

Грудкіна Н. С.
Левченко В. М.
Абхари П.
Коцюбівська К. І.
Малій Х. В.

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТОЧНОГО ОБ'ЄМНОГО ШТАМПУВАННЯ ВИДАВЛЮВАННЯМ НА ОСНОВІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ РОЗРАХУНКУ

В роботі продемонстровано можливості ефективного застосування енергетичного методу балансу потужностей при проектуванні процесів точного об'ємного штампування видавлюванням. Проведено класифікацію кінематичних модулів за основними характеристиками, що підвищує оперативність їх використання на етапі побудови розрахункових схем процесів. Надано рекомендації з раціонального застосування уніфікованих кінематичних модулів з урахуванням обмежень їх комбінування із суміжними кінематичними модулями, можливостей варіювання форми межі та розташування відносно осі симетрії. Розширено базу уніфікованих кінематичних модулів трапецеїдальної і трикутної форми та надано рекомендації з огляду на раціональність і обмеження їх використання при побудові розрахункових схем процесів із врахуванням оперативної зміни конфігурації інструменту (наявності або відсутності фаски та заокруглення). Це забезпечило можливості оперативного керування формоутворенням складнопрофільованих деталей у процесах суміщеного комбінованого видавлювання з декількома ступенями свободи течії металу, що проходять в саморегульованому режимі. Розроблено програмний модуль з систематизації бази уніфікованих кінематичних модулів, складових їх розрахунку і рекомендацій із застосування та комплексу енергетичних розрахункових моделей процесів точного об'ємного штампування видавлюванням із прогнозування силового режиму та формоутворення деталі. Окреслено перспективні напрями удосконалення проектування процесів точного об'ємного штампування видавлюванням на основі енергетичних моделей розрахунку, що сприятиме впровадженню процесів суміщеного комбінованого видавлювання на виробництві.

Ключові слова: *точне об'ємне штампування, суміщене комбіноване видавлювання, кінематичний модуль, енергетичний метод балансу потужностей, проектування, розрахункова модель.*

Процеси поперечного и комбінованого видавлювання з одним або декількома ступенями свободи течії на даний час відносять до перспективних ресурсозберігаючих технологій з огляду на збільшення обсягів виробництва точних заготовок та неперервне розширення номенклатури штампованих деталей та матеріалів [1–4]. Однак впровадження процесів комбінованого видавлювання з декількома ступенями свободи течії на виробництві вимагає наявності попередньої достовірної оцінки силового режиму, деформовності, поетапного та граничного формоутворення напівфабрикату. Ефективним теоретичним методом дослідження процесів точного об'ємного штампування (ТОШ) видавлюванням є енергетичний метод балансу потужностей [3, 5–9]. Розробка технологічних процесів холодного видавлювання в цьому контексті спирається на систему моделей, необхідних для забезпечення реалізації основних етапів проектування із використання САПР. Тому актуальним питанням є розробка класифікації за основними характеристиками та властивостями кінематичних модулів, як складових розрахункової схеми процесу, та вироблення відповідних рекомендацій стосовно раціональності їх використання. Саме конструктивні особливості інструменту (наявність або відсутність фасок, заокруглень, крайок) є факторами керування формоутворенням деталі та значно розширюють можливості використання комбінованого суміщеного видавлювання. Однак це накладає умови із забезпечення можливостей оперативного аналізу їх раціональності за рахунок внесення відповідних змін в побудовані базові розрахункові моделі саме на етапі проектування. Таку оперативність урахування комплексу технологічних факторів, в тому числі із зміни конфігурації інструменту, та їх впливу на формоутворення і дефектоутворення напівфабрикату демонструє енергетичний метод балансу потужностей (ЕМБП). При цьому використання модульного підходу в рамках застосування ЕМБП значно спрощує етап проектування з оцінки раціональності саме процесів комбінованого суміщеного видавлювання для виготовлення складнопрофільованих деталей, що відповідають розмірам готової деталі [3, 10–14].

