

**Швець Л. В.**

к.т.н., доцент

Труханська О. О.

к.т.н., доцент

**Вінницький національний
аграрний університет****Shvets L.**

Ph.D., Associate Professor

Trukhanska O.

Ph.D., Associate Professor

**Vinnitsia National Agrarian
University****УДК 621.7.014.2****DOI: 10.37128/2306-8744-2022-2-11****ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ
ДОСЛІДЖЕННЯ ВАЛЬЦЮВАННЯ
ЗАГОТОВОК З АЛЮМІНІЄВИХ
СПЛАВІВ В УМОВАХ
ІЗОТЕРМІЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ**

Деформація металу в умовах ізотермічного і наближеного до нього деформування характеризується збільшенням пластичності в порівнянні з пластичністю при обробці в холодному інструменті. Це пояснюється меншою швидкістю деформації, нижня межа якої обмежена тільки продуктивністю процесу. В результаті збільшується час «заповнення дефектів», що виникають при деформації металу, зменшується температурна напруга в об'ємі заготовки, деформація стає більш рівномірною. В роботі розроблена методика проведення експериментальних досліджень, яка охоплює розширений діапазон завдань для визначення технологічних параметрів вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів в умовах ізотермічного і наближеного до нього деформування.

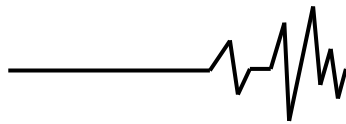
Для визначення технологічних параметрів і термомеханічних характеристик запропонована установка для вальцювання заготовок в умовах ізотермічного і наближеного до нього деформування. В цілях забезпечення жорсткості вальців і збереження постійної міжцентрової відстані в процесі деформації, установка виконана за типом двоопорних кувальних вальців. Для підтримки температури заготовки і нагріву робочого інструменту (вальцювальних штампів, безпосередньо встановлених на вальцях) установка забезпечена нагрівальним пристроєм, встановленим з тильного боку.

На підставі аналізу результатів експериментальних досліджень визначені оптимальні технологічні параметри вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів при змінних температурах, швидкостях, ступенях деформації і освоєнні технологічного процесу. Запропоновані технологічні рекомендації для розрахунку калібрів і розроблено технічне завдання на промисловий зразок обладнання для вальцювання заготовок в умовах ізотермічного і наближеного до нього деформування, включаючи роботу при традиційному вальцюванні без нагріву вальцювальних штампів.

Ключові слова: деформація, ізотермічне деформування, вальцювання, заготовка, метал, алюмінієві сплави.

Вступ. Загальними умовами при проведенні експериментів за визначенням оптимальних технологічних параметрів вальцювання заготовок в умовах ізотермічного і наближеного до нього деформування є використання для проведення експериментів марки алюмінієвих сплавів: АК6, АК4, АК4-1, АК8,

AMr1, AMr2, AMr6, AMЦ з розмірами \varnothing 14, 18, 20, 25 мм і довжиною 150 мм; використання методів тензометрування, оптичної і електронної мікроскопії, рентгенівського мікроаналізу, математичної статистики; на кожен пункт залежності технологічних параметрів від різних факторів: температур нагріву вальцювальних



штампів і заготовок, швидкості і ступеня деформації, виділяється три зразки досліджуваного сплаву, незалежно від вальцювання в гладких валках або калібрах різних систем. Перед експериментальними дослідженнями проводиться градування автоматичного потенціометра печі. Зниження температури зразка при перенесенні від печі до стану, компенсується його нагрівом до 10°C вище за температуру вальцювання [1, 2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В процесі вальцювання разом із зменшенням висоти заготовки і її подовженням (витяжкою), відбувається переміщення металу і в поперечному напрямі — розширення Δb , яке викликає в бічних кромках вальцьованої заготовки значну напругу розтягу і знижує загальну витяжку. Для визначення значень розширення при вальцюванні заготовок з алюмінієвих сплавів за традиційною технологією без нагріву вальцювальних штампів, були проведені дослідження за визначенням його залежності від ступеня деформації (обтискання), діаметру вальців, температури заготовки і ін., які рекомендуються враховувати при вальцюванні заготовок в гладких валках і умовах ізотермічної деформації [2, 3].

Так, на основі аналізу експериментальних даних, можна зробити висновок, що з підвищенням ступеня деформації, за інших рівних умов, показник розширення і відносне розширення збільшуються (рис. 1, рис. 2). Із зменшенням діаметру прутка, значення показника розширення і відносного розширення зростають. Зниження значень розширення із збільшенням діаметру заготовок можна пояснити зростанням сил тертя в поперечному напрямі, оскільки відношення ширини осередку деформації до його довжини збільшується.

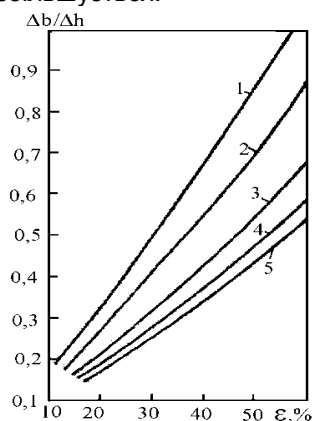


Рис. 1. Залежність показника розширення $\Delta b/\Delta h$ від ступеня обтискання при вальцюванні заготовок різного діаметру в гладких валках: 1- Ø20мм; 2- Ø30 мм; 3 - Ø50 мм; 4 - Ø60мм; 5 - Ø65 мм

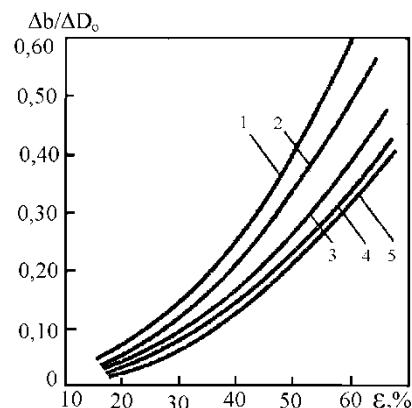


Рис. 2. Залежність відносного розширення $\Delta b/D_0$ від ступеня обтискання при вальцюванні заготовок різного діаметру в гладких валках: 1 - Ø 20 мм; 2 - Ø 30 мм; 3 - 50мм; 4 - Ø 60 мм; 5 - Ø 65 мм

