

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ РАДІАЛЬНО-ПОЗДОВЖНЬОГО ВИДАВЛЮВАННЯ
З ВИКОРИСТАННЯМ ТРАПЕЦЕЇДАЛЬНИХ КІНЕМАТИЧНИХ МОДУЛІВ****Н. С. Грудкіна**

Донбаська державна машинобудівна академія

вул. Академічна, 72, м. Краматорськ, 84313, Україна. E-mail: vm.grudkina@ukr.net

З метою дослідження раціональності застосування та особливостей вбудовуваності в загальні розрахункові схеми процесів радіально-поздовжнього видавлювання запропоновано кінематичні модулі трапецеїдальної форми 2b та 2c. Отримано величини приведенного тиску деформування двох розрахункових схем із трапецеїдальними модулями різної форми та кінематично можливими полями швидкостей. Проведено порівняльний аналіз отриманих величин для запропонованих схем і для найуживанішого випадку розбиття на кінематичні модулі прямокутної форми. Виявлено нераціональність використання розрахункової схеми із трапецеїдальним модулем 2b з нульовою вертикальною складовою, що пояснюється невдалим вибором кінематично можливого поля швидкостей всередині модуля. Для комбінації із трапецеїдальним модулем 2c із ненульовою вертикальною складовою оптимізація приведення тиску деформування можлива за двома параметрами, що визначають розміри та форму модулів. Використання комбінації із трапецеїдальним модулем 2c замість випадку розбиття на кінематичні модулі прямокутної форми є раціональним за будь-яких співвідношень процесу. Завдяки цьому вдається досягти зменшення прогнозованої величини приведенного тиску деформування до 7-10%. Отримані результати сприятимуть розробці ефективних розрахункових схем для моделювання процесів із використанням кінематичних модулів складної конфігурації, що відображають течію метала, та розробці відповідних технологічних рекомендацій.

Ключові слова: комбіноване радіально-поздовжнє видавлювання; математичне моделювання; приведений тиск деформування.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАДИАЛЬНО-ПРОДОЛЬНОГО
ВИДАВЛИВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРАПЕЦЕИДАЛЬНЫХ КИНЕМАТИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ****Н. С. Грудкина**

Донбасская государственная машиностроительная академия

ул. Академическая, 72, г. Краматорск, 84313, Украина. E-mail: vm.grudkina@ukr.net

С целью исследования рациональности применения и особенностей встраиваемости в общие расчетные схемы процессов радиально-продольного выдавливания предложены кинематические модули трапецеидальной формы 2b и 2c. Получены величины приведенного давления деформирования двух расчетных схем с трапецеидальными модулями различной формы и кинематически возможными полями скоростей. Проведен сравнительный анализ полученных величин для предложенных схем и для наиболее используемого случая разбиения на кинематические модули прямоугольной формы. Выявлена нерациональность использования расчетной схемы с трапецеидальным модулем 2b с нулевой вертикальной составляющей, что объясняется неудачным выбором кинематически возможного поля скоростей внутри модуля. Для комбинации с трапецеидальным модулем 2c с ненулевой вертикальной составляющей оптимизация приведенного давления деформирования возможна по двум параметрам, определяющим размеры и форму модулей. Использование комбинации с трапецеидальным модулем 2c вместо случая разбиения на кинематические модули прямоугольной формы является рациональным при любых соотношениях процесса. Благодаря этому удастся достичь уменьшения прогнозируемой величины приведенного давления деформирования до 7-10%. Полученные результаты будут способствовать разработке эффективных расчетных схем для моделирования процессов с использованием кинематических модулей сложной конфигурации, отражающие течение металла, и разработке соответствующих технологических рекомендаций.

