

Грудкіна Н. С.
Алієва Л. І.
Малій Х. В.

ПРОЕКТУВАННЯ ПРОЦЕСІВ ХОЛОДНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ НА ОСНОВІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РОЗРАХУНКОВИХ МОДУЛІВ

На даний час конкурентоспроможність продукції галузей машинобудування нерозривно пов'язане з освоєнням ефективних ресурсозберігаючих технологій, в тому числі холодного об'ємного штампування. Процеси комбінованого (суміщеного або послідовного) видавлювання демонструють стійку тенденцію до збільшення як обсягів виробництва точних заготовок, так і до розширення номенклатури штампованих деталей і матеріалів [1]. Однак процеси комбінованого видавлювання з декількома ступенями свободи течії відрізняються від процесів видавлювання за базовими схемами ускладненням оцінки силового режиму та формоутворення деталі. З одного боку комбіноване видавлювання підвищує технологічні можливості процесів штампування за рахунок зменшення операцій та збільшення коефіцієнту використання металу, з іншого характеризується недостатнім освітленням досліджень щодо прогнозування формозмінення напівфабрикату, та оцінки енергосилового режиму [2–4]. При цьому аналіз впливу технологічних параметрів процесів комбінованого видавлювання з декількома ступенями свободи течії металу в основному проведений експериментально та методом скінченних елементів (МСЕ). Ці дослідження характеризуються відсутністю аналітичних залежностей енергосилових параметрів процесу та величини приростів напівфабрикату [2–5]. Ефективним теоретичним методом дослідження процесів холодного видавлювання (в тому числі з декількома ступенями свободи течії металу) є енергетичний метод балансу потужностей [6, 7]. Використання методу кінематичних елементів в контексті його застосування значно спрощує побудову розрахункових схем досліджуваного процесу деформування. Розробка технологічних процесів (ТП) видавлювання повинно спиратися на систему моделей, необхідних для забезпечення реалізації основних етапів проектування ТП [8]. А враховуючи широке застосування САПР саме база кінематичних модулів різної конфігурації та набору властивостей забезпечить побудову розрахункової схеми процесу. Потреби в описі складної течії металу всередині заготовки та границі межування заготовки із інструментом (фаски, заокруглення тощо) сприяли розширенню бази кінематичних модулів складної конфігурації (трапецеїдальними та трикутними). Однак на етапі побудови розрахункової схеми процесу доцільною є класифікація за типами (видами) та властивостями кінематичних модулів - складових схеми процесу. Також необхідною є розробка рекомендацій щодо доцільності використання кінематичних модулів в обраній розрахунковій схемі, що значно спростить подальшу розробку програмного модуля із розрахунку силових параметрів процесу деформування та прогнозування формоутворення деталі.

Метою роботи є виявлення особливостей проектування процесів холодного видавлювання із використанням моделей розрахунку енергетичним методом.

В рамках використання енергетичного методу верхньої оцінки важливим етапом є побудова розрахункової схеми процесу деформування як комплексу кінематичних модулів із урахуванням особливостей протікання процесу деформування та конфігурації інструменту. Важливими характеристиками кінематичних модулів на даний час можна вважати ступінь свободи течії (одна (I) чи декілька (II)), форму (прямокутна, трикутна, трапецеїдальна), розташування всередині розрахункової схеми (осьові (А), внутрішні (I) та ті, що описують похилу границю межування заготовки з інструментом (Т)), жорсткість межування із суміжними кінематичними модулями (АМ – довільний суміжний модуль або (НМ) – жорсткий суміжний модуль) та можливості варіювання (за формою кривої похилої межі або кутом нахилу або параметром обраної кривої) (рис. 1). Кожний клас (тип) кінематичних модулів має свої

особливості використання та потребує дослідження раціональності використання в порівнянні із кінематичними модулями прямокутної форми із відомими складовими [8, 9]. Особливої уваги потребують саме кінематичні модулі, що відображають особливості конфігурації інструменту (наявність фасок, заокруглень, кромки).

