елементним аналізом досліджено процес тристороннього прямо-зворотно-радіального видавлювання порожнистих деталей. Скінченно-елементний аналіз використаний в роботі [28] для дослідження впливу геометричних параметрів на силовий режим та формоутворення. В роботі [29] продовжено дослідження з напрямком визначення впливу умов тертя на протікання процесу деформування. В подальших дослідженнях [30] приділялась увага визначенню впливу геометричних параметрів конструкції штампа, умов тертя на формоутворення напівфабрикату та утворення дефектів. Обґрунтованість результатів моделювання підтверджена експериментальними даними силового режиму та формозмінення. Однак вплив геометричних співвідношень та умов тертя, що є основними факторами керування течією металу, досліджена в межах варіювання параметрів, що вказує на обмежений характер отриманих результатів.

Таким чином, дослідження останніх років вказують на перспективність використання ЕМБП як ефективного теоретичного методу дослідження процесів комбінованого видавлювання. Тому розвиток даного методу з точки зору виро-

блення чітких рекомендацій щодо побудов розрахункових схем процесу згідно особливостей формування осередків деформації, стадій процесу, можливих змін конструктивних особливостей інструменту є актуальною задачею. Це забезпечить можливість керування течією металу (формуванням напівфабрикату) в процесах комбінованого видавлювання та більш активному використанню даних процесів на виробництві.

3. Мета і задачі дослідження

Мета роботи – прогнозування приростів розмірів деталі, що відповідають дійсності, на основі розробки розрахункової схеми початкової стадії процесу комбінованого радіально-зворотного видавлювання. Це дозволить виявити можливості застосування комбінованого видавлювання з точки зору забезпечення відповідності розмірів фланця та стінки стакана необхідним розмірам готової деталі.

Для досягнення мети поставлені наступні задачі:

- виявити особливості формування осередків деформації на початковій стадії для побудови ефективної розрахункової схеми процесу комбінованого радіально-зворотного видавлювання;

- отримати оцінку силового режиму та формування деталі згідно розрахункової схеми процесу із наявністю осьового трикутного модуля нижнього осередку деформації початкової стадії процесу радіально-зворотного видавлювання;

- встановити відповідність теоретично отриманих даних (з використанням осьового трикутного та прямокутного кінематичних модулів) силових параметрів та формування деталі у процесі радіально-зворотного видавлювання експериментально отриманим даним.

4. Матеріали та методи дослідження

Ефективним інструментом використання ЕМБП є метод кінематичних модулів (МКМ). Його застосування дозволяє розглядати розрахункову схему процесу у вигляді комплексу окремих уніфікованих елементів (або цілих комплексів), розрахунки яких відомі. Банк уніфікованих кінематичних модулів або їх цілих комплексів із повним комплектом розрахунків приведенного тиску формування, дозволяє оперативно реагувати на всі зміни в розрахунковій схемі, викликані зміною форми деталі або конфігурації інструменту. При цьому розробка нового кінематичного модуля, зазвичай дозволяє використовувати його не тільки для однієї певної розрахункової схеми або процесу, а для кола різних схем, елементом яких він може слугувати. При цьому важливу роль відіграють особливості застосування МКМ для моделювання процесів комбінованого видавлювання згідно із класифікацією за основними осередками деформації (ОД): послідовний, приєднаний, об'єднаний, транзитний та комбінований [16, 21, 24, 31, 32].

Запропонований поділ є корисним з точки зору можливостей подальшого використання нових кінематичних модулів або їх комплексів для побудови удосконалених розрахункових схем іншого процесу, які можуть їх включати.

Найбільш простими є процеси комбінованого видавлювання із наявністю послідовного ОД із одним ступенем свободи течії металу. При розрахунку та-

ких процесів фактично послідовно додаються суміжні кінематичні модулі із урахуванням повної складової потужності сил зрізу на межі контакту [32] (рис. 1, ліва половина).

Для процесів із приєднаним ОД основним завданням є пошук положення границі межування двох суміжних ОД із одним ступенем свободи течії металу [31] (рис. 1, права половина, ОД-II-1 та ОД-II-2). При аналізі процесів із транзитним ОД (роз'єднаним ОД) враховують наявність проміжної жорсткої зони між автономними ОД. Оптимальну швидкість руху проміжної зони визначають згідно умови рівноваги потужностей, що діють з обох боків від поверхні, що відокремлює два ОД [24] (рис. 1, права половина за наявності жорсткої). Для процесів із різноспрямованими потоками металу, що зароджуються в одному об'єднаному ОД, необхідним є використання кінематичних модулів із двома ступенями свободи течії. Подальша оптимізація проводиться за кінематичним параметром у вигляді швидкості течії металу у поздовжньому напрямку [24–26] (рис. 1, права половина за відсутності жорсткої зони). Процеси із комбінованим ОД є фактично поєднанням ОД перших чотирьох груп, при цьому процедура розрахунків є більш складною. Вироблення рекомендацій щодо форми кінематичних модулів та їх комплексів, їх убудованості та доцільності застосування в нових розрахункових схемах процесів комбінованого видавлювання згідно особливостей формування ОД, дозволить підвищити оперативність ЕМБП.

Експериментальна частина проведених досліджень базується на фізичному моделюванні процесів холодного видавлювання з використанням натурних експериментів і методу тензометрії. Для експериментальних досліджень використовували випробувальні машини МС-500 силою 500 кН, що має необхідні потужності для реалізації процесів комбінованого радіально-поздовжнього видавлювання, достатню величину міжштампового простору для розміщення експериментального штампа з реєструючими датчиками. Матриці і пуанسونи виготовлені зі сталі Х12М, ГОСТ 5950-73 з загартуванням в маслі і відпуском до НРС 56...60, робоча поверхня шліфувалася до $R_a0.4$. Зразки з АД1 виготовлялися точінням з прутків з наступною термічною обробкою, що забезпечує однакові властивості в будь-якій довільно взятій точці зразка при досягненні максимальної пластичності. Режим термообробки: нагрів 350 – 400 °С, охолодження на повітрі. Для врахування зміцнення АД1 використовувалася крива істинних напружень, побудована за результатами механічних випробувань на стиснення циліндричних зразків: $\sigma_s=131e^{0.28}$. Проведена статистична обробка результатів експериментальних досліджень сили видавлювання.