Ключевые слова: комбинированное радиально-продольное выдавливание; математическое моделирование; приведенное давление деформирования.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Розвиток галузей машинобудування нерозривно пов'язаний з освоєнням нових ресурсозберігаючих технологій, що забезпечують виготовлення високоякісної продукції [1–4]. У зв'язку з цим на першій план виходять ефективні методи обробки металів тиском, такі як процеси холодного об'ємного штампування (ХОШ) видавлюванням, що дозволяють отримувати заготовки з точними розмірами і високою якістю поверхні [1, 5–11]. Перспективи розвитку процесів ХОШ пов'язані з розробкою і освоєнням процесів комбінованого (суміщеного або послідовного) видавлювання [1, 5]. Поєднання радіального і поздовжнього видавлювання вказує на розширення технологічних мож-

ливостей процесу за рахунок забезпечення високої складності одержуваних деталей і зниження енергосилових параметрів [7, 8]. Однак для процесів комбінованого видавлювання з декількома ступенями свободи течії металу, що проходять в саморегульованому режимі, необхідно є попередня оцінка формоутворення напівфабрикату [9–11]. В цьому контексті потребують вирішення проблеми, пов'язані з визначенням оптимального кінематичного параметра (швидкості витікання металу) і отримання величини приведенного тиску деформування в аналітичному вигляді.

Слід зазначити, що на даний час аналіз деформаційних та силових режимів та особливостей формо-

утворення виконано переважно на основі скінченно-елементного моделювання та експериментально. Ряд робіт вказує на перспективність використання енергетичного методу як ефективного теоретичного методу дослідження процесів комбінованого видавлювання [12–14]. Ключовим етапом застосування методу балансу потужностей є визначення комплексу елементарних кінематичних модулів, що складають розрахункову схему процесу. При цьому важливим етапом є підбір функцій, що описують межі розподілу течії металу (суміжних зон) та кінематично можливе поле швидкості (КМПШ) всередині обраних кінематичних модулів [12]. Використання інструментів спрощення складових енергетичного рівняння дозволяє отримати приведені тиск деформування у аналітичному вигляді для подальшої оптимізації за геометричними чи кінематичними параметрами процесу. Розробка нових трикутних та трапецеїдальних модулів з криволінійними границями є необхідною, щоб описати складний перебіг металу всередині заготовки та границі межування заготовки та інструменту [13, 14].

Таким чином, для процесів холодного видавлювання актуальними задачами є розширення бази уніфікованих кінематичних модулів складної форми та аналіз раціональності їх використання у загальних розрахункових схемах.

Мета роботи – удосконалення технологій процесів холодного видавлювання на основі розробки ефективних розрахункових схем моделювання процесів із використанням трапецеїдальних кінематичних модулів.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. В рамках використання енергетичного методу актуальною на даний час є розробка кінематичних модулів складної форми із криволінійною межею, що моделюють течію металу всередині заготовки чи на поверхні контакту заготовки та інструменту. До процесів, у розрахункових схемах яких є необхідність використання кінематичних модулів складної конфігурації (трикутних чи трапецеїдальних, із заокругленням), можна віднести практично всі процеси комбінованого суміщеного або послідовного радіально-повздожнього видавлювання. При цьому можлива побудова величезного числа різних наборів кінематичних модулів з різними КМПШ. Найбільш ефективною та раціональною із побудованих вважається розрахункова схема, якій відповідає мінімальна величиною приведеного тиску деформування.

Для розрахункових схем комбінованого видавлювання із наявністю суміщеного або роз'єданого осередків деформації можливим є використання результатів одного з автономних осередків деформації, розглянутих раніше. Наявність широкого кола процесів видавлювання із розвинутою радіальною течією металу потребує більш глибокого аналізу з точки зору відображення особливостей течії металу в зоні розвороту до радіальної течії з наступним переходом до прямого видавлювання.

Узагальнена схема процесу послідовного радіально-прямого видавлювання з розвинутою

радіальною складовою течії металу та отримані деталі представлено на рис. 1 та 2.

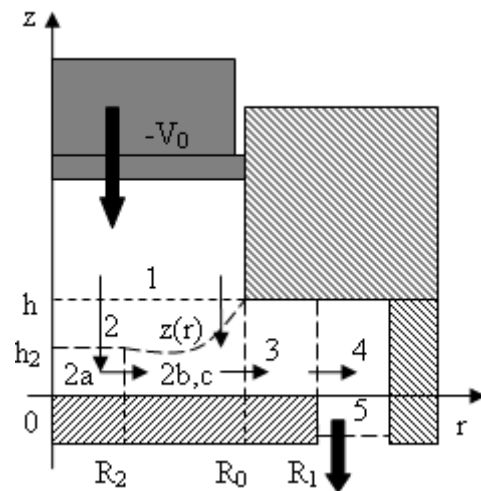


Рисунок 1 – Схема комбінованого послідовного радіально-прямого видавлювання



Рисунок 2 – Деталі, отримані комбінованим послідовним радіально-прямим видавлюванням