Використання кінематичних модулів трикутної та трапецеїдальної форми дозволило розробити розрахункові моделі прогнозування силового режиму та формоутворення процесів радіально-поздовжнього видавлювання [9, 12]. Застосування трапецеїдальних кінематичних модулів також надало можливість прогнозувати дефектоутворення у вигляді утягнення в донній частині напівфабрикату при комбінованому радіально-зворотному видавлюванні порожнистих деталей [8, 15]. Спроби виявити обмеження у використанні осьового кінематичного модуля трапецеїдальної форми з огляду на форми суміжних кінематичних модулів наведено в роботах [9, 16]. Однак узагальнення та систематизацію властивостей цих модулів не проводили, як і перевірку доцільності в порівнянні із кінематичними модулями з паралельною течією та виявлення обмежень їх використання з огляду на особливості суміжних кінематичних модулів. Таким чином, напрямки розширення можливостей використання ЕМВО полягають у систематизації розроблених кінематичних модулів з огляду розробки їх як елементів оперативного включення в загальні розрахункові схеми із наявністю рекомендацій щодо раціональності їх застосування та напрямків подальшого удосконалення та підвищення оперативності процесу проектування.

Метою роботи є удосконалення проектування процесів точного холодного об'ємного штампування видавлюванням на основі розвитку енергетичного методу балансу потужностей.

На першому етапі проектування на основі вихідної інформації проводиться оцінка можливості використання процесів ТОШ видавлюванням для отримання деталей необхідної конфігурації. Аналіз перш за все ґрунтується на комплексі обмежень, характерних для досліджуваних способів комбінованого видавлювання, основні з яких пов'язано із ресурсом пластичності та можливістю різного роду дефектоутворенням. З іншого боку для процесів з двома ступенями свободи течії обов'язковим є контроль відповідності розмірів деталі, що є затребуваними. При чому у разі відхилень саме оперативний аналіз можливості керування течією металу введенням змін у конфігурацію інструментів (фасок або заокруглень) дозволяє отримати відповідь на питання доцільності обраного способу комбінованого видавлювання. Побудова такого комплексу альтернативних варіантів технологічного процесу і визначає наступний етап процесу проектування, що буде тим більш раціональним, чим оперативніше ці альтернативні варіанти будуються та порівнюються один з одним. З огляду на ефективність застосування в межах ЕМБП методу кінематичних модулів на перший план виходить розробка таких нових кінематичних модулів та їх комплектів, вбудовуваність яких в базову розрахункову схему не буде викликати труднощів та дозволить врахувати вплив різних конструктивних особливостей (фасок або заокруглень) перш за все на формоутворення деталі.

Аналіз найуживаніших уніфікованих кінематичних модулів трапецеїдальної та трикутної форми дозволив виокремити особливості, властивості та обмеження їх використання перш за все з огляду на розташування, форму та кількість ступенів свободи течії металу. Це в свою чергу надало можливість запропонувати розширену класифікацію відомих та розроблених кінематичних модулів та намітити перспективи пошуку розширення їх можливостей.

Класифікація уніфікованих кінематичних модулів за:

- 1) формою (прямокутна у найпростішому варіанті, трапецеїдальна або трикутна із прямолінійною або криволінійною межею (або межами у більш складному варіанті));
- 2) розташуванням (осьовий (А) або кільцевий, внутрішній (І) або зовнішній з точки зору заповнення із плином процесу деформування, що враховує особливості конфігурації інструменту) та кількістю меж із суміжними кінематичними модулями та контакту заготовки та інструменту;
- 3) кількістю швидкостей на вході / виході із модуля, що визначає степінь свободи течії металу (одна в найпростішому варіанті чи більше);
- 4) наявністю / відсутністю швидкостей входу / виходу через похилі межі модуля, що вказує на зміни характеру течії металу від поздовжнього до радіального та навпаки;
- 5) наявністю / відсутністю обмежень кривої, що описує похилу межу (можливості розгляду у якості сімейства функцій певного параметру варіювання) або відсутності цієї можливості;
- 6) наявністю / відсутністю обмежень із варіації конфігурації суміжних модулів, що визначає обмеження у використанні модуля;

7) наявністю випадків виродження модуля у іншу форму або наявністю частинних випадки з меншим ступенем свободи течії металу.

Фрагмент систематизація кінематичних модулів трапецеїдальної форми за вище сформульованими ознаками наведений в табл. 1. Для наведених кінематичних модулів у передостанньому рядку вказано на наявність (або відсутність) обмежень для суміжних модулів, в останньому рядку окреслено питання, вирішення яких дозволять розширити можливості їх застосування у перспективі.