Мета дослідження. Визначення оптимальних технологічних параметрів, термомеханічних характеристик вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів в умовах ізотермічного деформування.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для визначення технологічних параметрів і термомеханічних характеристик при вальцюванні заготовок в умовах ізотермічного і наближеного до нього деформування, запропонована установка (рис. 3). В цілях забезпечення жорсткості валків і збереження постійної міжцентрової відстані в процесі деформації, установка виконана за типом двоопорних кувальних вальців. Для підтримки температури заготовки і нагріву робочого інструменту (вальцювальних штампів, безпосередньо встановлених на вальцях) установка забезпечена нагрівальним пристроєм, встановленим з тильного боку [2, 4].

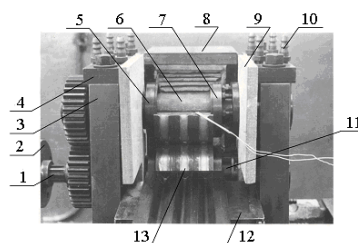


Рис. 3. Установка для вальцювання в умовах ізотермічного деформування: 1 - шліцьове з'єднання, 2 - муфта, 3 - корпус, 4 - планка, 5 - нерухома шайба, 6 - верхня опора, 7 - рухома шайба, 8 - нагрівальний пристрій, 9 - термозахисний кожух, 10 - пристрій для охолодження, 11- приводний валець, 12 - проводка, 13 - вальцювальні штампи.



Вплив діаметру валків на розширення представлений на (рис. 4), з якого видно, що розширення із збільшенням діаметру валків збільшується. Пояснюється це тим, що із зростанням діаметру валків за інших рівних умов збільшується довжина осередку деформації і, як наслідок цього, підвищуються сили тертя на контактних поверхнях, направлені до нейтрального перетину. В результаті опір переміщенню металу уздовж осі заготовки зростає і збільшується розширення.

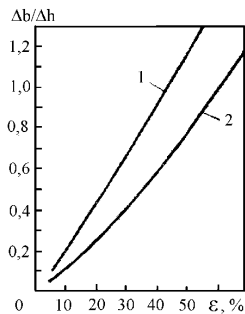


Рис. 4. Вплив діаметру валків на показник розширення $\Delta b/\Delta h$ при вальцюванні заготовок в гладких валках: 1 - діаметр валків 260 мм, частота обертання валків 26 хв^{-1} ; 2 - діаметр валків 103 мм, частота обертання валків 37 хв^{-1} .

Залежність розширення від ширини смуги, діаметру валків і відношення початкової ширини контактної поверхні до її довжини при вальцюванні з постійним обтисканням $\varepsilon = 38,5 \%$ показана на (рис. 5).

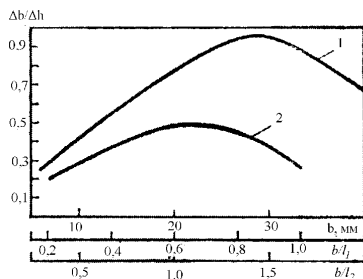


Рис. 5. Залежність показника розширення від ширини смуги, діаметру валків і відношення початкової ширини контактної поверхні до її довжини b/l і b/l_2 при вальцюванні заготовок в гладких валках: 1 - діаметр валків 260 мм, частота обертання валків 26 хв^{-1} ; 2 - діаметр валків 103 мм, частота обертання валків 37 хв^{-1} .

Криві побудовані за експериментальними даними, отриманими в процесі вальцювання зразків із сплаву АК6 (висота 22 мм, ширина 5, 10, 22, 30, 40 і 50 мм) в гладких сталевих валках діаметрами 260 і 103 мм і частотою обертання 26 і 37 хв^{-1}

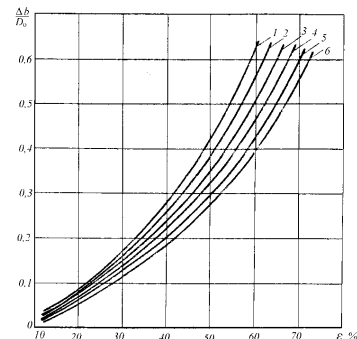
відповідно. З (рис. 5) видно, що із збільшенням ширини заготовки показник розширення підвищується до певного значення (має максимум) і з подальшим збільшенням ширини заготовки починає зменшуватися. Це характерно для розширення і пояснюється тим, що поперечні сили тертя на поверхнях контакту із збільшенням ширини заготовки все помітніше за нього стримують. Тому характер залежності показника розширення від ширини заготовки праворуч від точки максимуму визначають в основному контактні сили тертя [4].

При плоскій деформації значення лінійного розширення Δb за точкою максимуму досить швидко стабілізується і при подальшому збільшенні ширини залишається постійною.

Залежність відносного розширення від ступеня обтискання при вальцюванні заготовок різного діаметру із сплаву АК6 представлена на (рис. 6). Вальцювання заготовок проводилося при температурі 450°C на кувальних вальцях моделі С162А в гладких вальцювальних штампах з профілем, що забезпечує наростаюче обтискання [5].

Вплив температури вальцюваних заготовок на розширення показаний на (рис. 7). Залежність побудована за наслідками експериментальних даних, отриманих при вальцюванні заготовок із сплаву АК6 розміром $20 \times 30 \times 250$ мм в гладких валках, що мають діаметр 103 мм і частота обертання 37 хв^{-1} . Вальцювання проводилося з постійним ступенем обтискання $\varepsilon = 58,5 \%$ при різних температурах.

Приведені нижче графіки, побудовані за експериментальними даними впливу різних факторів на розширення при традиційному вальцюванні, допоможуть врахувати їх при розробці технологічного процесу вальцювання заготовок в гладких валках і розрахунку калібрів,



в умовах ізотермічної деформації.