КМПШ для запропонованих комплексів кінематичних модулів розрахункової схеми наведено у таблиці 1. При цьому для кінематичних модулів найпростішої прямокутної форми (рис. 1, а - модулі 1, 2а, 3, 4, 5) відомі вирази потужності сил деформування, тертя і зрізу на поверхні контакту із суміжними кінематичними модулями. При використанні кінематичних модулів більш складної форми можливо ускладнення математичного апарату розрахунку складових основного рівняння енергетичного балансу. Однак з іншого боку використання саме криволінійних кінематичних модулів дозволяє оптимізувати величину приведеного тиску за параметрами, що визначають форму кривої або розміри кінематичного модуля. Це свідчить про перспективність розробки нових кінематичних модулів складної форми і необхідність вироблення рекомендацій щодо раціональності їх використання замість найуживаніших прямокутних модулів.

Для запропонованої розрахункової схеми (рис. 1) найбільш примітивне розбиття відповідає комплексу модулів 1-2-3, при цьому можливість оптимізації за якимось параметром відсутня. З іншого боку можливе подання зони кінематичного модуля 2 у вигляді комплексу модулів 2а-2б (з можливою оптимізацією за параметром R_2) або 2а-2с (за параметрами R_2 і α). Дані кінематичні трапецеїдальні модулі 2б і 2с є досить зручними в подальших розрахунках. Це

забезпечується наборами відповідних найпростіших КМПШ і формою похилої кривої (табл. 1, модулі 2b та 2c). Аналіз можливості оптимізації за обраними параметрами дозволить вирішити питання раціональності такого розбиття на комбінації 1-2a-2b-3 або 1-2a-2c-3 замість 1-2-3.

Таблиця 1 – КМПШ кінематичного модуля

1: $\begin{cases} V_{z1} = -V_0, \\ V_{r1} = 0. \end{cases}$	2b: $\begin{cases} V_{z2b} = 0, \\ V_{z2b} = \frac{V_0 R_0^2}{2hr}, \end{cases}$
2: $\begin{cases} V_{z2} = -\frac{V_0}{h} z, \\ V_{z2} = \frac{V_0}{2h} r. \end{cases}$	де $h_{2b} = \frac{R_2^2}{R_0^2} h,$ $z(r) = \frac{h}{R_0^2} r^2.$
2a: $\begin{cases} V_{z2a} = -\frac{V_0}{h_2} z, \\ V_{z2a} = \frac{V_0}{2h_2} r. \end{cases}$	2c: $\begin{cases} V_{z2c} = -\frac{\alpha V_0}{h} z, \\ V_{z2c} = \frac{V_0 [R_0^2(1-\alpha) + \alpha r^2]}{2hr}, \end{cases}$
3: $\begin{cases} V_{z3} = 0, \\ V_{z3} = \frac{V_0 R_0^2}{2hr}. \end{cases}$	де $h_{2c} = \frac{R_2^2 h}{R_0^2(1-\alpha) + \alpha R_2^2},$ $z(r) = \frac{hr^2}{R_0^2(1-\alpha) + \alpha r^2}.$

Для проведення такого аналізу досить розглянути величини приведенного тиску, що враховують потужності сил деформування всередині модулів 2a, 2b (або 2c), потужностей сил зрізу кінематичних модулів 1-2a, 1-2b (або 1-2c), 2a-2b (або 2a-2c), 2b-3 (або 2c-3), потужності сил тертя 2b-0 (або 2c-0). При цьому слід враховувати можливості виродження зони 2a (при $R_2 = 0$), що відповідає, наприклад, виродженню трапецеїдального кінематичного модуля 2c в трикутний з тим самим КМПШ.