Таблиця 1

Фрагмент систематизації кінематичних модулів трапецеїдальної форми

<p>Кільцевий зовнішній 1 похила та 1 горизонтальна межі контакту з інструментом 2 вертикальні межі із суміжними модулями</p>	<p>Кільцевий внутрішній 1 горизонтальна (або мертвою зоною) та 1 вертикальна межі контакту з інструментом 1 вертикальна та 1 похила межі із суміжними модулями</p>
<p>Один ступінь свободи течії: 1 вхідна швидкість 1 вихідна швидкість</p>	<p>Один ступінь свободи течії: 1 вхідна швидкість 1 вихідна швидкість</p>
<p>Швидкостей входу (виходу) через похилу межу немає Зміни напрямку течії немає</p>	<p>Швидкість входу / виходу через похилу межу є; зміна напрямку течії є</p>
<p>Варіативність форми кривої є Обмеження на криву є Найпростіший випадок похилої межі – пряма</p>	<p>Варіативність форми кривої є Обмеження на криву є Найпростіший випадок похилої межі – пряма</p>
<p>Обмежень щодо суміжних кінематичних модулів немає</p>	<p>Обмеження є (з похилою межею контактує тільки жорсткий суміжний модуль)</p>
<p>Розширення за рахунок додавання швидкості входу / виходу через похилу (або горизонтальну) межу</p>	<p>Питання щодо виродження в трикутний при $h=0$ Розширення за рахунок додавання швидкості входу / виходу через горизонтальну (або горизонтальну) межу</p>

Для більшої інформативності для програмної реалізація досліджень в рамках ЕМБП запропоновано використання спрощеної схеми кінематичного модуля із позначеннями:

– для меж модуля: суцільна лінія позначає межі з інструментом або жорсткою зоною (за відсутності радіальної складової плинину), пунктирна відповідає за поєднання із суміжними модулями довільної форми; похилі межі різної форми – варіаціями у формі другої кривої;

- швидкості на поверхнях входу та виходу позначаються за допомогою індексів i та $i + 1$;
- для наочності знаки «+» та «-» на межах поєднання із суміжними модулями використовуються для врахування особливостей обчислення повної величини приведенного тиску потужності сил зрізу.

Проведена систематизація кінематичних модулів дозволила виокремити напрямки побудови кінематичних модулів складної конфігурації, що є альтернативними до модулів із паралельною прямолінійною течією металу. З огляду на необхідність врахування особливостей конфігурації інструменту (наприклад, конусності протипуансону) або перебігу течії металу всередині заготовки в осьовій зоні розроблено альтернативні кінематичні модулі трапецеїдальної форми та їх комплекси (рис. 1). Приклади реалізації даних кінематичних модулів в розрахункових схемах наведено в роботах [3, 9, 12, 17]. Компактну інтерпретацію розрахунків кінематичних модулів із виробленими рекомендаціями з їх застосування реалізовано в одному із модулів програмного продукту «EXTRUSION» у формі окремого модуля Modules.exe (рис. 2).

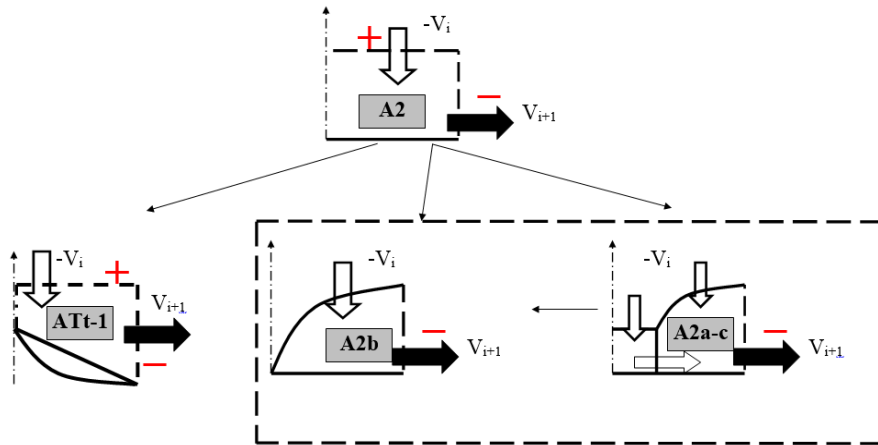


Рис. 1. Комплекс альтернативних осьових кінематичних модулів та їх комплексів із зміною напрямку течії