Рис. 6. Залежність відносного розширення від ступеня обтискання при вальцюванні заготовок різного діаметру в гладких валках: 1 - $\varnothing 25$ мм; 2 - $\varnothing 30$ мм; 3 - $\varnothing 35$ мм; 4 - $\varnothing 40$ мм; 5 - $\varnothing 45$ мм; 6 - $\varnothing 50$ мм.

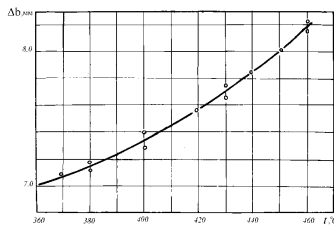


Рис. 7. Залежність розширення від температури нагріву заготовок при вальцюванні в гладких валках

Слід зазначити, що знання особливостей формозмінення алюмінієвих сплавів і точної методики для підрахунку розширення дозволило б розробити такі схеми

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = C_{\text{вн}} \left(2\sqrt{\frac{R}{\Delta h}} - \frac{1}{f} \right) \left[0,138 \left(\frac{\Delta h}{h_0} \right)^2 + 0,323 \frac{\Delta h}{h_0} \right], \quad (1)$$

де

$$C_{\text{вн}} = 1,34 \left(\frac{b_0}{\sqrt{R\Delta h}} - 0,15 \right) \ell^{0,15 - \frac{b_0}{\sqrt{R\Delta h}}},$$

ℓ - довжина осередку деформації.

$$\frac{\frac{\Delta b}{\Delta h}}{C_{\text{вн}} \left(2\sqrt{\frac{R}{\Delta h}} - \frac{1}{f} \right)} = a_1 \left(\frac{\Delta h}{h_0} \right)^2 + a_2 \left(\frac{\Delta h}{h_0} \right) + a_3. \quad (2)$$

$$\Delta b / \Delta h = C_{\text{вн}} \sqrt{R / \Delta h} - 1 / f \left[5,64 \left(\Delta h / h_0 \right)^2 - 3,31 \left(\Delta h / h_0 \right) + 0,7 \right] \quad (3)$$

де

$$C_{\text{вн}} = 1,34 \left(\frac{b_0}{\sqrt{R\Delta h}} - 0,15 \right) \ell^{0,15 - \frac{b_0}{\sqrt{R\Delta h}}}.$$

Після проведення перевірного розрахунку по формулі (3) було виявлено, що розбіжність розрахункового і експериментального значень відносного розширення залежно від обтискання для заготовок, круглого перетину з алюмінієвого сплаву АК6 діаметрами 20 - 40мм не перевищує 4%. Погрішність виміру і розрахунку розширення після вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів АК4, АК4 - 1, АК8, АМг1, АМг2, АМг6, АМЦ не перевищувала 4 %, тому формулу (3) рекомендується використовувати для визначення розширення при вальцюванні

обтискання при вальцюванні заготовок, які дали б можливість варіювати шириною заготовки в широких межах.

Після вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів, значення отриманого розширення істотно відрізняються від розрахункових, виконаних по формулах, приведених в літературі.

Мета поставлених експериментів полягає в тому, щоб по результатах, ґрунтуючись на вже відомих, підібрати формулу, яка давала б значення, близькі до експериментальних. У даній роботі використовувалися формули двох останніх етапів розвитку теорії розрахунку розширення, оскільки в цих формулах враховується найбільше число факторів, що впливають на розширення:

Обробка експериментальних даних по методу найменших квадратів з усередненими коефіцієнтами a_i , дала наступні результати: $a_1 = 5,64$, $a_2 = 3,31$; $a_3 = 0,7$. Загальне рівняння для визначення розширення при вальцюванні заготовок з алюмінієвих сплавів має наступний вигляд

заготовок з алюмінієвих сплавів в гладких валках.

Для визначення впливу ступеня деформації, температур нагріву вальцювальних штампів на розширення і тиск металу на валяння, заготовки з алюмінієвих сплавів АК6, АК4, АК4 - 1, АК8, АМг1, АМг2, АМг6, АМЦ з розмірами Ø14, 18, 20, 25x150мм нагріті до температури 450°C вальцювали в гладких валяннях із ступенями деформації 30, 40 і 50 %. Вальцювальні штампи нагрівалися послідовно до температур 20, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450°C, при яких проводилися експерименти. Температуру заміряли хромель-алюмелевою термопарою і регулювали за допомогою самописного приладу КСП. Частота обертання валків складала 12хв⁻¹. У експериментальних дослідженнях використані методи



тензометрування, оптичної і електронної мікроскопії, рентгеновського мікроаналізу, математичної статистики.

Аналіз експериментальних даних представлений в табл. 1 і на (рис. 8), отриманих при вальцюванні заготовок з розмірами $\varnothing 14 \times 150$ мм показує, що розширення щодо початкового поперечного

перетину заготовки при вальцюванні в штампах, що мають температуру 20°C і ступенях деформації 30, 40 і 50% збільшується відповідно на 20,4, 30 і 42 %. Пояснюється це тим, що із збільшенням ступеня деформації об'єм металу по ширині і, отже, розширення за інших рівних умов зростають.

Таблиця 1

Значення розширення Δb щодо початкового поперечного перетину заготовки залежно від ступеня деформації ϵ і температури нагріву вальцювальних штампів t_b

Розширення Δb	Температура, t_b		
	20°C	250°C	450°C
	$\epsilon = 30\%$		
	2,856	2,086	1,708
	$\epsilon = 40\%$		
	4,2	3,64	3,3
	$\epsilon = 50\%$		
	5,88	5,2	4,65

Характер поведінки залежностей розширення від температури нагріву вальцювальних штампів в інтервалі $20 - 250^\circ\text{C}$ (рис. 8) можна пояснити наступним. При температурі штампів 20°C і ступенях деформації 30, 40, 50 %, контактна площа зіткнення металу з вальцювальними штампами невелика, враховуючи прокат круглої заготовки $\varnothing 14$ мм. При цьому осьові стискуючі напруги направлені уздовж осередку деформації незначні в порівнянні із стискуючими напругами що діють в поперечному напрямі, тому спостерігається зростання розширення. Зниження розширення із збільшенням температури нагріву вальцювальних штампів відбувається за рахунок протікання розміцнюючих процесів і підвищення пластичності оброблюваного металу.