Використовуючи відносні геометричні параметри процесу $\bar{R}_0 = 1$ та $\bar{h} = h/R_0$, отримаємо величину приведенного тиску деформування для комплексу 1-2-3 із урахуванням повної величини потужності сил деформування, тертя та зрізу між модулями 1-2 та 2-3:

$$\bar{p}_2 = 1 + \frac{\bar{h}}{\sqrt{3}} + (1 + 2\mu_s) \frac{1}{3\sqrt{3}\bar{h}}. \quad (1)$$

Використовуючи відносні геометричні параметри процесу $\bar{R}_0 = 1$, $\bar{h} = h/R_0$, $\bar{h}_{2b} = h_{2b}/R_0$ та $\bar{R}_2 = R_2/R_0$ отримаємо величину приведенного тиску деформування для комплексу 1-2a-2b-3 із урахуванням повної величини потужності сил деформування у зонах 2a та 2b, тертя та зрізу між модулями 1-2a, 1-2b, 2a-2b та 2b-3:

$$\bar{p}_{2b} = \left[\frac{1 + (\sqrt{3}-1)\bar{R}_2^2}{\sqrt{3}} + \frac{2\mu_s(1-\bar{R}_2)}{\sqrt{3}\bar{h}} + \frac{1}{\sqrt{3}\bar{h}} \left(1 - \bar{R}_2 + \frac{4\bar{h}^2}{3} (1 - \bar{R}_2^3) \right) + (1 + 2\mu_s) \frac{\bar{R}_2}{3\sqrt{3}\bar{h}} + \frac{\bar{R}_2^3 \bar{h}}{\sqrt{3}} \right]. \quad (2)$$

Для величини \bar{p}_2 оптимізацію не застосовуємо, для \bar{p}_{2b} у якості параметра оптимізації за визначених \bar{h} можна розглядати величину $\bar{R}_2 \in [0, 1]$. Проаналізуємо доцільність такої оптимізації (рис. 3).

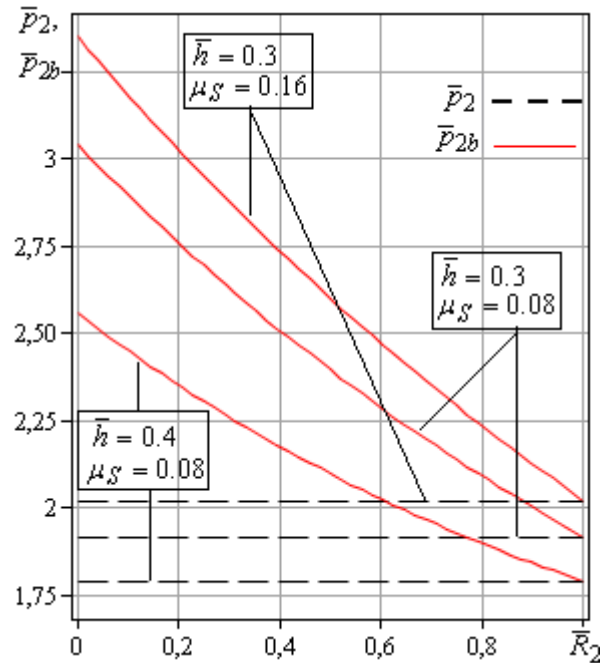


Рисунок 3 – Порівняльний аналіз приведених тисків деформування \bar{p}_2 та \bar{p}_{2b}

Незважаючи на можливість оптимізації за параметром \bar{R}_2 за будь-яких значень відносної товщини фланцевої зони для характерних для холодного видавлювання умов тертя характер кривих однотипний \bar{p}_{2b} (спадання на всьому проміжку $[0, 1]$ без наявності точки мінімуму). Тому більш ефективним слід вважати використання прямокутного модуля 2 замість комплексу 2a-2b згідно із нижчими значеннями величини приведенного тиску деформування \bar{p}_2 у порівнянні із \bar{p}_{2b} . При граничному значенні $\bar{R}_2 = 1$ маємо рівність величин $\bar{p}_2(\bar{R}_2) = \bar{p}_{2b}(\bar{R}_2)$, що відповідає виродженню модуля 2b. Це вказує на нерациональність використання комплексу модулів 1-2a-2b-3 замість 1-2-3 для даної розрахункової схеми. Такий факт пояснюється невідповідністю обраного КМПШ модуля 2b із відсутньою (нульовою) вертикальною складовою V_{z2b} , що

