

**Янович В. П.**

д.т.н., професор

Штуць А. А.

к.т.н., старший викладач

Гулько І. В.

к.т.н., професор

Швець Л. В.

к.т.н., доцент

**Вінницький національний
аграрний університет.****Yanovych V.**Doctor of Technical Sciences,
Professor**Shtuts A.**Candidate of Technical Sciences,
Senior Lecturer**Hunko I.**Candidate of Technical Sciences,
Professor**Shvets L.**Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor**Vinnitsia National Agrarian
University****УДК 621.7:669.15****DOI: 10.37128/2306-8744-2025-1-2****РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ
ПРОЦЕСІВ ВИРОБНИЦТВА
ТРУБЧАТИХ СКЛАДНОПРОФІЛНИХ
ВИРОБІВ З ДНИЦАМИ І
ГОРЛОВИНАМИ ШТАМПУВАННЯМ
ОБКочУВАННЯМ**

У роботі розглядається актуальна проблема підвищення пластичності металів у процесах холодного штампування обкочуванням, що має ключове значення для забезпечення високої надійності та якості готових виробів у сучасному виробництві. Одним із важливих аспектів цих процесів є визначення кривих граничної деформації, які дозволяють точно оцінювати максимально допустимі деформації матеріалу до моменту його руйнування.

Процеси холодного штампування супроводжуються складними деформаціями металів, що призводить до накопичення мікропошкоджень у їх структурі. Такі пошкодження зумовлюють розщільнення матеріалу, що знижує його залишкову пластичність і підвищує ризик виникнення тріщин. Здатність матеріалу до пластичного деформування без руйнування залежить від ряду факторів, серед яких особливості матеріалу, режими навантаження та характер напруженого стану.

Особлива увага у статті приділена впливу схеми напруженого стану на пластичність матеріалів, оскільки саме цей фактор значною мірою визначає поведінку матеріалу під час обробки. Для кількісної оцінки характеру напруженого стану використовується показник Надаї-Лодє, який дозволяє виявляти критичні умови, за яких можливе руйнування матеріалу.

Запропоновано інноваційну методику побудови кривих граничних деформацій, яка базується на експериментальних даних та враховує особливості напружено-деформованого стану матеріалу у конкретних умовах технологічного процесу. Такий підхід дозволяє підвищити точність оцінки пластичності матеріалів, оптимізувати параметри технологічних процесів холодного штампування обкочуванням та забезпечити стабільність якості готової продукції.

Практичне застосування розробленої методики сприяє підвищенню продуктивності виробництва, зменшенню відсотка браку та зниженню ймовірності виникнення дефектів у готових виробах. Результати дослідження можуть бути корисними для інженерів і технологів, які займаються розробкою сучасних процесів обробки матеріалів тиском. Крім того, запропонована методика має потенціал до адаптації в інших технологічних процесах, де важливо враховувати пластичні властивості матеріалу.

Ключові слова: штампування обкочуванням, циліндричний валок, днища, горловини, контактні напруження, складнопрофільні заготовки, дослідження, технологічні можливості аналіз, механіка, формоутворення, складнопрофільні вироби, напружено деформований стан, зусилля.



Постановка проблеми. У сучасному машинобудуванні та металообробці технологічні процеси штампування обкочуванням (ШО) відіграють важливу роль у виробництві складних профільних виробів. Ці процеси знаходять широке застосування при виготовленні таких компонентів, складнопрофільні вироби з днищами та горловинами, що використовуються в авіабудуванні, автомобільній промисловості, виробництві теплотехнічного обладнання, а також у харчовій галузі для виготовлення резервуарів і ємностей високого тиску.

Завдяки можливості досягнення високої точності геометричних розмірів та поліпшення механічних властивостей матеріалу, технологія ШО забезпечує економічну ефективність і високу продуктивність виробництва. Водночас, у процесах ШО виникає ряд технологічних проблем, пов'язаних із забезпеченням достатньої деформовності матеріалів та контролем їх пластичності під час великих пластичних деформацій.