MODULES

- МОДУЛЬ 1
 - Конфігурація інструмента
 - Внутрішні
 - AT-1
 - AT-1
 - AT-2
 - AK_2a-2c
 - AP-1
 - Зовнішні
 - Tr-1
 - T-1
 - TR-1
 - Tr-1
 - P-1
 - PR-1
 - Внутрішні
 - Осьові
 - Одна ступінь свободи течії
 - Дві ступені свободи течії
 - Кільцеві
 - МОДУЛЬ 2
 - З'єднанні осередок деформації
 - Радіально-зворотне видалювання
 - Радіально-зворотне видалювання (без утягнення)
 - Дефектування
 - Прикладні осередок деформації
 - Радіально-гранне видалювання з осевим відростком
 - Комплекси кінематичних модулів

Властивості, обмеження та рекомендації:

- 1) Похила межа – поверхня контакту із інструментом або «мертва зона», інших обмежень на суміжні кінематичні модулі немає.
- 2) Радіус заокруглення R можна розглядати у якості параметра оптимізації.

КМПШШ:
$$\begin{cases} V_z = -\frac{R_0 V_0}{r^2(r)} z'(r) \cdot z, \\ V_r = \frac{R_0 V_0}{r z(r)}, \end{cases}$$

$$z_1(r) = \frac{A}{r - R_0 \left(1 - \frac{R}{2\pi}\right)} + B, \text{ де } A = \frac{R^2 R_0}{2\pi} \left(1 + \frac{R_0}{2\pi}\right); B = h_i - \frac{2\pi A}{R_0 R}$$

$$N_{s2} = \frac{4\pi\sigma_s \mu_s V_0 R_0 h_i}{\sqrt{3}} \left[\frac{2}{B} \left[R - \frac{A}{B} \ln \left| \frac{BC+A}{B \frac{R_0 R}{2\pi} + A} \right| \right] + \frac{B^2}{A^2} \ln \left| \frac{BR_0 R + 2\pi A C}{R_0 R (BC+A)} \right| + \frac{B}{A} \left(\frac{1}{C} - \frac{2\pi}{R_0 R} \right) \frac{1}{2} \left(\frac{1}{C^2} - \frac{4\pi^2}{R_0^2 R^2} \right) \right]$$

$$N_{s2} = \sigma_s \sqrt{V_0} \int \int \int \dot{\epsilon}_i^2 dV, \text{ де}$$

$$V = 2\pi \left[A \left(R + R_0 \left(1 - \frac{R}{2\pi}\right) \ln \left| \frac{2\pi C}{R_0 R} \right| + B \frac{R_{s(i+1)}^2 - R_0^2}{2} \right)$$

$$N_{s(i)} = \frac{4\pi^3 \sigma_s A V_0 h_i}{\sqrt{3} R_0 R^2} \quad N_{s(i+1)} = \frac{\pi \sigma_s R_0 h_i A}{\sqrt{3} C^2}$$

Рис. 2. База альтернативних кінематичних модулів та їх комплексів

Модуль розрахунків `extrude_eng.exe` доповнюється розрахунковими моделями прогнозування процесів комбінованого видавлювання (рис. 3). Для аналізу моделей є можливість використання похилої межі різної форми, варіювання умов тертя згідно закону Зібеля в межах від 0 до 0,5 та матеріалу з наведених в базі, яку можна оперативним доповнювати.

Таким чином, проведена систематизація кінематичних модулів складної конфігурації дозволила виявити особливості їх застосування та напрямки пошуку нових кінематичних модулів, що є альтернативними до відомих із паралельною течією. Основними напрямками розширення бази кінематичних модулів є розробка кінематичних модулів трапецеїдальної та трикутної форми (та їх комплексів) за рахунок використання криволінійних меж та збільшення ступенів свободи течії металу. При цьому необхідним є порівняльний аналіз їх використання із застосуванням більш простих модулів із паралельною течією та виявлення меж раціональності такої заміни. Це сприятиме більш ефективному та оперативному використанню ЕМБП для визначення оптимальних параметрів конфігурації інструмента та розробці відповідних конструкторсько-технологічних рекомендацій при проектуванні процесів точного об'ємного штампування видавлюванням.