описує одномоментний перехід від прямого видавлювання до радіального в зоні 2b та не відповідає дійсності. Запишемо потужності сил деформування у зонах 2a та 2c, тертя та зрізу між модулями 1-2a, 1-2c, 2a-2c та 2c-3:

$$N_{d2a} = \pi \sigma_s V_0 R_2^2; \quad (3)$$

$$N_{c1-2a} = \frac{\pi \sigma_s R_2^3 V_0}{3\sqrt{3}h_{2c}}; \quad (4)$$

$$N_{c2a-2c} = \frac{\pi \sigma_s R_2 h_{2c} V_0}{\sqrt{3}} \left(1 - \alpha \frac{h_{2c}}{h}\right); \quad (5)$$

$$N_{c2c-3} = \frac{\pi \sigma_s \alpha R_0 h V_0}{\sqrt{3}}; \quad (6)$$

$$N_{t2a} = \frac{2\pi \sigma_s \mu_s R_2^3 V_0}{3\sqrt{3}h_{2c}}; \quad (7)$$

$$N_{d2b} = \frac{2\pi \sigma_s V_0 A}{\alpha} \left[\frac{1}{B_1^2 - 1} - \frac{1}{B_2^2 - 1} + \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \left| \frac{(1+B_1)(1-B_2)}{(1+B_2)(1-B_1)} \right| + \ln \left| \frac{(\sqrt{3}B_2 + 1)(B_1 - \sqrt{3})}{(\sqrt{3}B_1 + 1)(B_2 - \sqrt{3})} \right| \right]; \quad (8)$$

$$N_{t2c} = \frac{2\pi \sigma_s \mu_s V_0}{\sqrt{3}h} \left(R_0^2 (1-\alpha)(R_0 - R_2) + \alpha \frac{R_0^3 - R_2^3}{3} \right); \quad (9)$$

$$N_{c1-2c} = \frac{\pi \sigma_s h_{2c} V_0}{\sqrt{3}} \times \left[\frac{4h^2 R_0^4 (1-\alpha)^2}{\alpha^3} \times \left[\frac{\alpha^2 R_2}{4C^2} - \frac{\alpha^2}{4R_0^3} - \frac{\alpha^2 R_2}{8R_0^2 C} + \frac{\alpha^2}{8(1-\alpha)R_0^3} + \frac{\arctg D}{8R_0^3 D^3} - \frac{1}{8R_0^3 D^3} \arctg \left(\frac{R_2}{R_0} D \right) \right] + R_0^2 (1-\alpha)(R_0 - R_2) + \alpha \frac{R_0^3 - R_2^3}{3} \right]; \quad (10)$$

де $A = \frac{R_0^2 (1-\alpha)}{\sqrt{3}}; B_2 = \frac{\sqrt{(1-\alpha)^2 + 3\alpha^2} + \alpha - 1}{\alpha\sqrt{3}};$

$$B_1 = \frac{\sqrt{R_0^4 (1-\alpha)^2 + 3\alpha^2 R_2^4} - R_0^2 (1-\alpha)}{\alpha\sqrt{3}R_2^2};$$

$$C = R_0^2 (1-\alpha) + \alpha R_2^2; D = \sqrt{\frac{\alpha}{1-\alpha}}.$$

Отримаємо величину приведенного тиску деформування для комплексу 1-2a-2c-3 із урахуванням (3)-(9):

$$\bar{p}_{2c}(R_2, \alpha) = \frac{\sum N_d + \sum N_c + \sum N_t}{\pi \sigma_s V_0 R_0^2}. \quad (11)$$

Величина приведенного тиску деформування може бути оптимізована у відносних величинах за параметрами $\bar{R}_2 \in [0, 1]$ та $\alpha \in (0, 1)$, що визначає форму похилої межі модуля 2c. Порівняльний аналіз величин \bar{p}_2 та $\bar{p}_{2c}(R_2, \alpha)$ для наочності представимо у вигляді перерізів поверхонь $\bar{p}_{2c}(R_2, \alpha)$ кривими $\bar{p}_{2c}(R_2)_{\alpha=const}$ (рис. 4).