Під час штампування трубчастих виробів із тонкостінного матеріалу, такі як деталі теплообмінників або корпуси паливних баків, основними проблемами є утворення магістральних тріщин та зниження пластичності матеріалу. Наприклад, при виробництві алюмінієвих труб із сплаву 6061 можливе розшарування матеріалу при перевищенні критичного значення деформації, що призводить до браку готової продукції.

Для забезпечення стабільності процесу ШО необхідно розробляти математичні моделі, які дозволяють прогнозувати поведінку металу в умовах складного напруженого стану. Одним із підходів є використання критерію пластичності Мізеса або Треска для оцінки граничних умов деформування:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{3}{2} s_{ijs} s_{ijs}} \leq \sigma_y$$

де σ_e - еквівалентна напруга за Мізесом, s_{ij} - девіатор напружень, σ_y - границя текучості матеріалу.

Також для оцінки граничної пластичності можуть використовуватися моделі на основі граничних деформацій, наприклад, модель Койна-Медліна, яка враховує вплив параметрів деформування:

$$\varepsilon_{cr} = C \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_e} \right)^n$$

де ε_{cr} - критична деформація, C, n - емпіричні коефіцієнти, що визначаються експериментально, σ_m - середня напруга, σ_e - еквівалентна напруга.

Для підвищення точності прогнозування критичних деформацій доцільно використовувати моделі апроксимацій на основі нейронних мереж або регресійного аналізу, які дозволяють враховувати множину впливових факторів, таких як температура, швидкість деформації та властивості матеріалу.

Застосування розроблених математичних моделей у виробничому процесі ШО має значний потенціал для підвищення якості продукції та оптимізації технологічних режимів. Моделі, що

оцінюють граничну пластичність матеріалів, дозволяють не лише мінімізувати ймовірність утворення дефектів, таких як магістральні тріщини та розшарування матеріалу, але й забезпечити стабільність процесів виготовлення складнопрофільних виробів.

Реалізація моделей у виробничому середовищі забезпечує можливість прогнозування поведінки матеріалу при різних режимах навантаження. Це дозволяє уникати перевищення критичних деформацій, які можуть призвести до пошкодження виробів. Оптимізація процесів деформування завдяки автоматичному регулюванню таких параметрів, як швидкість обертання валків, зусилля пресування та температурний режим, дозволяє значно підвищити якість продукції.

Використання моделей граничної пластичності у системах автоматизованого контролю на базі програмованих логічних контролерів відкриває нові можливості для підвищення ефективності виробництва. Система автоматичного контролю в режимі реального часу може відслідковувати параметри деформування, такі як напруження, деформація та температура матеріалу, за допомогою тензометрів і температурних сенсорів. Завдяки зворотному зв'язку із технологічним обладнанням система здатна адаптивно змінювати режими ШО, зокрема коригувати швидкість обертання валків або тиск у пресуванні. У разі небезпечних режимів система активує аварійну зупинку або переходить до режиму зниженої потужності, запобігаючи пошкодженням виробів. Моделі деформовності також сприяють оптимізації енерговитрат виробничого обладнання. Вони дозволяють знизити кількість браку, що зменшує потребу в додаткових циклах обробки матеріалу. Розробка алгоритмів оптимального керування забезпечує економію енергії завдяки вибору оптимальних траєкторій деформації матеріалу. Економія енерговитрат може досягати до 15%, що позитивно впливає на загальну ефективність виробничого процесу. У разі перевищення допустимих значень контролер передає сигнал до виконавчих механізмів для корекції параметрів процесу. Такий підхід дозволяє підтримувати стабільний технологічний процес, зменшувати кількість дефектів і підвищувати надійність обладнання.