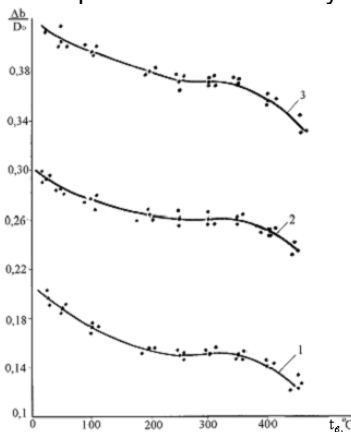


Рис. 8. Залежність розширення від ступеня деформації і температури нагріву вальцювальних штампів (ступінь деформації: 1-30 %; 2-40 %; 3-50 %; температура нагріву заготовок 450°C)

У інтервалі температур нагріву вальцювальних штампів $250 - 350^\circ\text{C}$ при постійному ступені деформації, розширення практично не міняється, а зміна ступенів деформації міняє абсолютні значення розширення на 15, 26, 37 % щодо початкового поперечного перетину заготовок що деформуються, відповідно, із ступенями деформації 30, 40 і 50%. Це відбувається унаслідок досягнення рівності осьової стискуючої напруги направлених уздовж і поперек осередку деформації, а також рівності зміщуваних об'ємів в цих напрямках.

З підвищенням температури нагріву вальцювальних штампів до 450°C і вальцювання заготовок із ступенями деформації 30, 40 і 50 %, значення розширення щодо початкового поперечного перетину заготовки зменшується і складає 12,2, 23,6, 33 % відповідно. Зниження розширення відбувається за рахунок збільшення осьової стискуючої напруги направленої уздовж осередку деформації, повнішого протікання розміцнюючих процесів, відсутності зон утрудненої деформації [6].

Проведений аналіз зміни розширення показав, із збільшенням температури нагріву вальцювальних штампів, значення розширення зменшуються. Так, значення розширення набуті при температурі нагріву вальцювальних штампів до $t_b = 250$ і 450°C при деформації $\epsilon = 30\%$ зменшуються по відношенню до розширення отриманому при вальцюванні заготовок у вальцювальних штампах, що мають температуру 20°C відповідно на 37 і 67,2%. Зменшення розширення при $t_b = 450^\circ\text{C}$ відносно $t_b = 250^\circ\text{C}$ складає 22%.

Аналогічно проведений аналіз зміни значень розширення при вальцюванні заготовок



при ступенях деформації 40, 50% і інших рівних умовах показав, що розширення зменшується на 15,4 і 27,3% ($\epsilon = 40\%$), 13 і 26, 45% (50%). Зменшення розширення при $t_b = 450^\circ\text{C}$ відносно $t_b = 250^\circ\text{C}$ складає 10,3% ($\epsilon=40\%$), 11,8 % ($\epsilon=50\%$).

З аналізу (рис. 8) видно, що зміна ступеню деформації від 30 до 50 % збільшує значення розширення, не змінюючи характеру залежностей їх від температури нагріву вальцювальних штамів. Вище відмічено, що із збільшенням ступеня деформації об'єм металу по ширині і, отже, розширення за інших рівних умов зростають.

На (рис. 9) представлена макроструктура подовжнього перетину вальцюваних заготовок із сплаву АК6 в гладких вальцювальних штампах за один перехід при температурі заготовок і вальцювальних штамів 470°C , ступенях деформації 40 і 50%. Проведені всебічні дослідження (макро-, мікро-, механічні властивості) якості вальцюваних заготовок, в умовах ізотермічної деформації і наближених до нього, відповідали вимогам технічної документації.

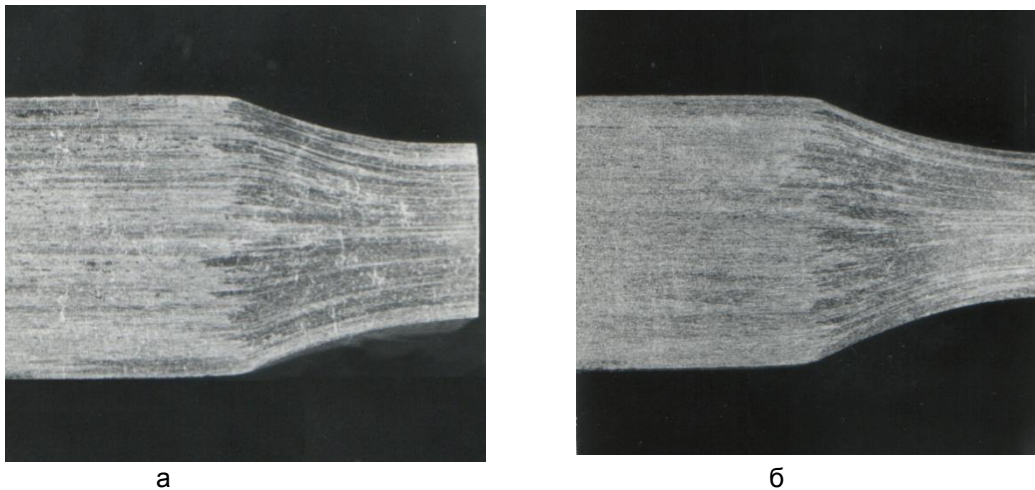


Рис. 9. Макроструктура повздовжніх перетинів вальцюваних заготовок у гладких валках. Сплав АК6, $\varnothing 14 \times 150$ мм. Температура заготовок і вальцювальних штамів 470°C : а - ступінь деформації 40 %; б – ступінь деформації 50 %

З аналізу (табл. 2 і рис. 10) видно, що при вальцюванні заготовок з розмірами $\varnothing 14 \times 150$ мм, що мають температуру 450°C , відносний тиск металу на валках зменшується з підвищенням температури нагріву вальцювальних штамів, і, найінтенсивніше із збільшенням ступеня деформації.