Побудова розрахункової схеми процесів комбінованого видавлювання ґрунтується на аналізі напружено-деформованого стану, викривлення ділільних сіток для свинцю С1 з нанесеною координатною сіткою з базою 3 мм. Перевірка отриманих даних щодо прогнозування енергосилового режиму та формування деталі перевіряється експериментально.

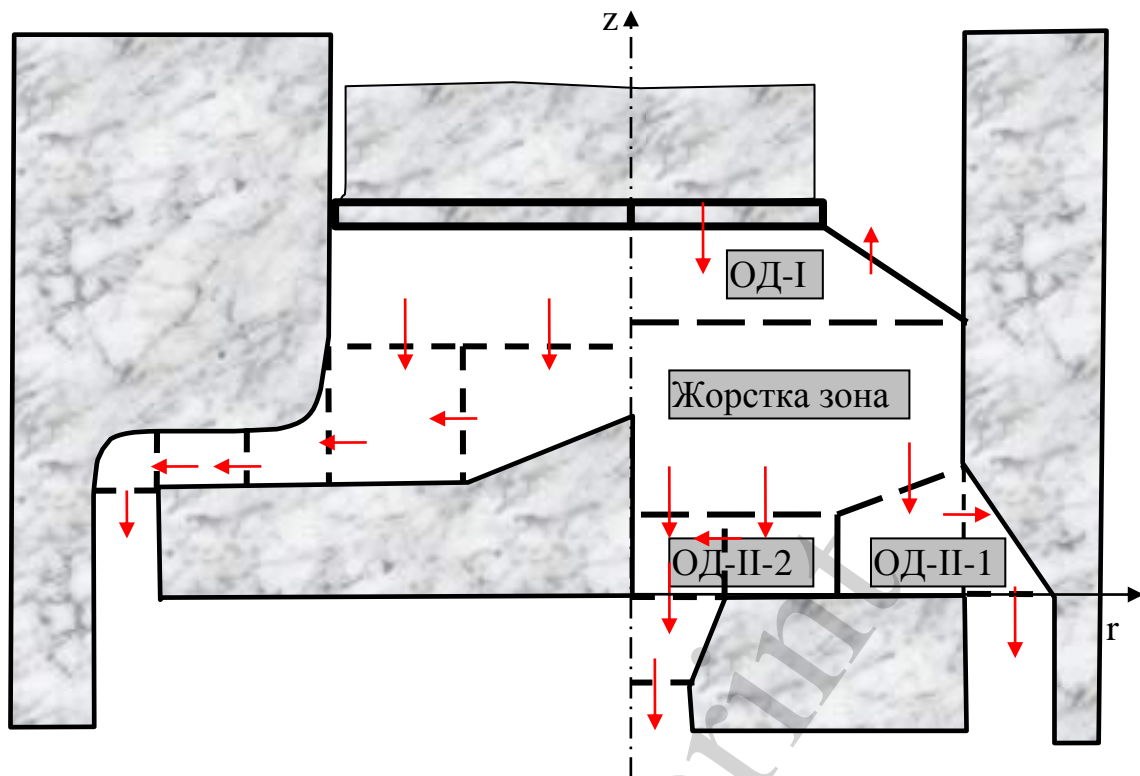


Рис. 1. Узагальнена розрахункова схема комбінованого послідовного (ліва половина) та суміщеного (права половина) видавлювання

5. Результати дослідження початкової стадії процесу комбінованого видавлювання

5.1. Дослідження особливостей формування осередків деформації процесу комбінованого видавлювання порожнистих деталей з фланцем

Складнопрофільовані деталі із суцільних або порожнистих заготовок доцільно виготовляти способами комбінованого радіально-поздовжнього видавлювання. Однак впровадження процесів комбінованого видавлювання з декількома ступенями свободи течії замість базових процесів вимагає попередньої оцінки формоутворення, що відповідає дійсності, з урахуванням особливостей формування осередків деформації на різних етапах деформування. В процесах радіально-зворотного видавлювання для досить високих заготовок (при $H_0/h_1 > 4..6$) на початку деформування встановлено наявність проміжної жорсткої зони [24]. Додатково використані складові заготовки з матеріалу С1 з нанесеною координатною сіткою з базою 3 мм, діаметрами пуансона та заготовки у 28 мм та 45 мм із товщиною фаски 6.5 мм, висотою 47 мм. Робочий хід повзуна становив 12 мм (рис. 2). Отримані дані використовувалися в програмі в середовищі Mathcad 7, що дозволило за методикою І. П. Ренне отримати кількісну оцінку деформованого стану (рис. 3, а). За даними моделювання в програмі Qform 2/3D було отримано картини розподілу деформацій всередині заготовки, що також підтверджують наявність проміжної жорсткої зони та транзитного ОД (рис. 3, б). Попередньо використані розрахункові схеми процесу вказують на необхідність уточнення висоти та швидкості руху жорсткої зони, що розділяє два автономні ОД. Також отримані дані щодо формоутворення напівфабрикату

вказують на суттєві (до 15–20 %) відхилення даних, отриманих теоретично, від експериментально знайдених [24].