Таким чином, розробка та впровадження математичних моделей і підходів до оцінки пластичності металів у процесах штампування обкочуванням забезпечує значний внесок у підвищення технологічної ефективності виробничих процесів. Це сприяє досягненню стабільно високої якості продукції, оптимізації енергетичних і ресурсних витрат та підвищенню загальної рентабельності виробництва.

Мета роботи. Метою роботи є розробка методів та математичних моделей для оцінки граничної деформації матеріалу в процесах ШО з метою підвищення якості продукції та оптимізації



технологічних режимів.

Для досягнення цієї мети необхідно проаналізувати сучасні підходи до оцінки пластичності металів у процесах ШО, виявити їх недоліки та окреслити ключові проблеми, пов'язані з деформованістю матеріалів і можливими пошкодженнями у виробках під час холодного штампування обкочуванням.

Важливо розробити алгоритми адаптивного регулювання режимів деформування для мінімізації утворення дефектів у виробках. Це передбачає створення механізмів зворотного зв'язку в автоматизованих системах контролю, які дозволять швидко реагувати на зміну умов виробництва. Математичні моделі, що враховують вплив напружено-деформованого стану та кінематичних параметрів процесу на граничну пластичність матеріалу. Ці моделі повинні забезпечити точне прогнозування поведінки матеріалів під час деформування і дозволити мінімізувати ймовірність утворення дефектів.

Аналіз пластичності металів, криві граничної деформації. В процесах штампування обкочуванням, поряд зі зміцненням матеріалу і формуванням сприятливої мікроструктури, відбувається накопичення в ньому пошкоджень, що приводить до розщільнення матеріалу й зниження показників залишкової пластичності. Тому при перевищенні певного рівня деформації спостерігається погіршення службових характеристик виробів, аж до руйнування заготовок у процесі пластичної обробки або виробів при експлуатації. Тому забезпечення необхідної якості виробів при обробці методами ШО неможливе без оцінки деформованості металів, тобто їх здатності деформуватися без руйнування, при мінімальному вичерпанні ресурсу пластичності.

Під пластичністю розуміють здатність матеріалів до незворотної формозміни без руйнування. Як правило, така здатність є обмеженою, оскільки деформація матеріалів супроводжується збільшенням щільності лінійних і точкових дефектів, появою і збільшенням мікротріщин, що призводить до розщільнення матеріалу, утворенню магістральної тріщини й руйнуванню, рис. 1 Накопичення пошкоджень у матеріалі супроводжується зменшенням його щільності й зміною електричних характеристик [2,3].

Під магістральною тріщиною, поява якої й визначає вичерпання пластичності металу, розуміють такий дефект, який призводить до непоправного пошкодження виробів. У різних технологічних процесах розміри магістральної тріщини можуть бути різними. Полегшує виявлення магістральних тріщин у разі процесів ШО той факт, що при відсутності помітного градієнта пошкоженості матеріалу катастрофічний розвиток магістральної тріщини відбувається без суттєвого збільшення міри пластичності.