Так, з підвищенням температури нагріву вальцювальних штамів до 250, 350 і 450°C , тиск на валках зменшується в порівнянні із значеннями тиску при деформації заготовок у вальцювальних штампах, що мають

температуру 20°C і ступені деформації 30, 40, 50% відповідно на : 250°C – 62,45 %, 54 %, 45 %; 350°C – 55,8 %, 47,5 %, 38,73 %; 450°C – 53,3%, 46,5 %, 38,2 %.

У інтервалі температур нагріву вальцювальних штамів $350\text{--}450^\circ\text{C}$ тиск металу на валках при різних ступенях деформації змінюється трохи, а при досягненні вальцювальними штампами температур 400°C і вище майже стабілізується, а збільшення ступеня деформації впливає тільки на абсолютні значення відносного тиску $P_{от}$, (рис. 10).

$$P_{от} = 1 - \frac{P_0 - P_1}{P_0}$$

Таблиця 2.

Значення відносного тиску $P_{от}$ залежно від температури нагріву вальцювальних штамів t_b і ступеню деформації ϵ

№ п/п	$\epsilon = 30\%$		$\epsilon = 40\%$		$\epsilon = 50\%$	
	$t_b, ^\circ\text{C}$	$P_{от}$	$t_b, ^\circ\text{C}$	$P_{от}$	$t_b, ^\circ\text{C}$	$P_{от}$
1	20	0,4	20	0,5083	20	0,6664
2	250	0,2498	250	0,2747	250	0,3
3	300	0,2365	300	0,2498	300	0,2664
4	350	0,2232	350	0,2415	350	0,2581
5	400	0,2166	400	0,2365	400	0,2548
6	450	0,2133	450	0,2365	450	0,2548

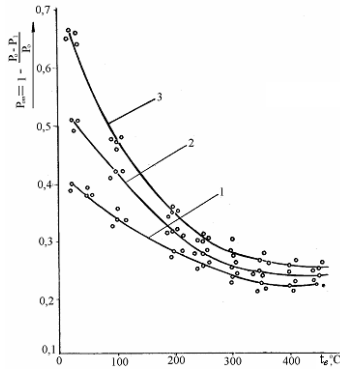


Рис. 10. Залежність відносного тиску металу на ваяння від температури нагріву вальцювальних штампів і ступеня деформації: 1 – 30%; 2 – 40%; 3 – 50%. Температура нагріву заготовок – 450°C

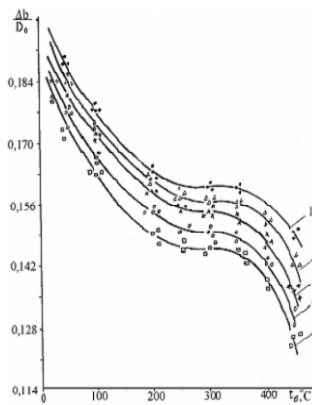


Рис. 11. Залежність розширення від температури нагріву заготовок і вальцювальних штампів при ступені деформації 30% (температура нагріву заготовок: 1 - 300°C; 2 - 350°C; 3 - 400°C; 4 - 450°C; 5 - 470°C)

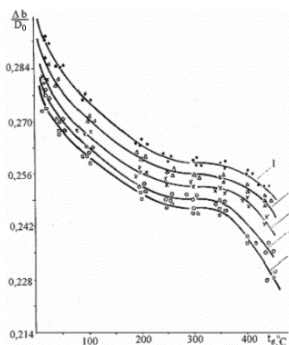


Рис. 12. Залежність розширення від температури нагріву заготовок і вальцювальних штампів при ступені деформації 40% (температура нагріву заготовок: 1 - 300°C; 2 - 350°C; 3 - 400°C; 4 - 450°C; 5 - 470°C)

Аналіз експериментальних даних представлених на (рис. 10) показує, що при вальцюванні заготовок на кувальних вальцях, в умовах ізотермічної деформації і наближених до них, тиск металу на валках зменшується із зростанням температури нагріву вальцювальних штампів найінтенсивніше в інтервалі температур 20–350°C. Подальший нагрів вальцювальних штампів не призводить до істотного зниження тиску і є недоцільним, оскільки веде до додаткової витрати енергії. Окрім цього спостерігається поява окалини на поверхні вальцювальних штампів.

У іншій серії експериментів, заготовки з вище названих сплавів з розмірами $\varnothing 14, 18, 20, 25$ x 150мм, нагрітий в камерній печі електроопір до температур 300, 350, 400, 450, 470⁺¹⁰ °C вальцювали в гладких вальцювальних штампах, які нагрівали послідовно до температур 20, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 470°C. Вальцювання заготовок проводилося із ступенями деформації 30 і 40 %. Результати експериментальних даних представлені на (рис. 11 і рис. 12).

Аналіз експериментальних даних представлених на (рис. 11 і рис. 12) показує, що із збільшенням температури нагріву заготовок і вальцювальних штампів розширення зменшується у зв'язку з протіканням розміцнюючих процесів. Окрім цього, необхідно відзначити, що в інтервалі температур нагріву вальцювальних штампів 250 – 350°C, розширення при постійному ступені деформації (аналогічно представленому на рис. 8) практично не міняється, а зміна ступенів деформації веде до зміни його абсолютних значень.

Випередження – швидкісна характеристика процесу вальцювання. Одна з причин виникнення випередження – складання швидкості переміщення металу від нейтрального перетину у бік виходу з валків при обтисканні з поступальною швидкістю руху всієї смуги. Інша – наявність зон утрудненої деформації або зон тверднення при гарячому вальцюванні у контактних поверхнях. Ці зони як би збільшують діаметр валків, повідомляючи більш глибоко лежачим шарам вальцюваного металу швидкість руху велику окружній швидкості валків. Третя – поблизу площини виходу металу з валків, за відсутності значного розвитку розширення, зростає швидкість переміщення елементарних ділянок металу уздовж осі вальцювання, в той час, коли окружна швидкість валків залишається постійною.