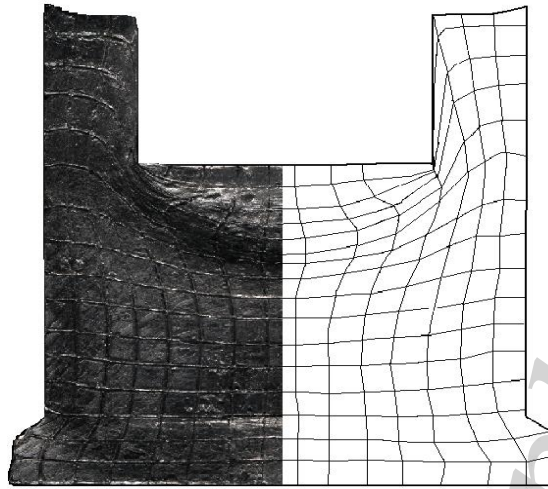


Рис. 2. Викривлення ділильної сітки зразка свинцю С1

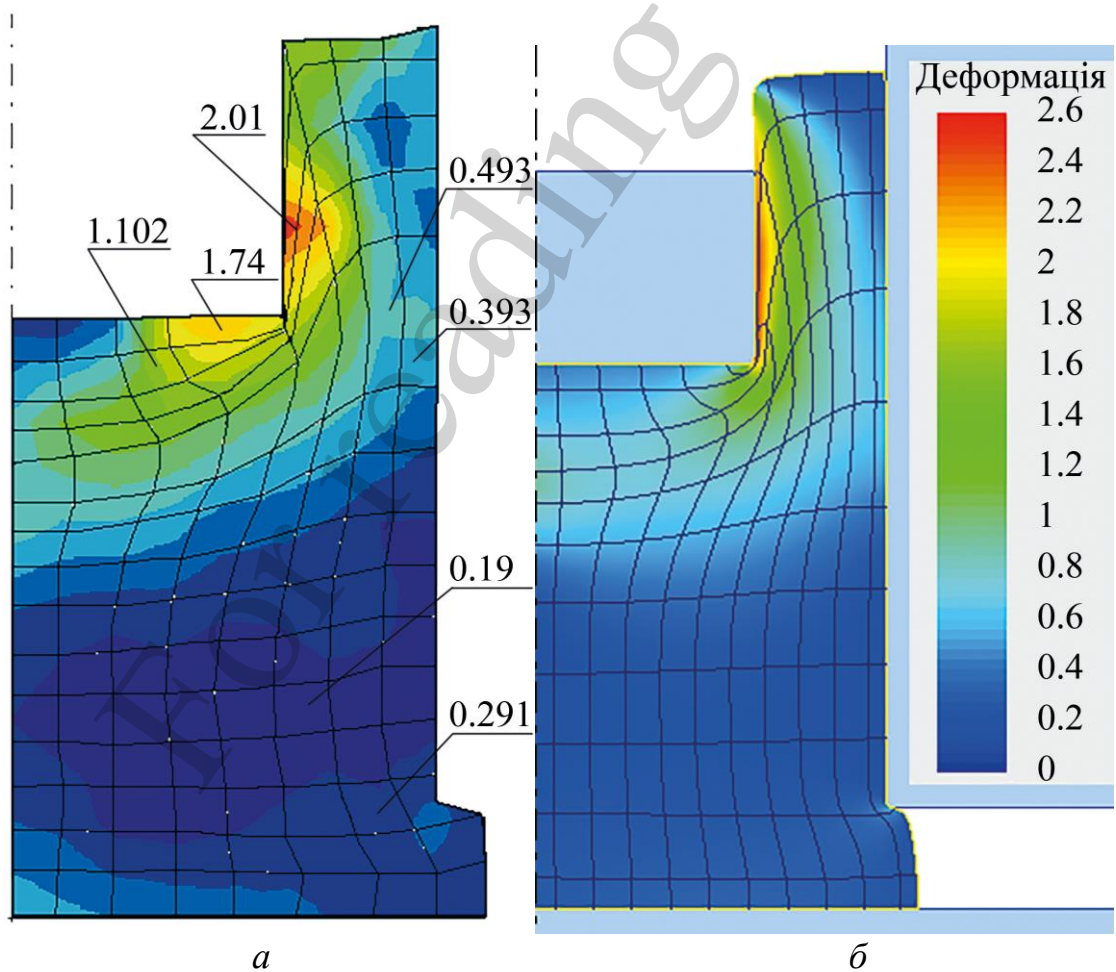


Рис. 3. Аналіз даних розподілу деформацій: *a* – за методикою І. П. Ренне; *б* – в Qform 2/3D

Характер викривлення ділильної сітки та розподілу деформацій дозволив виявити можливість використання розробленого трикутного кінематичного модуля замість прямокутного в зоні розвороту до радіальної течії в нижньому автономному ОД. Така заміна може бути ефективною з точки зору продемонстрованого зниження сили деформування для ОД радіальної течії, що вплине на визначення повної величини сили деформування процесу та зміни у прогнозованих оцінках приростів напівфабрикату.

5. 2. Розробка розрахункової схеми із визначення силового режиму та формоутворення початкової стадії процесу

Згідно рекомендацій, обґрунтованих вище, узагальнена розрахункова схема процесу приймає вигляд (рис. 4).

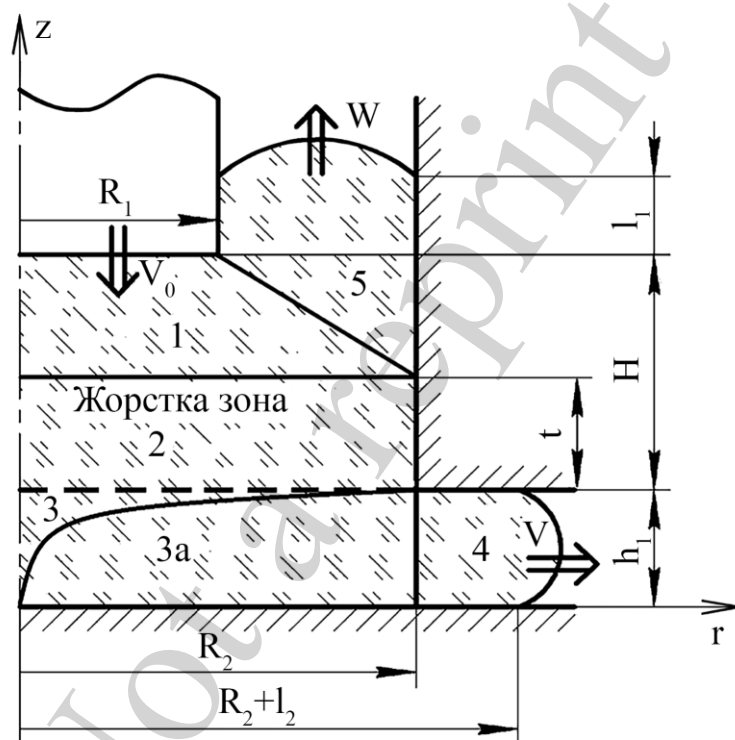


Рис. 4. Узагальнена розрахункова схема процесу із двома різновидами автономного нижнього ОД радіального видавлювання