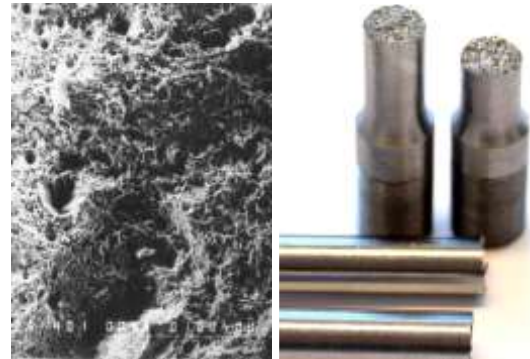


Рис. 1. Вигляд пошкоджень на поверхні зони пластичного руйнування

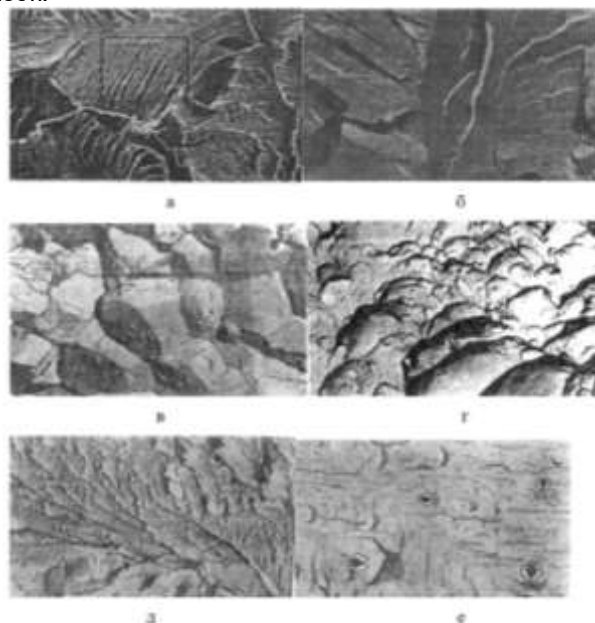


Рис. 2. Елементи мікробудови поверхні зламів: а – фасетки відколу з ділянкою втомних рівчаків; б – сходинок відколу; в – міжзеренне руйнування; г – внутрішньозеренне в'язке руйнування; д – рівчаківий узор; е – язички.



Пластичне деформування супроводжується зростанням залишкових деформацій. Деформований стан у точці можна описати симетричним тензором другого рангу $\dot{\varepsilon}_{ij}$ ($i, j = 1, 2, 3$) - тензором швидкостей деформацій. Компоненти тензора швидкостей деформацій пов'язані з полем швидкостей U_i ($i = 1, 2, 3$) співвідношенням Коші:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right), \quad (1)$$

де x_i ($i = 1, 2, 3$) - координати Ейлера.

В якості міри швидкостей деформації в точці приймають один із варіантів тензора швидкостей деформації - інтенсивність швидкостей деформації ε_i , яка є скалярною додатною величиною.

Мірою деформації в матеріальній точці слугує накопичена деформація або ступінь деформації:

$$\varepsilon_i = \int_0^{t_k} \varepsilon_i dt, \quad (2)$$

де t_k - час закінчення процесу деформації.

У якості міри пластичності приймають накопичену до моменту руйнування пластичну деформацію [1,2,6]:

$$\varepsilon_* = \int_0^{t_p} \varepsilon_i d\tau, \quad (3)$$

$\varepsilon^* = 0 \text{трєудт}$

де t_p - час деформування до руйнування.

При простому деформуванні, коли зберігається знак головних деформацій і сталість положень головних осей щодо матеріальних волокон, накопичена деформація (ступінь деформації) дорівнює інтенсивності логарифмічних деформацій [9,11].

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}, \quad (4)$$

де $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ - головні логарифмічні деформації.

Пластичність металу залежить: від марки й стану; виду навантаження, що обумовлює знак головних деформацій і сталість положення головних осей відносно матеріальних волокон; показника напруженого стану; стану поверхні зразка, що деформується, і масштабного фактора; градієнтів деформованого стану й пошкодженості матеріалу; інтенсивності зміни напрямків площин ковзання тощо.

Головним фактором, що впливає на пластичність металів в умовах холодного

деформування, є схема напруженого стану. Залежність пластичності від параметрів, що характеризують схему напруженого стану, називають кривою граничних деформацій.

Найбільшого поширення набуло уявлення залежності пластичності від показника напруженого стану, запропонованого Смірновим [11,12]:

$$\eta = \frac{I_1(T_\sigma)}{3\sqrt{I_2(D_\sigma)}} = \frac{3\sigma}{\sqrt{3}\sigma_u} \quad (5)$$

де $I_1(T_\sigma)$ - перший інваріант тензора напружень; $I_2(D_\sigma)$ - другий інваріант девіатора

напружень; $\sigma = \frac{1}{3} \sigma_{ij} \delta_{ij}$ - середнє напруження.