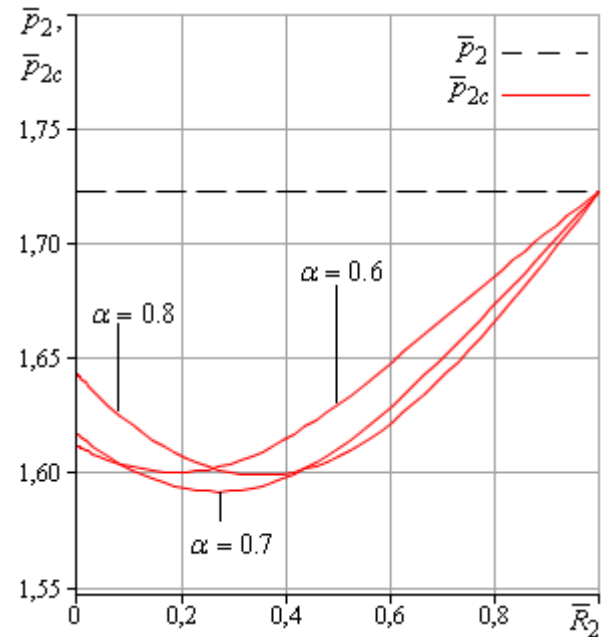


Рисунок 4 – Порівняльний аналіз приведених тисків деформування \bar{p}_2 та \bar{p}_{2c} при $\bar{h} = 0.7, \mu_s = 0.08$

Для будь-яких співвідношень процесу деформування функція $\bar{p}_{2c}(R_2)_{\alpha=const}$ має мінімум, що відповідає меншому значенню приведенного тиску деформування в порівнянні із \bar{p}_2 (розбиттям із прямокутним модулем). Це пов'язане із можливістю оптимізації за формою межі $z(r)$ та розмірами модулів 2a та 2c.

Таким чином, заміна прямокутного кінематичного модуля 2 на сукупність 2a-2c із кінематичним трапецеїдальним модулем із ненульовою вертикальною складовою КМПШ є раціональною за будь-яких співвідношень процесу деформування. Завдяки цьому зменшення прогнозованої величини приведенного тиску за схемою 1-2a-2c-3 по відношенню до 1-2-3 може сягати до 7-10%. Отримані результати сприятимуть розробці ефективних розрахункових схем для моделювання процесів із використанням кінематичних модулів складної конфігурації, що відображають течію металу та розробці відповідних технологічних рекомендацій.

ВИСНОВКИ. У якості альтернативи елементарним прямокутним кінематичним модулям розглянуто можливість використання трапецеїдальних кінематичних модулів. Отримано величини приведенного тиску деформування двох розрахункових схем 1-2a-2b-3 та 1-2a-2c-3 із трапецеїдальними модулями різної форми та кінематично можливими полями швидкостей. Проведено порівняльний аналіз отриманих величин для розроблених схем і для найпростішого розбиття 1-2-3 на кінематичні модулі прямокутної форми. Виявлено нераціональність використання розрахункової схеми 1-2a-2b-3 із трапецеїдальним модулем з нульовою вертикальною складовою. Це пояснюється невдалим вибором кінематично можливого поля швидкостей всередині модуля (одномоментний перехід від прямого видавлювання до радіального в зоні 2b, що не відповідає дійсності). Для комбінації із трапецеїдальним модулем із ненульовою вертикальною складовою 1-2a-2c-3 оптимізація приведенного тиску деформування можлива за двома параметрами, що визначають розміри та форму модулів 2a та 2c. Використання комбінації 2a-2c замість випадку розбиття на кінематичні модулі прямокутної форми є раціональним для будь-яких співвідношень процесу. Завдяки цьому вдається досягти зменшення прогнозованої величини приведенного тиску деформування до 7–10%. Отримані результати сприятимуть подальшій розробці ефективних розрахункових схем для моделювання процесів із використанням кінематичних модулів складної конфігурації, що відображають течію метала, та розробці відповідних технологічних рекомендацій.

ЛІТЕРАТУРА

1. Алиева Л. И. Совершенствование процессов комбинированного выдавливания: монография. Краматорск: ООО «Тираж - 51», 2018. 352 с. ISBN 978-966-379-84.
2. Dragobetskii V., Zagirnyak V., Shlyk S., Shapoval A., Naumova O. Application of explosion treatment methods for production items of powder materials. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2019. Vol. 5 (95). pp. 5(95), 39-42. DOI: 10.15199/48.2019.05.10.
3. Markov O., Gerasimenko O., Aliieva L., Shapoval A. Development of the metal rheology model of high-temperature deformation for modeling by finite element method. *EUREKA: Physics and Engineering*, 2019, No. 2, pp. 52–60, doi: 10.21303/2461-4262.2019.00877.
4. Anishchenko O. S., Kukhar V. V., Grushko A. V., Vishtak I. V., Prysiashnyi A. H., Balalayeva E. Yu.