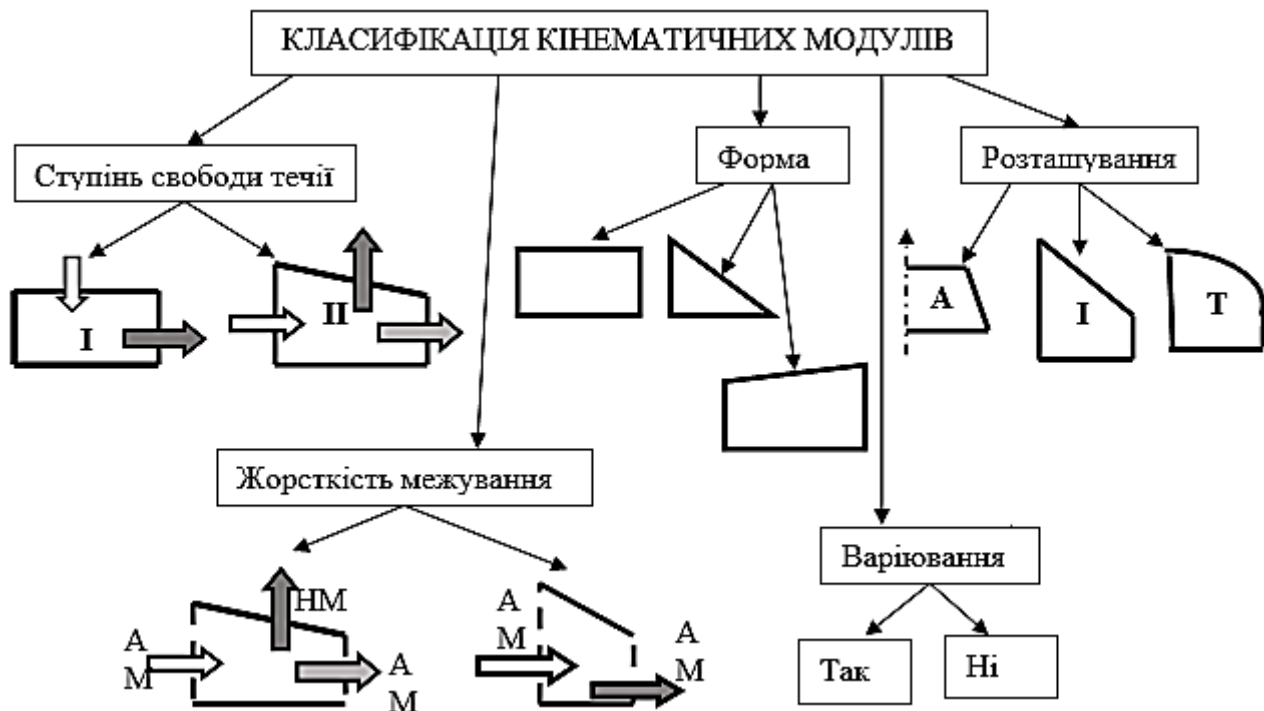


Рис. 1. Класифікація кінематичних модулів

Розробка кінематичних модулів складної конфігурації відображена в роботах [8, 9]. Зазначимо, що деякі з кінематичних модулів трапецеїдальної форми можна розглядати із похилими границями різної форми, при цьому отримано розрахунки приведенного тиску деформування в аналітичному вигляді, що значно спрощує їх використання при розробці відповідних програмних реалізацій. Крім того надано рекомендації щодо раціональності використання їх для комбінації з різними суміжними кінематичними модулями для можливості подальшої оптимізації за обраним параметром.

Для використання осьового кінематичного модуля трикутної форми 2а підтверджена раціональність використання у якості внутрішнього в порівнянні із кінематичним модулем 2 прямокутної форми (рис. 2, а). Із урахуванням розробленого патенту на корисну модель [10], для першого етапу деформування послідовним комбінованим радіально-прямим видавлюванням можливо використання розрахункової схеми ЕМ-2а (рис. 2, б). В загальному випадку для першого етапу конфігурація інструменту може вимагати заміни форми кінематичних модулів 3 та 4 із розробленої бази на трапецеїдальні (з прямолінійною межею або заокругленням) або трикутні модулі. Раціональність використання кінематичного модуля 2а замість прямокутного 2 підтверджена для різних випадків наявності суміжних модулів. Це сприяло отриманню більш адекватної оцінки характеру течії металу в зоні розвороту від осьової зони прямим видавлюванням до радіального видавлювання, зниження оцінки силових параметрів може сягати 5–10 %. Зазначимо, що представлений спосіб комбінованого видавлювання порожнистих деталей шляхом радіально-прямого видавлювання (рис. 2, б) відрізняється тим, що на заключній стадії процесу формують фланець на зовнішній поверхні у придонній частині деталі за рахунок додаткового радіального переміщення металу в зоні розвороту течії металу з радіального на прямий напрямок.