При розрахунку довжини ділянки, що деформується, має змінний перетин уздовж осі, точність визначення випередження у край необхідна, оскільки окрім визначення розмірів поперечних перетинів потрібно розраховувати і довжину його окремих ділянок. У разі неправильного визначення випередження,



довжина заготовки після вальцювання в попередній ділянці може бути більше або менше розрахунковою і не відповідати довжині подальшої ділянки, що може привести до браку вальцьованої заготовки.

Для визначення значень випередження при вальцюванні заготовок за традиційною технологією були проведені дослідження за визначенням її залежності від ступеня деформації, температури, ширини і кінцевої висоти заготовки [2].

Так, на основі аналізу експериментальних даних представлених на (рис. 13) показує, що із збільшенням ступеня деформації випередження росте, а із збільшенням температури вальцювання – зменшується. Підвищення значень випередження із збільшенням ступеня деформації за даних умов вальцювання пояснюється тим, що із збільшенням деформації зростає об'єм металу, що зміщується у напрямі вальцювання в зоні випередження, внаслідок чого росте випередження. Зменшення випередження із зростанням температури вальцювання пов'язане із зменшенням коефіцієнта тертя при вальцюванні в цьому інтервалі температур, в чому легко переконатися, якщо звернутися до відомих формул випередження Павлова, Фінка, Екелунда, Дрездена-Головіна. З цих формул виходить, що випередження збільшується із зростанням нейтрального кута, діаметру валків і зменшенням висоти смуги [7].

На (рис. 14) представлений графік отриманий за наслідками вальцювання зразків із сплаву АК6 різної ширини і однаковим ступенем деформації (19,5%). З приведених даних графіка видно, що випередження із збільшенням ширини підвищується спочатку прямолінійно до $B/H = 3,7$ і $B/H = 4,3$ (B і H — ширина і висота зразка до вальцювання) відповідно, а потім інтенсивність його зростання починає знижуватися і залежність набуває криволінійний характер. Таку зміну інтенсивності зростання випередження можна пояснити поступовим зменшенням розширення, що знижує випередження при збільшенні ширини смуги і практичної його стабілізації при $B/H > 5$. Цей взаємозв'язок — наслідок постійності об'єму при вальцюванні.

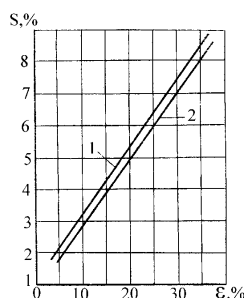


Рис. 13. Залежність випередження від ступеня обтискання і температури вальцювання заготовок в гладких валках:

З аналізу представлених даних (рис. 15) видно, що із збільшенням висоти вальцьованої заготовки при однаковому ступені деформації, значення випередження знижується унаслідок зменшення зміщеного по довжині заготовки об'єму металу по відношенню до всього об'єму в зоні випередження.

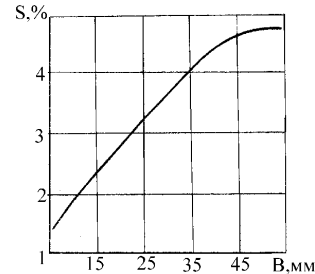


Рис. 14. Залежність випередження від ширини заготовки. Ступінь деформації 19,5%.

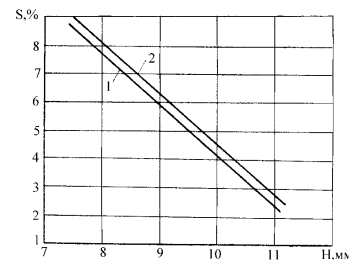


Рис. 15. Залежність випередження від кінцевої висоти заготовки при температурах вальцювання: 1 – 350; 2 – 450°C.

Для визначення впливу ступеня деформації, температур нагріву заготовок і вальцювальних штампів на випередження, заготовки з алюмінієвих сплавів АК6, АК4, АК; - 1, АК8, АМг1, АМг2, АМг6, АМЦ з розмірами $\varnothing 14, 18, 20, 25 \times 150$ мм нагріті до температури 450°C вальцювали в гладких валках із ступенями деформації 30, 40 і 50%. Вальцювальні штампи нагрівалися послідовно до температури 20, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450°C. Температуру заміряли хром-алюмелевою термопарою і регулювали за допомогою самописного приладу КСП. Частота обертання валків складала 12 хв^{-1} .

На (рис. 16) представлені залежності зміни випередження від ступеня деформації і температури нагріву штампів при вальцюванні заготовок із сплаву АК6 з розмірами $\varnothing 14 \times 150$ мм. Аналіз експериментальних даних представлених в табл.3 і на (рис.16) показує, що з підвищенням температури нагріву вальцювальних штампів до 250°C, значення випередження зростають в порівнянні із значеннями випередження при деформації у вальцювальних штампах, що мають температуру 20°C на 14,2; 16,48 і 12,52 % при ступенях деформації 30, 40 і 50% відповідно.

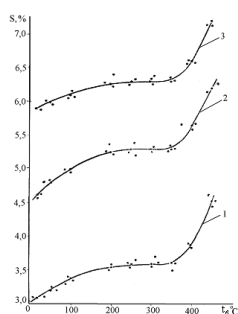
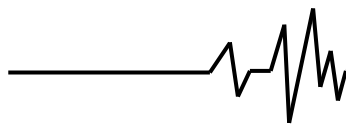


Рис. 16. Залежність випередження від ступеня деформації і температури нагріву вальцювальних штампів (ступінь деформації: 1 - 30 %; 2 - 40 %; 3 - 50%; температура нагріву заготовок 450 °С)

Збільшення випередження з підвищенням температури нагріву вальцювальних штампів

відбувається за рахунок зменшення коефіцієнта тертя, підвищення пластичності оброблюваного металу і протікання розміцнюючих процесів.