Надалі позначаємо OD-1 розрахункову схему процесу із наявністю прямокутних кінематичних модулів зон 2 та 3. Удосконалена OD-1a включає трапецеїдальну жорстку зону 2 та трикутний осьовий модуль 3a (рис. 4) із можливістю подальшої оптимізації за параметром $\alpha \in (0, 1)$, що визначає форму кривої.

У найпростішому варіанті OD-1 наявності прямокутної межі трапецеїдального модуля 1 та осьового модуля 3 прямокутної форми отриманий вираз приведенного тиску деформування [24]. Ці розрахунки можна обрати для наступного порівняльного аналізу, при цьому використати приведений тиск деформування верхнього осередку деформації у вигляді:

$$\bar{p}_\uparrow = \left[\begin{array}{l} \frac{2\bar{C}_1}{9\bar{k}^2} \ln \bar{R}_2 \left((4 + 3\bar{k}^2)^{3/2} - 8 \right) - \\ - \frac{2\bar{k}\bar{C}_1}{3\sqrt{3}} + \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{1 + \bar{k}^2}{\bar{k}} \bar{C}_1 \ln \frac{1}{\bar{R}_2} - \\ - \frac{4\mu_1}{3\sqrt{3}} \cdot \frac{\bar{R}_2^2}{\bar{R}_2^2 - 1} \bar{k} + \frac{4\mu_1}{\sqrt{3}} \bar{C}_1 (\Delta \bar{H}_x + \bar{l}_1) \end{array} \right], \quad (1)$$

$$\Delta \bar{H}_x = \frac{\Delta H_x}{R_1}, \quad \bar{H} = \frac{H}{R_1}, \quad \bar{R}_2 = \frac{R_2}{R_1}, \quad \bar{l}_1 = \frac{l_1}{R_1},$$

$$\bar{k} = \frac{1 - \bar{R}_2}{\bar{H} - t}, \quad \bar{C}_1 = \frac{\bar{R}_2^2}{\bar{R}_2^2 - 1}, \quad \bar{C}_1 = \frac{\bar{R}_2^2}{\bar{R}_2^2 - 1}$$

В новій розрахунковій схемі OD-1a відмінності стосуються нижнього осередку деформації, використання осьових модулів складної форми не проводилося. Доцільно використати осьовий трикутний модуль, розрахунки якого проводилися тільки для процесу з одним ступенем течії. Для запропонованого варіанту осьового кінематичного трикутного в перетині модуля 3a похила криволінійна межа має вигляд [32]:

$$z(r) = \frac{h_1 r^2}{R_2^2 (1 - \alpha) + \alpha r^2}, \quad (2)$$

де $\alpha \in (0, 1)$ – параметр, що визначає форму кривої.

Враховуючи наведені в роботі [32] складові потужностей сил деформування, зрізу та тертя для трикутного кінематичного модуля 3a з урахуванням межування кінематичного модуля 4, отримано приведений тиск деформування нижнього автономного OD-1a:

$$\bar{p}_{1a \rightarrow} = \left[\begin{aligned} & \left[\begin{aligned} & \frac{2A}{\alpha \sqrt{3}} + \frac{\sqrt{3}}{1-B^2} - \frac{3}{2} \ln \left| \frac{1+B}{1-B} \right| - \right. \\ & \left. - \sqrt{3} \ln \left| \frac{\sqrt{3}B-3}{\sqrt{3}B+1} \right| \right] + \\ & + \frac{\bar{R}_2 \bar{h}_1}{\sqrt{3}} \left[\begin{aligned} & \frac{\bar{R}_2^2 (3-2\alpha)}{3\bar{h}_1^2} + \frac{1}{2C\alpha} \cdot \operatorname{arctg} C + \\ & + \frac{(1-\alpha)(2\alpha-1)}{2\alpha} \end{aligned} \right] + \\ & + \frac{2}{\sqrt{3}} \bar{R}_2^2 \ln \left(\frac{\bar{R}_2 + \bar{l}_2}{\bar{R}_2} \right) + \frac{\alpha \bar{R}_2 \bar{h}_1}{\sqrt{3}} + \frac{4\mu_1 \bar{R}_2 \bar{t}}{\sqrt{3}} + \\ & + \frac{2\mu_2 \bar{R}_2^3}{3\sqrt{3}\bar{h}_1} (3-2\alpha) + \frac{4\mu_2 \bar{R}_2^2 \bar{l}_2}{\sqrt{3}\bar{h}_1} \end{aligned} \right], \quad (3)$$

$$\text{де } A = \frac{\bar{R}_2^2 (1-\alpha)}{\sqrt{3}}, \quad B = \frac{\sqrt{(1-\alpha)^2 + 3\alpha^2 + \alpha - 1}}{\alpha \sqrt{3}}, \quad C = \sqrt{\frac{\alpha}{1-\alpha}}.$$

В цьому випадку повна величина приведенного тиску \bar{p}_{1a} нової розрахункової схеми OD-1a із використанням трикутного кінематичного модуля 3а приймає вигляд:

$$\bar{p}_a = \frac{4\mu_1 \bar{R}_2}{\sqrt{3}(\bar{R}_2^2 - 1)} \left| 1 - \lambda \frac{\bar{R}_2^2}{\bar{R}_2^2} \right| \left((\bar{H} - \bar{t} + \bar{l}_1) + (1-\lambda) \bar{p}_\uparrow + \lambda \bar{p}_{1a \rightarrow} \right), \quad (4)$$

де швидкість руху жорсткої зони визначаємо за співвідношенням:

$$\lambda = \frac{\bar{p}_\uparrow}{\bar{p}_\uparrow + \frac{(\bar{R}_2^2 - 1) \bar{R}_2^2}{2\bar{h}_1 \bar{R}_2} \bar{p}_{1a \rightarrow}}, \quad (5)$$

де \bar{p}_\uparrow – приведений тиск деформування для процесу зворотного видавлювання; $\bar{p}_{1a \rightarrow}$ – приведений тиск деформування для процесу радіального видавлювання у вигляді OD-1a.