Для другого етапу необхідно врахувати комплекс модулів першого етапу із додаванням кінематичного модуля, що відображає перехід до комбінованого видавлювання з двома степенями свободи течії з наявністю додаткової течії металу в радіальному напрямку, що формує фланець. Перехід від першого етапу процесу деформування до другого цілком визначений необхідним ходом пуансону.

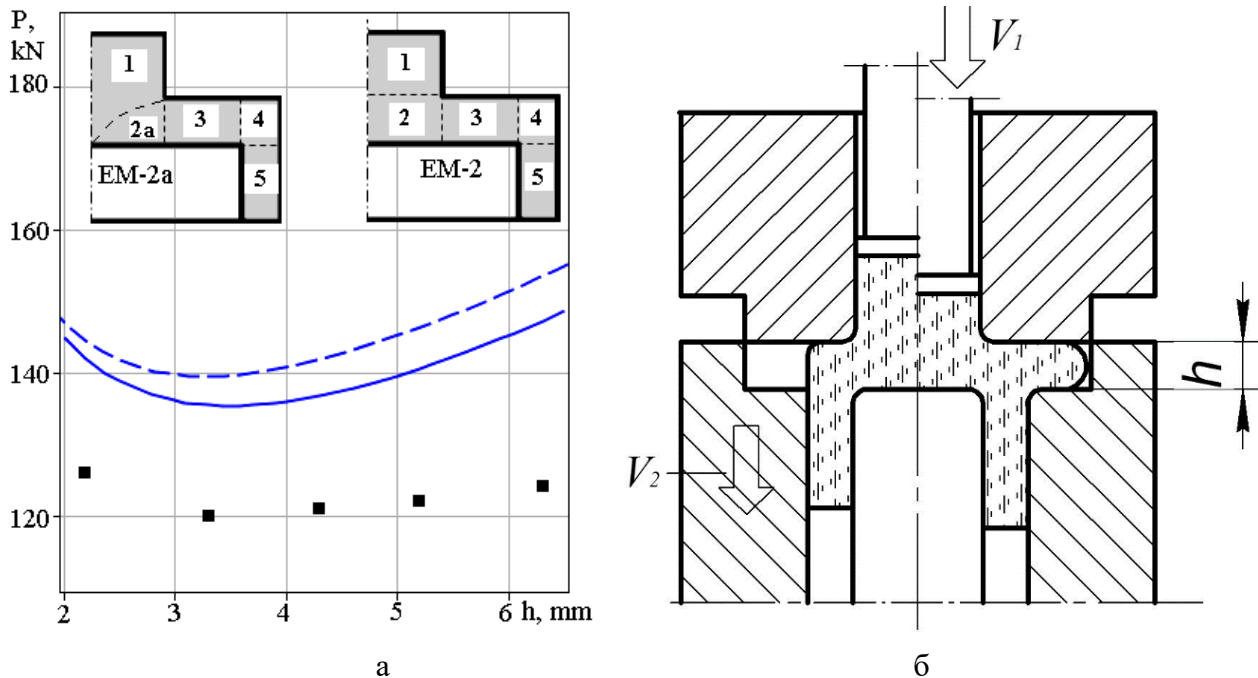


Рис. 2. Процес комбіновано радіально-прямого видавлювання:

а – порівняння теоретичних та експериментальних даних для першого етапу;
б – спосіб комбінованого видавлювання порожнистих деталей [10]

Як було зазначено раніше, важливим етапом проектування процесів комбінованого видавлювання з декількома степенями свободи течії металу є попередня оцінка відповідності приростів напівфабрикату необхідним розмірам. Саме можливості отримання даних щодо поетапного формоутворення деталі та прийомами його управління (корекції) є визначальними з точки зору можливостей обраного процесу комбінованого видавлювання.

Дослідження процесу комбінованого радіально-зворотного видавлювання із наявністю об'єднаного або роз'єданого осередків деформації та можливим дефектоутворенням у вигляді утягнення в донній частині проведено у роботах [11]. На основі даних досліджень розроблено рекомендації щодо використання розрахункових схем із різним комплексом кінематичних модулів відповідно до геометричних співвідношень процесу.