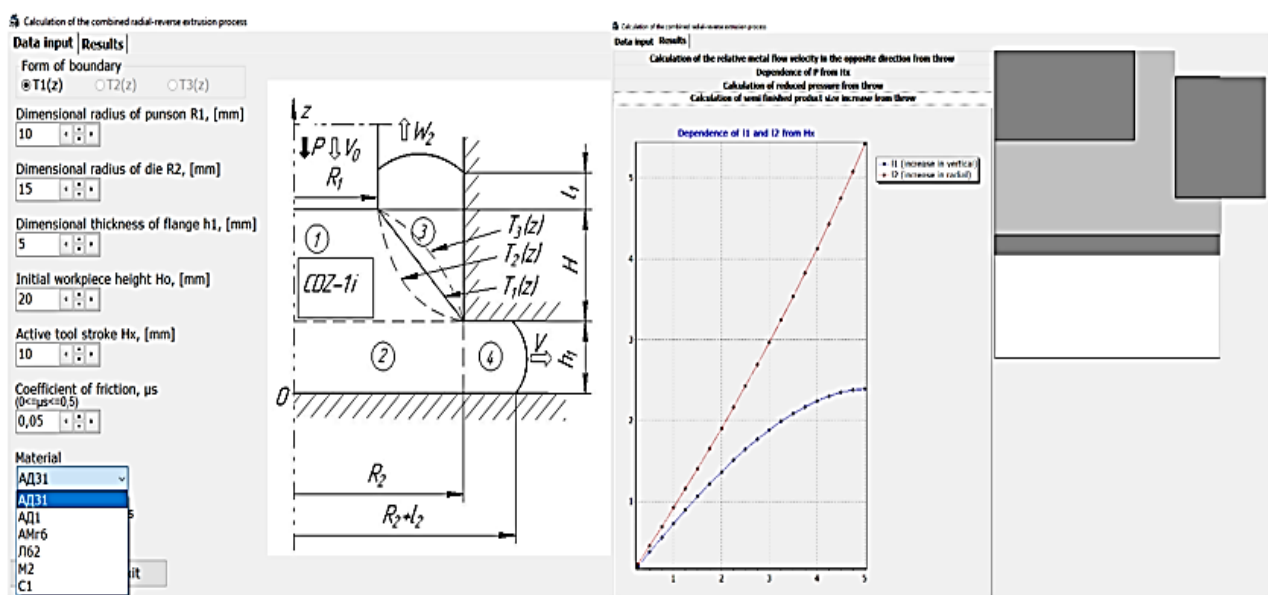


Рис. 3 Вікно вибору розрахункової схеми та пристовів деталі

ВИСНОВКИ

В роботі запропоновано класифікацію уніфікованих кінематичних модулів за основними характеристиками, надано рекомендації раціональності використання кінематичних модулів трапецеїдальної та трикутної форми за жорсткістю комбінування із суміжними кінематичними модулями, можливістю варіювання форми межі та розташуванням відповідно осі симетрії. Розширено базу уніфікованих кінематичних модулів трапецеїдальної і трикутної форми та їх комплексів та надано рекомендації з огляду на можливості і обмеження їх використання при побудові розрахункових схем процесів із можливістю оперативної зміни конфігурації інструмента (наявності або відсутності фаски та заокруглення). Це забезпечує можливість оперативного керування формоутворенням складнопрофільованих деталей у процесах суміщеного комбінованого видавлювання з декількома ступенями свободи течії металу, що дозволяє на етапі проектування процесів комбінованого видавлювання визначитися із оптимальною конфігурацією інструмента. Розрахунки кінематичних модулів складної форми, рекомендації з їх застосування, комплекс розрахункових моделей прогнозування силового режиму та формоутворення в процесах комбінованого видавлювання реалізований у програмному продукті «EXTRUSION». Окреслені перспективні напрямки удосконалення процесу проектування процесів точного об'ємного штампування видавлюванням сприятимуть впровадженню процесів суміщеного комбінованого видавлювання на виробництві.