Показник η не враховує впливу третього інваріанта тензора напружень, тому криву граничних напружень у координатах « $\varepsilon_i - \eta$ » не вважають єдиною для всіх можливих видів напруженого стану.

Для об'єктивної оцінки деформованості металів у різних технологічних процесах необхідно мати «єдину» криву граничних деформацій, яка описує їх пластичність при різних схемах напруженого стану. Випробування матеріалів на пластичність у камері високого тиску різними методами показали різні результати, відповідні одним і тим же значенням показника напруженого стану. Зокрема, Колганов І.М. встановлено, що при розтягуванні пластичність вища, ніж при крученні. Арчаков А. Т. довів, що результат випробувань виходить різний, при цьому яка з характеристик більша, залежить від марки матеріалу [11]. Огородніков В.А. встановив [11,12], що при крученні в камері високого тиску, за створених умов з однаковими значеннями показника напруженого стану, пластичність буде все ж нижча, ніж при стисканні.

Для виключення можливих розбіжностей при оцінці деформованості матеріалів необхідно, щоб у досліджуваному технологічному процесі й експериментах з побудови кривої граничних деформацій дотримувалися умови ідентичності параметра Надаї-Лоде, що характеризує вид девіатора напружень:

$$\mu_\sigma = 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1 = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}. \quad (6)$$

Залежність пластичності від схеми напруженого стану може бути описана шляхом побудови повної поверхні пластичності в координатах « $\varepsilon_i - \eta - \mu_\sigma$ ». Зазначена залежність запропонована [11], однак її побудова пов'язана із труднощами експериментального характеру.

Вибір і обґрунтування інваріантів напруженого стану при вирішенні задач механіки матеріалів розглянуто в роботі А. А. Лебедева, В. М. Михалевича [12].



В роботі [11] В. А. Огороднікова запропоновано побудов поверхні пластичності в координатах « $\varepsilon_i - \mu - \chi$ », де χ - показник, що враховує третій інваріант тензора напружень:

$$\chi = \frac{\sqrt[3]{I_3(T_\sigma)}}{\sqrt{3I_2(D_\sigma)}} = \frac{\sqrt[3]{\sigma_1\sigma_2\sigma_3}}{\sigma_u}. \quad (7)$$

Поверхню пластичності, що побудована в координатах « $\varepsilon_i - \mu - \chi$ », можна визначити як поверхню граничних деформацій. Перетин поверхні площиною, перпендикулярною осі $\chi = 0$, призводить до отримання кривої граничних деформацій у координатах $\varepsilon_* = \varepsilon_*(\eta)$. Для побудови кривих граничних деформацій за даною методикою необхідно проводити трудомісткі випробування в камері високого тиску. Це виключає можливість випробування пластичних матеріалів на стиск, а випробування на розтягнення призводять до спотворення результатів внаслідок появи шийки.

Сиваком І. О. розроблена методика побудови поверхонь $\varepsilon_*(\eta, \mu_\sigma)$ шляхом простих випробувань на розтяг, стиск, чистий зсув і випробувань на осадку циліндричних зразків у оболонках різної товщини [11].

Відсутність універсальності якісного впливу показника Надаї-Лоде на пластичність в умовах $\eta = const$ призвело до того, що багато дослідників пояснюють відмічені розбіжності пластичності недосконалістю методик випробування зразків на розтяг, кручення і стиск. Проте ці пояснення не мають обґрунтованих підтверджень.

Що стосується поверхонь граничних деформацій, то при їх побудові використовуються ті ж методики випробування зразків на розтяг, кручення і стиск, недосконалістю яких і пояснюють розбіжності пластичності при використанні кривих граничних деформацій. В роботі [9] також підтверджено те, що пластичність матеріалів при постійних значеннях показника η дійсно істотно залежить від величини μ_σ . Однак автори відзначають, що стверджувати про існування поверхні пластичності можна тільки в тому випадку, якщо на такій поверхні існують дві різні точки з однаковим значенням ε_* , але з різними поєднаннями показників η і μ_σ . Проте поки що зазначене положення дослідами не підтверджено.