У інтервалі температур нагріву вальцювальних штампів 220–350°C і постійному ступеню деформації, випередження практично не міняється, а зміна ступенів деформації міняє абсолютні значення випередження. Так, підвищення ступеня деформації до 40 % приводить до збільшення випередження відносно 30 % на 49,7 %. Підвищення ступеня деформації до 50% приводить до збільшення випередження відносно 30 % на 77,68 %, а відносно 40 % на 18,68%.

Характер поведінки залежностей випередження від ступеня деформації і температур нагріву вальцювальних штампів в інтервалі 220–350°C пояснюється досягненням рівності осьових стискуючих напружень направлених вздовж і поперек осередку деформації, а також рівності зміщених об'ємів металу в цих напрямках.

Таблиця 3

Значення випередження S залежно від ступеня деформації ε і температури нагріву вальцювальних штампів t_h

Випередження S, %	Температура, t _h		
	20°C	250°C	450°C
	ε = 30%		
	3,1	3,54	4,55
ε = 40%			
	4,55	5,3	6,2
ε = 50%			
	5,59	6,29	7,2

Подальше підвищення температури нагріву вальцювальних штампів до 450 °С веде до збільшення значень випередження в порівнянні із значеннями випередження при деформації у вальцювальних штампах тих, що мають: температуру 20°C на 46,8; 36,26 і 28,8 %, температуру 250°C на 28,53; 17 і 14,47% відповідно при ступенях деформації 30, 40 і 50%.

Зміна ступеню деформації від 30 до 50% збільшує значення випередження, не змінюючи характеру залежностей їх від температури нагріву вальцювальних штампів.

У іншій серії експериментів, заготовки з вище перерахованих алюмінієвих сплавів з розмірами Ø14, 18, 20, 25x150 мм, нагрітий в камерній печі електроопір до температур 300, 350, 400, 450, 470 +10 °С вальцювали в гладких вальцювальних штампах, які нагрівали послідовно до температур 20, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 470°C. Вальцювання проводилося із ступенями деформації 30 і 40%. Результати експериментальних даних представлені на (рис. 17 і рис. 18).

Аналіз експериментальних даних представлених на (рис. 17 і рис. 18) показує, що із збільшенням ступеня деформації, температур

нагріву заготовок і вальцювальних штампів випередження збільшується за рахунок зменшення коефіцієнта тертя, підвищення пластичності оброблюваного металу і протікання розміцнюючих процесів. Окрім цього, необхідно відзначити, що в інтервалі температур нагріву вальцювальних штампів 220–350°C, випередження при постійному ступені деформації (аналогічно представленому на рис. 16) практично не міняється, а зміна ступенів деформації заміняє його абсолютні значення.

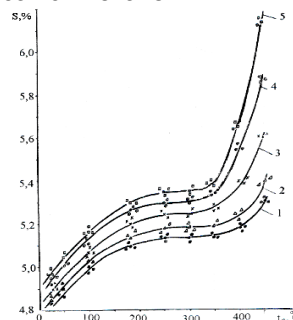


Рис. 17. Залежність випередження від температури нагріву штампів при ступені деформації 30% (температура нагріву заготовок: 1 - 300 °С; 2 - 350 °С; 3 - 400°C; 4 - 450°C; 5 - 470°C)

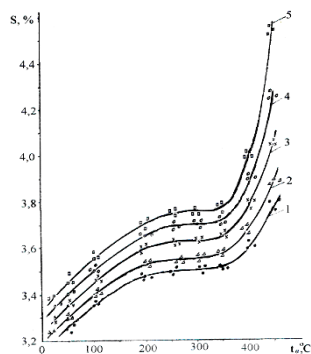


Рис. 18. Залежність випередження від температури нагріву вальцювальних штампів при ступені деформації 40%, (температура нагріву заготовок: 1 - 300 °С; 2 - 350 °С; 3 - 400 °С; 4 - 450 °С; 5 - 470 °С) S, %

Висновки. Аналізуючи переваги ізотермічної деформації, порівняно з деформацією металу в звичайних умовах, розроблена методика і проведені експериментальні дослідження основних технологічних параметрів (розширення, тиск металу на валки, випередження, тертя) процесу вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів, в умовах ізотермічного і наближеного до нього деформування. Визначені їх залежності від ступеня деформації, температур нагріву вальцювальних штампів і заготовок, коефіцієнтів витяжки при вальцюванні заготовок в гладких валках і калібрах різних систем. Встановлено, що характер поведінки залежностей при вальцюванні в гладких валках і калібрах різних систем аналогічний.

Аналіз проведених експериментів показав, що перебіг металу, ступінь заповнення гравюри вальцювального штампів, опір металу деформації, тертя істотно залежать від температури нагріву штампів.

Коефіцієнт тертя визначений з умов максимального кута захоплення. Встановлено, що при вальцюванні заготовок з алюмінієвих сплавів без застосування змащувального матеріалу при шорсткості валків $R_z=20-1,25$ коефіцієнт тертя рівний 0,32 – 0,3.

Визначені коефіцієнти витяжки по переходах для вальцювання заготовок в гладких валках і калібрах різних систем.

Виходячи з отриманих експериментальних даних встановлено, що в інтервалі температур нагріву вальцювальних штампів 250 – 350 °С і постійному ступеню деформації, розширення, тиск металу на валяння, випередження при вальцюванні заготовок з алюмінієвих сплавів практично не міняються незалежно від того, де заготовки деформуються (гладкі валки, калібри різних систем), а зміна ступенів деформації міняє їх значення. Це пояснюється відсутністю зміцнення металу за даних умов деформації. Тому вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів, в умовах гарячої деформації, рекомендується

проводити в штампах нагрітих до температур 250 – 350 °С, при яких значення величин описаних вище технологічних параметрів постійні, а тиск мінімальний.

Аналіз експериментальних даних показує, що вальцювання заготовок в умовах ізотермічної деформації знижує тиск металу на валки в 1,8 і більше разів. Це є підтвердженням поліпшення пластичності металу при його деформації в ізотермічних умовах і використання устаткування набагато меншого зусилля.