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. Aliev I. S. Radial extrusion processes. *Soviet Forging and Metal Stamping Technology (English Translation of Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo)*. 1988. Part 3. pp. 54–61. ISSN: 0891-334
2. Bhaduri A. Extrusion. In: *Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys. Springer Series in Materials Science*. 2018. 264, pp. 599–646. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-7209-3_13
3. Алиева Л. И. Совершенствование процессов комбинированного выдавливания: монография. Краматорск: ООО «Тираж-51». 2018. 352 с. ISBN 978-966-379-846-2
4. Farhoumand A., Ebrahimi R. Analysis of forward–backward-radial extrusion process. *Materials and Design*. 2009. 30. 6, pp. 2152–2157. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.08.025>
5. Степанский Л. Г. Расчеты процессов обработки металлов давлением. Москва: Машиностроение. 1979. 215 с.
6. Noh J., Hwang B.B., Le H. Y. Influence of Punch Face Angle and Reduction on Flow Mode in Backward and Combined Radial Backward Extrusion Process. *Metals and Materials International*. 2015, 21, 6, pp.1091–1100. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12540-015-5276-y>
7. Choi H. J, Choi J. H., Hwang B. B. The forming characteristics of radial-backward extrusion. *J Mater Process Technol*. 2001, 113, pp. 141–147. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00703-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00703-8)
8. Aliiev I., Aliieva L., Grudkina N., Zhibankov Ya. Prediction of the variation of the form in the processes of extrusion. *Metallurgical and Mining Industry*. 2011. 3(7), pp. 17–22. <https://www.metaljournal.com.ua/assets/Uploads/attachments/17Aliiev.pdf>
9. Hrudkina N. , Aliieva L., Markov O., Kartamyshev D., Shevtsov S., Kuznetsov M. Modeling the process of radial-direct extrusion with expansion using a triangular kinematic module. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. 3/1 (105), pp. 17–22. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203989>
10. Алиев И. С., Носаков А. А., Махмудов К. Д. Метод кинематических модулей для анализа процессов точной объемной штамповки. *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні*. Зб. наук. пр. Краматорськ: ДДМА. 2001. С. 142–146.
11. Грудкина Н. С., Алиева Л. И., Малий К. В. Проектирование процессов холодного выдавливания на основе энергетических расчетных модулей. *Обработка материалов давлением*. Краматорск: ДГМА. 2020. 1 (50). С. 67–76.
12. Aliieva L., Hrudkina N., Aliiev I., Zhibankov I., Markov O. Effect of the tool geometry on the force mode of the combined radial-direct extrusion with compression. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Engineering technological systems*. 2020. 2. 1 (104), pp. 15 –22. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.198433>
13. Aliieva L. I., Markov O. Y., Aliiev I. S., Hrudkina N. S., Levchenko V. N., Malii Kh. V. Analysis of power parameters of the combined three-direction extrusion process. *FME Transactions*. 2021. 49. 2, pp. 344–355. https://www.mas.bg.ac.rs/media/istrazivanje/fme/vol49/2/9_oe_markov_et_al.pdf
14. Chang Y. S., Hwang B. B. A study on the forming characteristics of radial extrusions combined with forward extrusion. *Transactions of Materials Processing*. 2000. 9. 3, pp. 242–248.
15. Hrudkina N. S., Markov O. E., Shapoval A. A., Titov V. A., Aliiev I. S., Abhari P., Malii K. V. Mathematical and Computer Simulation for the Appearance of Dimple Defect by Cold Combined Extrusion. *FME Transactions*. 2022. 50. 1, pp. 90–98. DOI: <https://doi.org/10.5937/fme2201090H>
16. Hrudkina N. S., Aliieva L. I. Modeling of cold extrusion processes using kinematic trapezoidal modules. *FME Transactions*. 2020. 48. 2, pp. 357–363. DOI: [doi:10.5937/fme2002357H](https://doi.org/10.5937/fme2002357H)
17. Алиева Л. И. Деформирование заготовок способом радиального выдавливания с противодавлением. *Вісник ХНТУ*. Херсон. 2016. 2 (57). С. 29–36.

REFERENCES

1. Aliev I.S. Radial extrusion processes. *Soviet Forging and Metal Stamping Technology (English Translation of Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo)*. 1988. Part 3. pp. 54–61. ISSN: 0891-334x
2. Bhaduri A. Extrusion. In: *Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys. Springer Series in Materials Science*. 2018. 264, pp. 599–646. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-7209-3_13
3. Aliieva L.I. Improvement of combined extrusion processes: monograph. Kramatorsk: LLC "Tiraj – 51". 2018. 352 p. ISBN 978-966-379-846-2. (in Russian).
4. Farhoumand A., Ebrahimi R. Analysis of forward–backward-radial extrusion process. *Materials and Design*. 2009. 30. 6, pp. 2152–2157. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.08.025>
5. Stepanskiy L.G. Calculations of metal forming processes. Moscow: Mechanical Engineering. 1979, 215 p. (in Russian).
6. Noh J., Hwang B.B., Le H.Y. Influence of Punch Face Angle and Reduction on Flow Mode in Backward and Combined Radial Backward Extrusion Process. *Metals and Materials International*. 2015, 21, 6, pp.1091–1100. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12540-015-5276-y>
7. Choi H.J, Choi J.H., Hwang B.B. The forming characteristics of radial-backward extrusion. *J Mater Process Technol*. 2001, 113, pp. 141–147. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00703-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00703-8)