Можливі неточності опису залежності пластичності від схеми напруженого стану, при використанні кривих граничних деформацій, характерні тільки для областей всебічного стиснення, де безпека руйнування матеріалів у технологічних процесах перестає бути їх основним обмежуючим фактором. Крім того, в більшості критеріїв деформованості підінтегральна функція включає модель залежності граничної деформації

η і μ_σ від показника η . Тому найбільшого поширення, при описі залежності пластичності від схеми напруженого стану, все ж отримали криві граничних деформацій у координатах $\varepsilon_* = \varepsilon_*(\eta)$.

Аналіз напруженого стану матеріалів заготовок при обробці методами ШО показав, що показник напруженого стану η у небезпечній зоні заготовки знаходиться в межах $-2\eta \leq 1$, а параметр Надаї-Лоде $-0\mu_\sigma \leq 1$. Пластичність матеріалів при цьому може бути визначена за результатами випробування циліндричних зразків на осадку, кручення, розтягування, а також шляхом реалізації зазначених видів випробувань у камері високого тиску. Однак при таких випробуваннях часто виникають проблеми, що пов'язані зі складністю витримування постійної заданої схеми напруженого стану, однорідної по всьому перетину зразка, а також підтримці умов $\eta = const$ протягом усього часу випробування зразка. Даний вид деформування необхідно, переважно, забезпечити в разі реалізації випробувань при побудові кривих граничних деформацій.

Вибір критеріального підходу для оцінки деформованості матеріалу заготовок при ШО значною мірою залежить від типу деформування: простого чи складного. При прямому витискуванні методом ШО характер шляхів деформування має певні особливості. На початковому етапі витискування матеріал на лінії ОМ підлягає розтягу при показнику напруженого стану $\eta = 1,73$, при цьому інтенсивність деформацій залишається відносно невеликою і досягає максимальних значень лише на завершальному етапі формоутворення.

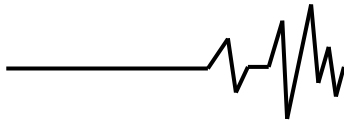
Далі, при контакті з бічною поверхнею каналу матриці, частина часток матеріалу зазнає деформування вже в умовах $\eta = -1,0 \dots 1,5$. Для найбільш деформованої зони заготовки, яка знаходиться у контакті з валком, шлях деформування можна описати середнім значенням показника $\eta = -2,5 \dots -2$.

Для оцінки деформованості заготовки доцільно застосувати один із критеріїв деформованості. Побудова математичної моделі деформованості цих зон передбачає розробку відповідних шляхів деформування. Для моделювання цих шляхів була створена параметрично задана функція.

$$\begin{cases} \eta(t) = \frac{b \cdot (tg(t) - t) + a \cdot \sqrt{1+c} \cdot t}{\sqrt{tg^2(t) + c \cdot t^2}}, & t \in \left(0, \frac{\pi}{2}\right), \\ \bar{e}_{eq}(t) = m \cdot \int_0^t \sqrt{\frac{1}{\cos^4 x} + 3} \cdot dx \end{cases}, \quad (8)$$

де a, b, c, m - параметри апроксимації.

Перевіримо, чи відповідає запропонована модель шляхів деформування



заданим граничним умовам.

$$\lim_{t \rightarrow 0^+} \eta(t) = 1.7 \cdot \quad (9)$$

$$\lim_{t \rightarrow \frac{\pi}{2}^-} \eta(t) = -1.5 \div -1. \quad (10)$$

Дійсно, для першої умови маємо:

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow 0^+} \eta(t) &= \lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{b \cdot (tg(t) - t) + a \cdot \sqrt{1+c} \cdot t}{\sqrt{tg^2(t) + c \cdot t^2}} = \\ &= \lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{b \cdot \frac{tg(t)}{tg(t)} + (a \cdot \sqrt{1+c} - b) \cdot \frac{t}{tg(t)}}{\sqrt{\frac{tg^2(t)}{tg^2(t)} + c \cdot \frac{t^2}{tg^2(t)}}} \quad (11) \end{aligned}$$