Визначивши з (4) оптимальне значення швидкості течії в вертикальному напрямку W , можна отримати дані щодо приростів деталі в процесі деформування.

Для отримання даних щодо силового режиму використано середнє значення деформації $e_{icp.}^*$ у вигляді $e_{icp.}^*$:

$$e_{icp.}^* = \left(1 - \frac{t}{H_0} \right) \cdot \bar{p}_{\uparrow} + \frac{t}{H_0} \cdot \bar{p}_{1a \rightarrow}, \quad (6)$$

де t – висота жорсткої зони, H_0 – початкова висота заготовки,

При цьому, приведений тиск є критеріальною величиною, що дозволяє розрахувати незалежно від марки матеріалу для певної схеми деформації величину тиску деформування p і силу деформування P :

$$p = \bar{p} \cdot \sigma_s, \quad (7)$$

$$P = p \cdot F,$$

де F – площа перерізу активного деформуючого інструменту.

Таким чином, визначено силовий режим згідно (7) на основі (4) та (6) та дані для оцінки формоутворення деталі за новою розробленою схемою OD-1a на початковій стадії процесу радіально-зворотного видавлювання.

5. 3. Порівняльний аналіз теоретично та експериментально отриманих даних силового режиму та формоутворення

Порівняльний аналіз силового режиму та формоутворення проведемо для найпростішого випадку OD-1 [24] та за новою розробленою OD-1a з осьовим трикутним кінематичним модулем нижнього осередку радіального видавлювання. Для матеріалу АД1 за параметрів $R_1=7.5$ мм, $R_2=10.6$ мм, $h_1=3$ мм, $H_0=20$ мм проведено порівняння теоретичних та експериментальних даних. Сила видавлювання, розрахована для OD-1a із використанням трикутного модуля згідно (4) та (6), (7), більш наближена до експериментальних даних (точкові дані, рис. 5) по відношенню OD-1 із використанням прямокутного модуля. Відхилення за схемою OD-1a від експериментально отриманих даних не перевищує 3–10 %, починаючи із ходу 3 мм у порівнянні із схемою OD-1, для якої відхилення може сягати 12 % та більше (рис. 5, а). За порівнянням приростів деталі за ходом процесу деформування від експериментальних даних, також більш раціональною виявилася схема із нижнім осередком OD-1a. Відхилення за приростами у вертикальному напрямку для OD-1a не перевищує 10 % на заключному етапі деформування, за схемою OD-1 сягає 18% та більше (рис. 5, б).

Введення трикутного осьового модуля 3a замість прямокутного вплинуло на збільшення жорсткої проміжної зони 2, зменшення пластичної зони 3a та відповідні зміни характеру течії металу в цій зоні. Відповідно до виразу (3) знизився приведений тиск деформування у нижньому осередку деформації OD-1a, що в свою чергу викликало зміни при визначенні руху жорсткої зони згідно (5)

та зменшення повної величини приведенного тиску згідно (4). Порівняльний аналіз висоти жорсткої зони t та параметра λ , розрахованих за схемами OD-1a та OD-1 вказує на наступне (рис. 6, а, б). Для удосконаленої розрахункової схеми OD-1a відбувається незначне збільшення висоти жорсткої зони (рис. 6, а) та більш істотне для параметра λ , що відповідає за рух через жорстку проміжну зону 2 (рис. 6, б). При цьому збільшення параметра λ викликає більш стрімке заповнення фланцевої зони та менш стрімке формування стінки стакану, що узгоджується порівнянням приростів вище (рис. 5, б). Ці відмінності разом із зменшенням величини $\bar{p}_{1a \rightarrow}$ по відношенню до відповідної $\bar{p}_{1 \rightarrow}$ для схеми нижнього ОД з прямокутними модулями і забезпечує більш точні прогнозовані дані за силовим режимом та формоутворенням напівфабрикату.