8. Aliiev I., Aliieva L., Grudkina N., Zhbakov Ya. Prediction of the variation of the form in the processes of extrusion. *Metallurgical and Mining Industry*. 2011. 3(7), pp. 17–22. <https://www.metaljournal.com.ua/assets/Uploads/attachments/17Aliiev.pdf>
9. Hrudkina N., Aliieva L., Markov O., Kartamyshev D., Shevtsov S., Kuznetsov M. Modeling the process of radial-direct extrusion with expansion using a triangular kinematic module. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. 3/1 (105), pp. 17–22. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203989>
10. Aliiev I.S., Nosakov A.A., Makhmudov K.D. The method of kinematic modules for the analysis of processes of precise forging. *Improvement of processes and possession of vise processing in metallurgy and machine-building*. Kramatorsk: DSEA. 2001, pp. 142–146. (in Russian).
11. Hrudkina N.S., Aliieva L.I., Malii K.V. Design of cold extrusion processes based on energy calculation modules. *Materials Working by Pressure*. Kramatorsk: DSEA. 2020. 1 (50), pp. 67–76. (in Russian).
12. Aliieva L., Hrudkina N., Aliiev I., Zhbakov I., Markov O.. Effect of the tool geometry on the force mode of the combined radial-direct extrusion with compression. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Engineering technological systems*. 2020. 2. 1 (104), pp. 15–22. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.198433>
13. Aliieva L. I., Markov O. Y., Aliiev I. S., Hrudkina N. S., Levchenko V. N., Malii Kh. V. Analysis of power parameters of the combined three-direction extrusion process. *FME Transactions*. 2021. 49. 2, pp. 344–355. https://www.mas.bg.ac.rs/media/istravanje/fme/vol49/2/9_oe_markov_et_al.pdf
14. Chang Y.S., Hwang B.B. A study on the forming characteristics of radial extrusions combined with forward extrusion. *Transactions of Materials Processing*. 2000. 9. 3, pp. 242–248.
15. Hrudkina N.S., Markov O.E., Shapoval A.A., Titov V.A., Aliiev I.S., Abhari P., Malii K.V. Mathematical and Computer Simulation for the Appearance of Dimple Defect by Cold Combined Extrusion. *FME Transactions*. 2022. 50. 1, pp. 90–98. DOI: <https://doi.org/10.5937/fme2201090H>
16. Hrudkina N. S., Aliieva L. I. Modeling of cold extrusion processes using kinematic trapezoidal modules. *FME Transactions*. 2020. 48. 2, pp. 357–363. DOI: [doi:10.5937/fme2002357H](https://doi.org/10.5937/fme2002357H)
17. Aliieva L.I. Deformation of workpieces by the method of radial extrusion with counterpressure. *Bulletin of KhNTU*. Kherson, 2016. 2 (57), pp. 29–36. (in Russian).

Грудкина Н. С., Левченко В. Н., Абхари П., Коцюбивская Е. И., Малий К. В. Особенности проектирования процессов точной объемной штамповки выдавливанием на основе энергетических моделей расчета

В работе продемонстрированы возможности эффективного использования энергетического метода баланса мощностей при проектировании процессов точной объемной штамповки выдавливанием. Проведена классификация кинематических модулей по основным характеристикам, что повышает оперативность их использования на этапе построения расчетных схем процессов. Даны рекомендации рационального использования унифицированных кинематических модулей с учётом ограничений их комбинирования со смежными кинематическими модулями, возможностей варьирования формы и расположения относительно оси симметрии. Расширена база унифицированных кинематических модулей трапецидальной и треугольной формы и даны рекомендации с точки зрения рациональности и ограничений их использования при построении расчетных схем процессов с учетом оперативного изменения конфигурации инструмента (наличия или отсутствия фаски и скругления). Это обеспечило возможность оперативного управления формообразованием сложнопрофильных деталей в процессах совмещенного комбинированного выдавливания с несколькими степенями свободы течения металла, которые проходят в саморегулирующемся режиме. Разработан программный модуль по систематизации базы унифицированных кинематических модулей, составляющих их расчета и рекомендаций по использованию и комплекса энергетических расчетных моделей процессов точной объемной штамповки выдавливанием с прогнозированием силового режима и формообразования детали. Очерчено перспективные направления совершенствования проектирования процессов точной объемной штамповки выдавливанием на основе энергетических моделей расчета, что будет способствовать внедрению процессов совмещенного комбинированного выдавливания на производстве.