Analysis of the Sheet Shell's Curvature with Lamé's Superellipse Method during Superplastic Forming. *Materials Science Forum*, No. 945. pp. 531–537, 2019, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.945.531.

5. Bhaduri A. Extrusion. In: *Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys. Springer Series in Materials Science*, 2018, Vol. 264, pp. 599-646. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7209-3_13.

6. Perig, A. V. and Matveyev, I. A.: FEM-Based Deformation Regression Analysis of ECAE Strains, *FME Transactions*, Vol. 47, No. 4, pp. 851-855, 2019, doi:10.5937/fmet1904851P.

7. Jamali S. S., Faraji G., Abrinia K. Hydrostatic radial forward tube extrusion as a new plastic deformation method for producing seamless tubes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. January 2017, Vol. 88, Is. 1–4, pp. 291–301. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8754-6>.

8. Алиева Л. И., Картамышев Д. А., Грудкина Н. С., Чучин О. В. Технологические процессы изготовления полых деталей на основе способов комбинированного выдавливания. *Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов. Краматорск: ДГМА, 2018, № 1 (46). С. 22-28.*

9. Jafarzadeh H., Zadshakoyan M., Abdi Sobbouhi E. Numerical studies of some important design factors in radial-forward extrusion process. *Materials and Manufacturing Processes*, 2010, No. 25, pp. 857–863.

10. Seo J. M. et al. Forming Load Characteristics of Forward and Backward Tube Extrusion Process in Combined Operation. *Key Engineering Materials*, 2007, Vol. 340-341, pp. 649-654.

11. 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, Vol. 21, No.6, pp. 1091–1100. doi: 10.1007/s12540-015-5276-y.

12. Шестаков Н.А. Энергетические методы расчета процессов обработки металлов давлением: Учебное пособие. -М.:МГИУ, 1998. 125 с.

13. Hrudkina N., Aliieva L., Abhari P., Markov O., Sukhovirskaya L. Investigating the process of shrinkage depression formation at the combined radial-backward extrusion of parts with a flange. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 2, N 5/1 (101), P. 49–57. <https://doi:10.15587/1729-4061.2019.179232>.

14. Hrudkina Natalia S., Aliieva Leila I. Modeling of cold extrusion processes using kinematic trapezoidal modules. *FME Transactions*. 2020, Vol. 48, No. 2, pp. 357-363. doi:10.5937/fme2002357H.

MATHEMATICAL MODELLING OF RADIAL LONGITUDINAL EXTRUSION PROCESS BY USING TRAPEZOIDAL KINEMATIC MODULES

N. Hrudkina

Donbass State Engineering Academy

vul. Akademichna, 72, Kratomorsk, 84313, Ukraine. E-mail: vm.grudkina@ukr.net

Purpose. Improvement of technologies for cold extrusion processes based on the development of effective calculation schemes for modeling processes by using trapezoidal kinematic modules. **Methodology.** Based on the prospects of introducing longitudinal-transverse extrusion processes in manufacturing the need to expand the capabilities of the energy method for modeling these processes to assess the power regime is considered. To describe the complex nature of

metal flow into the flange zone and the possibility of subsequent optimization in the reduced pressure value there is a need to develop a complex of trapezoidal kinematic modules. As an alternative to using the simplest rectangular modules trapezoidal 2b and 2c with a different shape of the boundary and kinematically possible velocity fields is proposed. The values of the reduced deformation pressure in two calculation schemes with the proposed trapezoidal modules, taking into account the presence of adjacent kinematic modules are determined. **Results.** A comparative analysis of the reduced pressure values for scheme with modules 2b and 2c for the most used partitioning case for kinematic modules of rectangular shape is considered. Irrational use of the design scheme with trapezoidal module 2b with zero vertical component that is explained by the unfortunate choice of the kinematically possible velocity field inside the module is defined. For combination with trapezoidal module, 2c with a nonzero vertical component optimization of the reduced deformation pressure is possible by two parameters determining the size and shape of the modules. Using a combination with a trapezoidal module 2c instead of the case of partition into kinematic modules of rectangular shape is determined in rational for any process ratio. **Originality.** As a result, the value of the reduced pressure in the developed scheme with trapezoidal module 2c to recommend for use in general design schemes in radial-longitudinal extrusion is considered. Due to this, it is possible to achieve a decrease in the predicted value of the reduced deformation pressure to 7–10%. **Practical.** The results obtained will contribute to determine an adequate assessment of the power modes in the radial-longitudinal extrusion processes and their wider implementation in manufacturing.