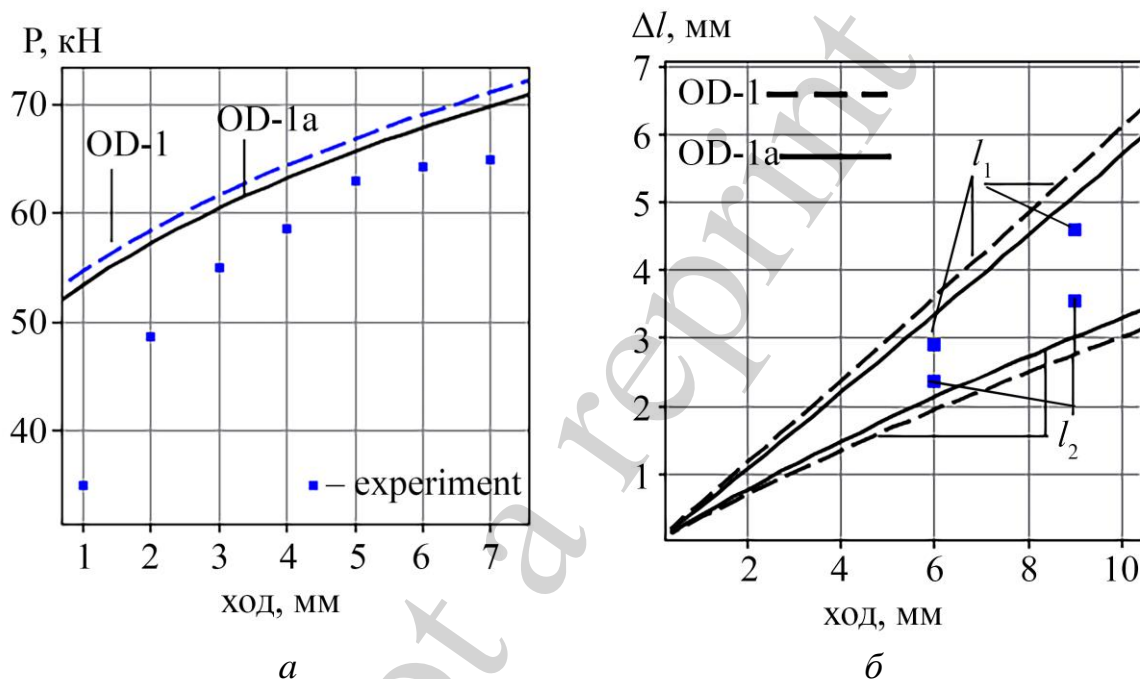


Рис 5. Порівняльний аналіз схем OD-1 та OD-1a з експериментально отриманими точковими даними: а – сили видавлювання; б – приростів розмірів деталі

Таким чином, використання раніше розробленого осевого кінематичного модуля замість найпростішого прямокутного в новій розрахунковій схемі OD-1a є раціональним і для використання моделювання процесів комбінованого видавлювання із транзитним ОД. Критерій оптимальності за приведеним тиском виконаний, введення нового кінематичного модуля дозволило отримати оцінку формоутворення, що ж більш відповідною до експериментальних даних по відношенню із застосуванням схеми OD-1. Використання даної розрахункової схеми OD-1a рекомендовано для моделювання початкової стадії процесу для відносно високих заготовок при $H_0/h_1 > 4.6$ та обмежується виродженням проміжної жорсткої зони, коли $t=0$. Після виродження проміжної жорсткої зони необхідним є перехід розрахункових схем, що відповідають об'єднаному ОД.

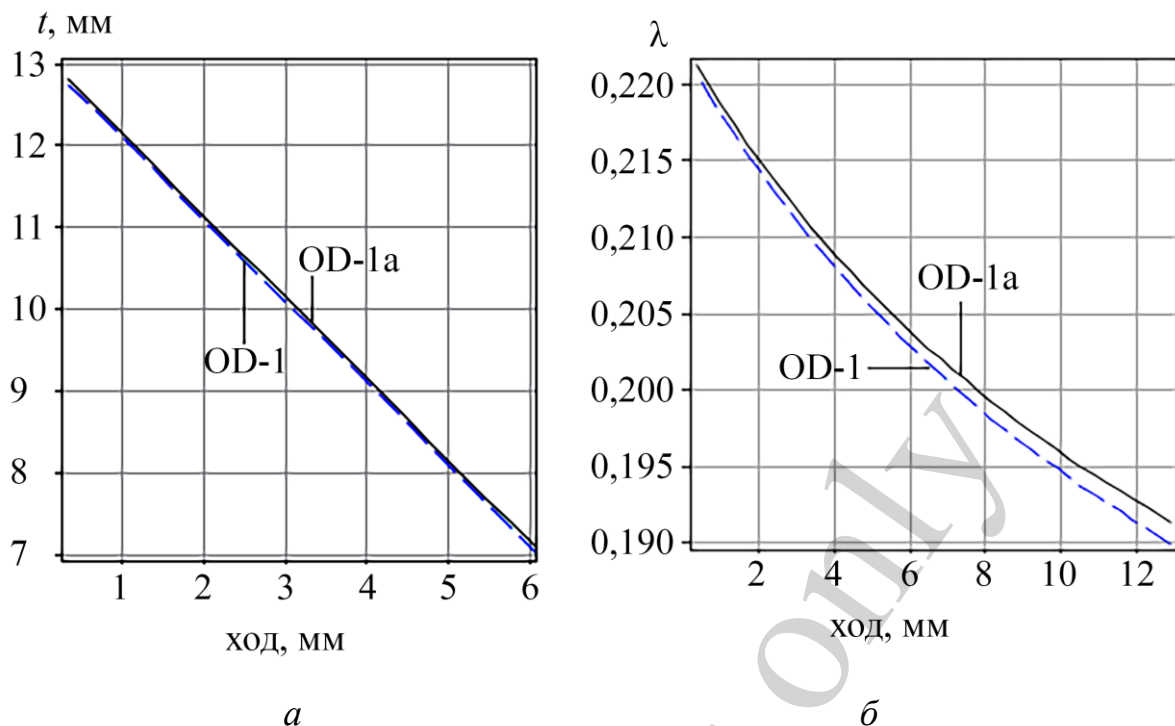


Рис. 6. Порівняльний аналіз розрахункових схем OD-1 та OD-1a: *а* – висоти жорсткої зони; *б* – параметра λ

6. Обговорення результатів моделювання початкової стадії процесу комбінованого видавлювання деталей типу стакан з фланцем

Більш широке впровадження на виробництві процесів комбінованого видавлювання складно профільованих деталей повинно мати адекватну попередню оцінку не тільки силового режиму, а й відповідності напівфабрикату розмірам готової деталі. Це вимагає удосконалення ЕМБП, як ефективного теоретичного методу розрахунку процесів холодного видавлювання з огляду на особливості формування осередків деформації на різних етапах деформування. Найменш дослідженими є процеси із транзитним (роз'єднаним) осередком деформації з наявністю проміжної жорсткої зони, що розділяє два автономних ОД. Виявлені особливості формування осередків деформації (наявність проміжної жорсткої зони і форми зони 3а) згідно викривлення ділільної сітки (рис. 2) та розподілу деформацій (рис. 3) враховані при побудові схеми процесу радіально-зворотного видавлювання. На основі цього запропоновано використання осьового трикутного модуля в зоні розвороту до радіальної течії на заміну найпростішого прямокутного у нижньому осередку деформації (рис. 4). Отримані оцінки силового режиму у формі (4) та (7) та формоутворення деталі згідно розрахункової схеми процесу із наявністю осьового трикутного модуля нижнього осередку деформації початкової стадії процесу радіально-зворотного видавлювання. На відміну від [24], де виявлено суттєві відхилення оцінок приростів деталі від експериментально отриманих розмірів, у новій розрахунковій схемі OD-1a вдалося їх знизити. Це стало можливим завдяки врахуванню більш складної форми зони розвороту 3а (рис. 4) трикутної форми, що вплинуло на визна-