На основі проведених досліджень розроблено програмний модуль в середовищі розробки Delphi Community Edition для моделювання процесу комбінованого радіально-зворотного видавлювання порожнистих деталей з фланцем. На етапі побудови розрахункової схеми є можливість вибору межі кінематичного модуля 1 та перевірки доцільності вибору об'єднаного осередку деформації із урахуванням рекомендацій щодо початкової висоти заготовки (рис. 3, а). Цей програмний продукт дозволяє отримати дані щодо зміння швидкості витікання металу в вертикальному напрямку (формування стінки стакану), приростів напівфабрикату та величини приведенного тиску деформування (рис. 3, б). Після введення даних розрахункової схеми, можливим є порівняння величини приведенного тиску деформування за різних меж модуля 1. Рациональною вважається розрахункова схема із меншим значенням приведенного тиску деформування.

4. Jafarzadeh H., Zadshakoyan M., Sobbouhi E. Abdi. Numerical studies of some important design factors in radial-forward extrusion process. *Materials and Manufacturing Processes*. 2010, 25, pp. 857–863. DOI: <https://doi.org/10.1080/10426910903536741>
5. 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)
6. Степанский Л. Г. Расчеты процессов обработки металлов давлением. Москва: Машиностроение. 1979. 215 с.
7. Чудаков П. Д. О вычислении мощности пластической деформации. *Известия вузов. Машиностроение*. 1979. 7. С. 146–148.
8. Алиева Л.И., Грудкина Н.С. Особенности проектирования процессов холодного выдавливания на основе развития модульного подхода в рамках энергетического метода. *Вісник НТУ «ХПИ»*. Харьков: НТУ "ХПИ". 2015. 24 (1133). С. 21–32.
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. Пат. 138662 Україна, В21К 21/00, Спосіб комбінованого видавлювання порожнистих деталей. Алиева Л.И., Алиев И.С., Грудкина Н.С., Левченко В.М., Малій Х.В. 2019.
11. Hrudkina N., Aliieva L., Markov O., Marchenko I., Shapoval A., Abhari P., Kordenko M. Predicting the shape formation of hollow parts with a flange in the process of combined radial-reverse extrusion. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020, 4/1 (106), pp. 55-62. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203988>

REFERENCES

1. 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
2. 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>
3. 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>
4. Jafarzadeh H., Zadshakoyan M., Sobbouhi E. Abdi. Numerical studies of some important design factors in radial-forward extrusion process. *Materials and Manufacturing Processes*. 2010, 25, pp. 857–863. DOI: <https://doi.org/10.1080/10426910903536741>
5. 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)
6. Stepankiy L.G. Calculations of metal forming processes. Moscow: Mechanical Engineering. 1979, 215 p. (in Russian).
7. Chudakov P.D. About calculating the power of plastic deformation. Proceedings of universities. Mechanical engineering. 1979, 7, pp. 146–148. (in Russian).
8. Aliieva L.I., Grudkina N.S. The design features of cold forging process based on development modular approach in the upper bound method. *Bulletin of NTU "KhPI"*. Kharkov. 2015, 24 (1133), pp. 21–32. (in Russian).
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. Пат. 138662 Ukraine. B21K 21/00, The method of combined extrusion of hollow parts. Aliieva L.I., Aliiev I.S., Grudkina N.S., Levchenko V.M., Malii Kh.V. 2019.
11. Hrudkina N., Aliieva L., Markov O., Marchenko I., Shapoval A., Abhari P., Kordenko M. Predicting the shape formation of hollow parts with a flange in the process of combined radial-reverse extrusion. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020, 4/1 (106), pp. 55-62. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203988>

Грудкіна Н. С. – канд. техн. наук, докторант ДДМА;

E-mail: vm.grudkina@ukr.net

Алієва Л. І. – д-р техн. наук, доцент ДДМА;

E-mail: Leyliali2017@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-5283-925X>

Малій Х. В. – канд. техн. наук, ст. викл. ДДМА;

E-mail: kristina.v.goncharuk@gmail.com;

<https://orcid.org/0000-0002-9046-4268>

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ.

Стаття надійшла до редакції 11.03.2019 р.