Всебічні дослідження (макро-, мікро-, механічні властивості) якості вальцюваних заготовок, виготовлених в умовах ізотермічного і наближеного до нього деформування, відповідають вимогам технічної документації.

Розроблені математичні моделі і отримані формули для визначення розширення і випередження при вальцюванні заготовок, в умовах ізотермічного і наближеного до нього деформування.

Список використаних джерел

1. Posviatenko E., Budyak R., Paladiichuk Y., Shvets L., Hryhoryshen V. 2018. Influence of a material and the technological factors on improvement of operating properties of machine parts by reliefs and film coatings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. № 5/12 (95). P. 48-56.
2. Baranovsky V., Truhanska O., Pankiv M., Bandura V. Research of a contact impact of a root crop with a screw auger. *Research in Agricultural Engineering / Res. Agr. Eng.* 2020. 66: P.33-42.
3. Будяк Р. В., Посвятенко Е. К., Швець Л. В., Жученко Г. А. Конструкційні матеріали і технології: навч. посіб. Вінниця : ВНАУ, 2020. - 240 с.
4. Pulupec M., Shvets L. 2019. Characteristics and thermomechanical modes of aluminum alloys hot deformation. *Current Problems of Transport: Proceedings of the 1st International Scientific Conference. Ternopil Ivan Puluj National Technical University and Scientific Publishing House «SciView»*. Ternopil, P. 195-204.
5. Shvets L. 2020. Determination of parameters during hot rolling of aluminum alloys. *The 2-nd International scientific and practical conference "Innovative development of science and education"* (April 26-28, 2020) ISGT Publishing House, Athens, Greece.
6. Shvets L. 2020. Extension value, with hot rolled aluminum alloy specimens, round section in smooth rollers. *Scientific foundations of modern engineering: monograph. Boston: Primedia e Launch*. 528 p.
7. Л.В. Швець, Ю.Б. Паладійчук, О.О. Труханська. Технічний сервіс в АПК. Том 1: навчальний посібник. Вінниця: ВНАУ, 2019. 648с.

References

1. Posviatenko E., Budyak R., Paladiichuk Y.,



Shvets L.Hryhoryshen V. (2018). Influence of a material and the technological factors on improvement of operating properties of machine parts by reliefs and film coatings. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. № 5/12 (95). P. 48-56. [In English].

2. Baranovsky V., Truhanska O., Pankiv M., Bandura V. (2020). Research of a contact impact of a root crop with a screw auger. Research in Agricultural Engineering / Res. Agr. Eng. 66 (1), P.33-42. [In English]

3. Budiak R. V., Posviatenko E. K., Shvets L. V., Zhuchenko H. A. (2020). Konstruktsiini materialy i tekhnolohii: navch. posib. Vinnytsia : VNAU. 240 s. [In Ukrainian].

4. Pulupec M., Shvets L. (2019). Characteristics and thermomechanical modes of aluminum alloys hot deformation. Current Problems of Transport: Proceedings of the 1st International Scientific Conference. Ternopil Ivan Puluj National Technical University and Scientific Publishing House «SciView». Ternopil, P. 195-204.

5. Shvets L. (2020). Determination of parameters during hot rolling of aluminum alloys. The 2-nd International scientific and practical conference "Innovative development of science and education" (April 26-28, 2020) ISGT Publishing House, Athens, Greece. [In English].

6. Shvets L. (2020). Extension value, with hot rolled aluminum alloy specimens, round section in smooth rollers. Scientific foundations of modern engineering: monograph. Boston: Primedia e Launch. 528 r. [In English].

7. L.V. Shvets, Yu.B. Paladiichuk, O.O. Trukhanska. (2019). Tekhnichniy servis v APK. Tom 1: navchalnyi posibnyk. Vinnytsia: VNAU, 2019. 648s. [In Ukrainian].

EXPERIMENTAL STUDIES OF ROLLING OF ALUMINUM ALLOY PREPARATIONS UNDER ISOTHERMAL DEFORMATION

Metal deformation under conditions of isothermal and near-isothermal deformation is

characterized by an increase in plasticity compared to plasticity during processing in a cold tool. This is due to the lower strain rate, the lower limit of which is limited only by the productivity of the process. As a result, the time for "filling defects" that occur during metal deformation increases, the thermal stress in the work piece volume decreases, and the deformation becomes more uniform. In this work, a technique for conducting experimental studies has been developed, covering an extended range of tasks for determining the technological parameters of rolling billets from aluminum alloys under conditions of isothermal and close to it deformation.

To determine the technological parameters and thermomechanical characteristics, an installation for billet rolling under conditions of isothermal and close to it deformation is proposed. In order to ensure the rigidity of the rollers and maintain a constant center-to-center distance during the deformation process, the installation is made according to the type of two-bearing forging rollers. To maintain the temperature of the workpiece and heat the working tool (roller dies directly mounted on the rollers), the unit is equipped with a heating device installed on the back side.

On the basis of the analysis of the results of experimental studies, the optimal technological parameters of rolling blanks from aluminum alloys at variable temperatures, speeds, degrees of deformation and development of the technological process were determined. Technological recommendations for the calculation of gauges are proposed and a technical task is developed for an industrial sample of equipment for rolling blanks in conditions of isothermal and near-isothermal deformation, including work during traditional rolling without heating of rolling dies.

Keywords: hot deformation, rolling of workpieces, aluminum alloys.

Відомості про авторів

Швец Людмила Василівна - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри агроінженерії та технічного сервісу Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м Вінниця, 21008, Україна, e-mail: shlv0505@ukr.net).

Труханська Олена Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри агроінженерії та технічного сервісу Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м Вінниця, 21008, Україна, e-mail: seaswallow@ukr.net).

Shvets Ludmila – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Agroengineering and Technical Service of Vinnytsia National Agrarian University (Sunny str., 3, Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: shlv0505@ukr.net).

Trukhanska Olena – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Agroengineering and Technical Service of Vinnytsia National Agrarian University (Solnechnaya St., 3, Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: seaswallow@ukr.net).