чення основних характеристик процесу. Отримано більш точні дані щодо висоти жорсткої зони та параметра λ згідно (5), що відповідає за рух через жорстку проміжну зону 2 (рис. 6). Проведено порівняльний аналіз силового режиму деформування та формоутворення деталі згідно запропонованої (з осьовим трикутним модулем) та базової (з найпростішим осьовим прямокутним модулем) та експериментальних даних. Виявлено раціональність запропонованої заміни, як із прогнозування силового режиму процесу деформування (рис. 5, а), так і поетапного формозмінення деталі (рис. 5, б), відхилення становить до 10 % за приростами розмірів згідно порівняльного аналізу з експериментально отриманими даними. Таким чином, рекомендовано для початкової стадії процесів комбінованого видавлювання враховувати у розрахункових схемах наявність жорсткої зони та складну форму осередків деформації. Це дозволяє розширити можливості ЕМБП та вирішити проблему отримання більш точних оцінок як силових характеристик процесу деформування, так і приростів деталі. Рекомендовано використання схеми OD-1a із трикутним осьовим модулем для моделювання початкової стадії процесу для відносно високих заготовок при $H_0/h_1 > 4..6$, обмеженням є виродження проміжної жорсткої зони при $t=0$. Введення конструктивних особливостей інструменту (наявність фасок або заокруглень) вплине на заміну величини (3) приведенного тиску деформування нижнього автономного OD-1a. При цьому алгоритм розрахунків буде ідентичний для розглянутої розрахункової схеми, та може рекомендуватися до подальших досліджень з точки зору можливостей керування формоутворенням деталі.

7. Висновки

1. Складнопрофільовані деталі із суцільних або порожнистих заготовок доцільно виготовляти способами комбінованого радіально-поздовжнього видавлювання з декількома ступенями свободи течії металу. Необхідним є забезпечення прогнозування формоутворення деталі, що відповідає дійсності, для можливості оцінки раціональності застосування комбінованого видавлювання з точки зору забезпечення необхідних розмірів деталі. Врахування особливостей формування осередків деформації на різних етапах процесу деформування в рамках використання ЕМБП сприятиме розробці ефективних розрахункових схем процесу.

2. Вдалося отримати оцінку силового режиму та формоутворення деталі на основі розробленої розрахункової схеми початкової стадії процесу радіально-зворотного видавлювання із наявністю осьового трикутного модуля нижнього осередку деформації. Використання даної розрахункової схеми рекомендовано для моделювання початкової стадії процесу для відносно високих заготовок при $H_0/h_1 > 4..6$ та обмежується виродженням проміжної жорсткої зони, коли $t=0$.

3. Проаналізовано вплив зміни комплексу кінематичних модулів нижнього осередку деформації на висоту та швидкість руху жорсткої зони. Встановлено, що збільшення висоти та швидкості руху жорсткої зони поряд із зменшенням величини приведенного тиску деформування нижнього осередку деформації порівняно із попередньо розробленою схемою тягне за собою зниження прогнозованої оцінки силового режиму. Також вдалося знизити до 10 % відхилення про-

гнозованого формоутворення деталі від експериментально отриманих даних, що свідчить про перспективу використання в осьовій зоні трикутного модуля замість прямокутного модуля.

Література

1. Kukhar, V. V. (2015). Producing of elongated forgings with sharpened end by rupture with local heating of the workpiece method. *Metallurgical and Mining Industry*, 6, 122–132. URL: <https://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/MMI-6/016-Kukhar.pdf>
2. Shapoval, A., Drahobetskyi, V., Savchenko, I., Gurenko, A., Markov, O. (2020). Profitability of Production of Stainless Steel + Zirconium Metals Combination Adapters. *Key Engineering Materials*, 864, 285–291. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.864.285>
3. Markov, O., Kukhar, V., Zlygoriev, V., Shapoval, A., Khvashchynskyi, A., Zhytnikov, R. (2020). Improvement of upsetting process of four-beam workpieces based on computerized and physical modeling. *FME Transactions*, 48 (4), 946–953. doi: <https://doi.org/10.5937/fme2004946m>
4. Zhbakov, I., Aliieva, L., Malii, K. (2020). Simulation of microstructure changes of steel during the open die forging process. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 55 (3), 523–529. URL: https://dl.uctm.edu/journal/node/j2020-3/4_19-278_p_523-529.pdf
5. Kukhar, V., Balalayeva, E., Hurkovska, S., Sahirov, Y., Markov, O., Prysiashnyi, A., Anishchenko, O. (2019). The Selection of Options for Closed-Die Forging of Complex Parts Using Computer Simulation by the Criteria of Material Savings and Minimum Forging Force. *Intelligent Communication, Control and Devices*, 325–331. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-13-8618-3_35
6. Gribkov, E. P., Malyhin, S. O., Hurkovskaya, S. S., Berezshnaya, E. V., Merezhko, D. V. (2022). Mathematical modelling, study and computer-aided design of flux-cored wire rolling in round gauges. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 119 (7-8), 4249–4263. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08662-x>
7. Kulagin, R., Beygelzimer, Y., Estrin, Y., Ivanisenko, Y., Baretzky, B., Hahn, H. (2019). A Mathematical Model of Deformation under High Pressure Torsion Extrusion. *Metals*, 9 (3), 306. doi: <https://doi.org/10.3390/met9030306>
8. Bhaduri, A. (2018). *Extrusion*. Springer Series in Materials Science, 599–646. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-10-7209-3_13
9. Marini, D., Cunningham, D., Corney, J. R. (2017). Near net shape manufacturing of metal: A review of approaches and their evolutions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 232 (4), 650–669. doi: <https://doi.org/10.1177/0954405417708220>
10. Ogorodnikov, V. A., Dereven'ko, I. A., Sivak, R. I. (2018). On the Influence of Curvature of the Trajectories of Deformation of a Volume of the Material by Pressing on Its Plasticity Under the Conditions of Complex Loading. *Materials Science*, 54 (3), 326–332. doi: <https://doi.org/10.1007/s11003-018-0188-x>