З урахуванням першої визначеної границі:

$$\lim_{t \rightarrow 0} \frac{\sin(t)}{t} = 1$$

та умови:

$$\lim_{t \rightarrow 0} \cos(t) = 1,$$

матимемо:

$$\lim_{t \rightarrow 0^+} \eta(t) = a. \quad (12)$$

Звідси випливає, що параметр a дорівнює $a = 1.7$.

Для другої умови на основі (13) можемо записати:

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \frac{\pi}{2}^-} \eta(t) &= \lim_{t \rightarrow \frac{\pi}{2}^-} \frac{b \cdot (tg(t) - t) + a \cdot \sqrt{1+c} \cdot t}{\sqrt{tg^2(t) + c \cdot t^2}} = \\ &= \lim_{t \rightarrow \frac{\pi}{2}^-} \frac{b \cdot \frac{tg(t)}{tg(t)} + (a \cdot \sqrt{1+c} - b) \cdot \frac{t}{tg(t)}}{\sqrt{\frac{tg^2(t)}{tg^2(t)} + c \cdot \frac{t^2}{tg^2(t)}}} \quad (13) \end{aligned}$$

З урахуванням того, що

$$\lim_{t \rightarrow \frac{\pi}{2}^-} \frac{t}{tg(t)} = 0,$$

матимемо:

$$\lim_{t \rightarrow \frac{\pi}{2}^-} \eta(t) = b. \quad (14)$$

Отже, вибір значення параметра b з діапазону, що вказаний у граничній умові 2, визначає стадію процесу деформування заготовки під час її контакту з бічною поверхнею каналу матриці.

Неважко довести, також, що:

$$\lim_{c \rightarrow 0^+} \eta(t) = b + (a - b) \cdot \frac{t}{tg(t)},$$

$$\lim_{c \rightarrow +\infty} \eta(t) = a.$$

Вибір конкретного значення цього параметра певним чином впливає на форму траєкторії деформування, що можна врахувати шляхом підбору відповідного значення параметра. На рисунку 3 показано, як вибір значень параметрів функції впливає на форму траєкторії деформування.

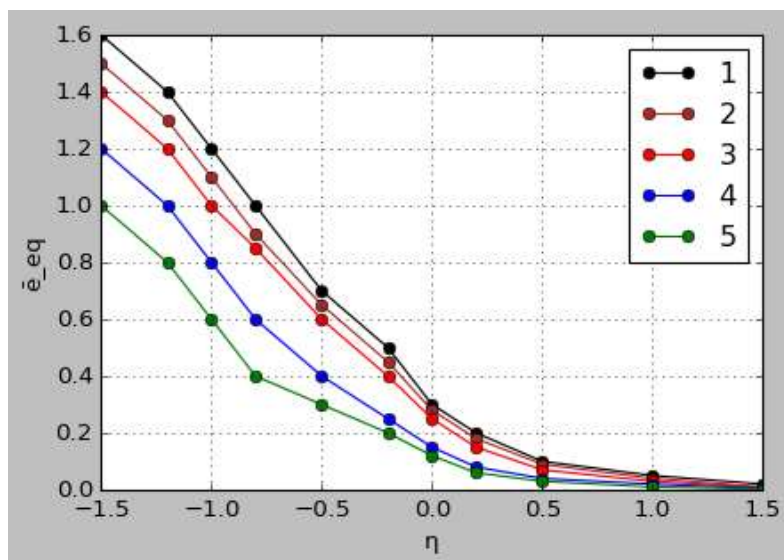


Рис. 3. Траєкторії деформування: розрахунки за (14), $a = 1.7$; 1-4 - $b = -1$; 5 - $b = -1.5$; 2, 3, 4 - $c = 0.1$; 1 - $c = 30$; 1 - $c = 0.08$; 1-5 - $m = 0.02, 0.065, 0.04, 0.01, 0.04$.