Key words: combined radial longitudinal extrusion; mathematical modeling; reduced deformation pressure

REFERENCES

1. Alieva, L. I. (2018), *Sovershenstvovanie protsessov kombinirovannogo vyidavlivaniya: monografiya*. Kramatorsk: OOO «Tirazh - 51», 352 P. ISBN 978-966-379-84.
2. Dragobetskii, V., Zagirnyak, V., Shlyk, S., Shapoval, A., Naumova, O. (2019), Application of explosion treatment methods for production items of powder materials, *Przeglad Elektrotechniczny*, vol. 5 (95), pp. 5(95), 39-42. DOI: 10.15199/48.2019.05.10.
3. Markov, O., Gerasimenko, O., Aliieva, L., Shapoval, A. (2019), Development of the metal rheology model of high-temperature deformation for modeling by finite element method, *EUREKA: Physics and Engineering*, No. 2, pp. 52–60. doi: 10.21303/2461-4262.2019.00877.
4. Anishchenko, O.S., Kukhar, V.V., Grushko, A.V., Vishtak, I.V., Prysiazhnyi, A.H., Balalayeva, E.Yu. (2019), Analysis of the Sheet Shell's Curvature with Lamé's Superellipse Method during Superplastic Forming, *Materials Science Forum*, No. 945, pp. 531–537, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.945.531.
5. Bhaduri, A. (2018), Extrusion. In: *Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys, Springer Series in Materials Science*, vol. 264, pp. 599-646. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7209-3_13.
6. Perig, A. V. and Matveyev, I. A. (2019), FEM-Based Deformation Regression Analysis of ECAE Strains, *FME Transactions*, vol. 47, No. 4, pp. 851-855, doi:10.5937/fmet1904851P.
7. Jamali, S. S., Faraji, G., Abrinia, K. (2017), Hydrostatic radial forward tube extrusion as a new plastic deformation method for producing seamless tubes, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 88, Iss. 1–4, pp. 291–301. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8754-6>.
8. Alieva, L. I., Kartamyshev, D.A., Grudkina, N.S., Chuchin, O.V. (2018), “Texnologicheskie processy izgotovleniya polyx detalej na osnove sposobov kombinirovannogo vydavlivaniya” [Technical processes of manufacturing of parts based on the methods of combined production], *Obrabotka metallov davleniem. Sbornik nauchnyh trudov*, Kramatorsk: DGMA, No 1 (46), pp. 22–28.
9. Jafarzadeh H., Zadshakoyan M., Abdi Sobbouhi E. (2010), Numerical studies of some important design factors in radial-forward extrusion process. *Materials and Manufacturing Processes*, No. 25, pp. 857–863.
10. Seo, J. M. (2007), Forming Load Characteristics of Forward and Backward Tube Extrusion Process in Combined Operation, *Key Engineering Materials*, vol. 340-341, pp. 649-654.
11. Noh, J., Hwang, B.B., Le, 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*, vol. 21, № 6, pp. 1091–1100. doi: 10.1007/s12540-015-5276-y.
12. Shestakov, N.A. (1998). Energeticheskie metodyi rascheta protsessov obrabotki metallov davleniem: Uchebnoe posobie. -M.:MGIU, 125 P.
13. Hrudkina, N., Aliieva, L., Abhari, P., Markov, O., Sukhovirska, L. (2019), Investigating the process of shrinkage depression formation at the combined radial-backward extrusion of parts with a flange. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2019, vol. 2, N 5/1 (101), pp. 49–57. <https://doi:10.15587/1729-4061.2019.179232>.
14. Hrudkina, Natalia S., Aliieva, Leila I. (2020), Modeling of cold extrusion processes using kinematic trapezoidal modules, *FME Transactions*, vol. 48, No. 2, pp. 357-363. doi:10.5937/fme2002357H.

Стаття надійшла 06.07.2020.