11. Алиева, Л. И. (2018). Совершенствование процессов комбинированного выдавливания. Краматорск: ООО «Тираж - 51», 352.
12. Aliev, I. S. (1988). Radial extrusion processes. *Soviet Forging and Sheet Metal Stamping Technology*, 6, 1–4.
13. Kalyuzhnyi, V. L., Alieva, L. I., Kartamyshev, D. A., Savchinskii, I. G. (2017). Simulation of Cold Extrusion of Hollow Parts. *Metallurgist*, 61 (5-6), 359–365. doi: <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0501-1>
14. Perig, A. (2015). Two-parameter Rigid Block Approach to Upper Bound Analysis of Equal Channel Angular Extrusion Through a Segal 2 θ -die. *Materials Research*, 18 (3), 628–638. doi: <https://doi.org/10.1590/1516-1439.004215>
15. Алюшин, Ю. А. (2012). Механика твердого тела в переменных Лагранжа. М.: Машиностроение, 192.
16. Шестаков, Н. А. (1998). Энергетические методы расчёта процессов обработки металлов давлением. Москва: МГИУ, 125.
17. Hu, Y., Lai, Z., Zhang, Y. (2007). The study of cup-rod combined extrusion processes of magnesium alloy (AZ61A). *Journal of Materials Processing Technology*, 187-188, 649–652. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.054>
18. Lee, D. J., Kim, D. J., Kim, B. M. (2003). New processes to prevent a flow defect in the combined forward–backward cold extrusion of a piston-pin. *Journal of Materials Processing Technology*, 139 (1-3), 422–427. doi: [https://doi.org/10.1016/s0924-0136\(03\)00515-6](https://doi.org/10.1016/s0924-0136(03)00515-6)
19. Lee, H. I., Hwang, B. C., Bae, W. B. (2001). A UBET analysis of non-axisymmetric forward and backward extrusion. *Journal of Materials Processing Technology*, 113 (1-3), 103–108. doi: [https://doi.org/10.1016/s0924-0136\(01\)00666-5](https://doi.org/10.1016/s0924-0136(01)00666-5)
20. Александров, А. А., Евстифеев, В. В., Ковальчук, А. И., Евстифеев, А. В. (2012). Математическое моделирование процесса поперечного выдавливания конических фланцев на трубной заготовке. *Вестник СибАДИ*, 6 (28), 93–98.
21. Головин, В. А. и др. (2005). Разработка и исследование процессов холодной объемной штамповки полых осесимметричных деталей сложной формы. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*, 11, 35–38.
22. Lee, H. Y., Hwang, B. B., Lee, S. H. (2012). Forming load and deformation energy in combined radial backward extrusion process. *Proceedings of the Int. Conf. “Metal Forming 2012”*. Krakow, 487–490.
23. Noh, J., Hwang, B. B., Lee, H. Y. (2015). Influence of punch face angle and reduction on flow mode in backward and combined radial backward extrusion process. *Metals and Materials International*, 21 (6), 1091–1100. doi: <https://doi.org/10.1007/s12540-015-5276-y>
24. Vlasenko, K., Hrudkina, N., Reutova, I., Chumak, O. (2018). Development of calculation schemes for the combined extrusion to predict the shape formation of axisymmetric parts with a flange. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (1 (93)), 51–59. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.131766>

25. Hrudkina, N., Aliieva, L. (2020). Modeling of cold extrusion processes using kinematic trapezoidal modules. *FME Transactions*, 48 (2), 357–363. doi: <https://doi.org/10.5937/fme2002357h>
26. Hrudkina, N., Aliieva, L., Abhari, P., Kuznetsov, M., Shevtsov, S. (2019). Derivation of engineering formulas in order to calculate energy-power parameters and a shape change in a semi-finished product in the process of combined extrusion. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (7 (98)), 49–57. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.160585>
27. Hrudkina, N. S., Markov, O. E., Shapoval, A. A., Titov, V. A., Aliiev, I. S., Abhari, P., Malii, K. V. (2022). Mathematical and computer simulation for the appearance of dimple defect by cold combined extrusion. *FME Transactions*, 50 (1), 90–98. doi: <https://doi.org/10.5937/fme2201090h>
28. Farhoumand, A., Ebrahimi, R. (2009). Analysis of forward–backward-radial extrusion process. *Materials & Design*, 30 (6), 2152–2157. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.08.025>
29. Farhoumand, A., Ebrahimi, R. (2016). Experimental investigation and numerical simulation of plastic flow behavior during forward-backward-radial extrusion process. *Progress in Natural Science: Materials International*, 26 (6), 650–656. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2016.12.005>
30. Jafarzadeh, H., Barzegar, S., Babaei, A. (2014). Analysis of Deformation Behavior in Backward–Radial–Forward Extrusion Process. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 68 (2), 191–199. doi: <https://doi.org/10.1007/s12666-014-0441-4>
31. Hrudkina, N., Aliieva, L., Markov, O., Malii, K., Sukhovirska, L., Kuznetsov, M. (2020). Predicting the shape formation of parts with a flange and an axial protrusion in the process of combined aligned radial-direct extrusion. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (1 (107)), 110–117. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.212018>
32. Hrudkina, N. (2021). Process modeling of sequential radial-direct extrusion using curved triangular kinematic module. *FME Transactions*, 49 (1), 56–63. doi: <https://doi.org/10.5937/fme2101056h>