Ключевые слова: точная объемная штамповка, совмещенное комбинированное выдавливание, кинематический модуль, энергетический метод баланса мощностей, проектирование, расчетная модель.

Hrudkina N., Levchenko V., Abhari P., Kotsiubivska K., Malii Kh. The features of the precise forging processes by extrusion design based on energy calculation models

The article demonstrates the possibilities of effective using the energy method of power balance for design of precise forging processes by extrusion. The classification of kinematic modules according to the main characteristics has been carried out, which increases the efficiency of their using at the stage of developing calculating schemes of the processes. The recommendations are given for rational using the unified kinematic modules, taking into account the limitations of their combination with adjacent kinematic modules, the possibility of varying the shape and location relative to the axis of symmetry. The base of unified kinematic modules of trapezoidal and triangular shapes has been expanded and recommendations in terms of rationality and limitations of their using at developing calculation schemes for the processes are given, taking into account operational configuration changing of the tool (presence or absence of chamfer and rounding). This made it possible to quickly control of complex-profile parts forming for the incorporated combined extrusion processes with several degrees of freedom of metal flow, which take place in self-regulating mode. A software

module has been developed to systematize the base of unified kinematic modules, the components of their calculation and recommendations for using and the set of energy calculation models for the processes of precise forging by extrusion with prediction of the power mode and forming of the part. The promising directions for improving design of precise forging processes by extrusion based on energy calculation models are outlined, that will contribute to the introduction of incorporated combined extrusion processes in manufacturing.

Key words: precise forging, incorporated combined extrusion, kinematic module, power balance energy method, design, calculation model.

Грудкіна Наталія Сергіївна – д-р техн. наук, доцент ДДМА
Hrudkina Natali – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of DSEA
Грудкина Наталья Сергеевна – д-р техн. наук, доц. ДГМА
E-mail: vm.grudkina@ukr.net
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0914-8875>

Левченко Володимир Миколайович – канд. техн. наук, мол. наук. співроб. ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАНУ
Levchenko Volodymyr – Candidate of Technical Sciences, Junior Researcher of Ya. Usikov IRE of NASU
Левченко Владимир Николаевич – канд. техн. наук, мл. науч. сотр. ИПЭ им. А. Я. Усикова НАНУ
E-mail: goldangel271@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2411-4198>

Абхари Пейман – д-р техн. наук, професор ДДМА
Abhari Payman – Doctor of Technical Sciences, Full Professor of DSEA
Абхари Пейман – д-р техн. наук, проф. ДГМА
E-mail: payharies@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0827-8149>

Коцюбівська Катерина Іванівна – канд. техн. наук, доцент, завідувачка кафедрою КНУКМ
Kotsiubivska Kateryna – PhD in Technical Science, Associate Professor KNUCA
Коцюбивская Екатерина Ивановна – канд. техн. наук, доцент, заведующая кафедрой КНУКИ
E-mail: katysivak@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3987-9871>

Малій Христина Василівна – канд. техн. наук, доцент ТУМП
Malii Khrystyna – PhD, Associate Prof. TUMP
Малий Кристина Васильевна – канд. техн. наук, доцент ТУМП
E-mail: kristina.v.goncharuk@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9046-4268>

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ
DSEA – Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk
ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск

ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАНУ – Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, м. Харків
Ya. Usikov IRE of NASU – O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv

ИПЭ им. А. Я. Усикова НАНУ – Інститут радіофізики та електроніки ім. А. Я. Усикова Национальной академии наук Украины, г. Харьков

КНУКМ – Київський національний університет культури і мистецтв, м. Київ
KNUCA – Kyiv National University of Cultural and Arts, Kyiv
КНУКИ – Киевский национальный университет культуры и искусств, г. Киев

ТУМП – ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка», м. Запоріжжя
TUMP – Metinvest Polytechnic Technical University LLC, Zaporizhzhia
ТУМП – ООО «Технический университет «Метинвест Политехника», г. Запорожье

Статья поступила в редакцию 10.06.2022 г.