Для оцінки деформовності матеріалу заготовок побудували модель накопичення пошкоджень, що базується на критерії В. Огороднікова [9] та певної методики побудови апроксимації кривої граничних деформацій [12]:

$$\psi(t) = \int_0^t \frac{n \cdot m^n \cdot \left(\int_0^x \sqrt{\frac{1}{\cos^4 \tau} + 3} \cdot d\tau \right)^{n-1} \cdot \sqrt{\frac{1}{\cos^4 x} + 3}}{\left(\varepsilon_{*s}[\eta(x)] \right)^n} \cdot dx \quad (15)$$

$$n = 1 + 0.2 \cdot \arctg \left(\frac{d\eta}{d\bar{\varepsilon}_{eq}} \right) \quad (16)$$

Використовуватимемо трипараметричну апроксимацію кривої граничних деформацій при стаціонарному деформуванні:

$$\varepsilon_{*s}(\eta) = \varepsilon_{*s}(\eta=0) \cdot \left(\frac{\varepsilon_{*s}(\eta=1)}{\varepsilon_{*s}(\eta=-1)} \right)^{\frac{\eta}{2}} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{*s}(\eta=-1) \cdot \varepsilon_{*s}(\eta=1)}{[\varepsilon_{*s}(\eta=0)]^2} \right)^{\frac{\eta^2}{2}} \quad (17)$$

Тоді крива накопичення пошкоджень у координатах $\eta - \psi$ набуває такого вигляду:

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta(t) = \frac{b \cdot (tg(t) - t) + a \cdot \sqrt{1+c} \cdot t}{\sqrt{tg^2(t) + c \cdot t^2}}, \\ \psi(t) = \int_0^t \frac{n \cdot m^n \cdot \left(\int_0^x \sqrt{\frac{1}{\cos^4 \tau} + 3} \cdot d\tau \right)^{n-1} \cdot \sqrt{\frac{1}{\cos^4 x} + 3}}{\left(\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta=0) \cdot \left(\frac{\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta=1)}{\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta=-1)} \right)^{\frac{\eta(x)}{2}} \cdot \left(\frac{\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta=1) \cdot \bar{\varepsilon}_{fs}(\eta=-1)}{\varepsilon_{fs}^2(\eta=0)} \right)^{\frac{\eta^2(x)}{2}} \right)^n} \cdot dx, t \in \left[0, \frac{\pi}{2} \right] \end{array} \right. \quad (18)$$

Аналіз траєкторій деформування, що зображені на рис. 3, свідчить, що на початковій стадії деформування, що супроводжується різкою зміною напруженого стану від 1.7 до від'ємних значень швидкість $\frac{d\eta}{d\bar{\varepsilon}_{eq}}$ можна

вважати сталою та для різних траєкторій змінюється приблизно в діапазоні від -17 до -4. У цьому випадку, відповідно до , значення параметра нелінійності n належить діапазону 0.69÷0.73.

На завершальній стадії деформування показник напруженого стану залишається майже незмінним, незважаючи на значне

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta(t) = \frac{b \cdot (tg(t) - t) + a \cdot \sqrt{1+c} \cdot t}{\sqrt{tg^2(t) + c \cdot t^2}}, \\ \psi(t) = m \cdot \int_0^t \frac{\sqrt{\frac{1}{\cos^4 x} + 3}}{\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta=0) \cdot \left(\frac{\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta=1)}{\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta=-1)} \right)^{\frac{\eta(x)}{2}} \cdot \left(\frac{\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta=1) \cdot \bar{\varepsilon}_{fs}(\eta=-1)}{\varepsilon_{fs}^2(\eta=0)} \right)^{\frac{\eta^2(x)}{2}}} \cdot dx, t \in \left[0, \frac{\pi}{2} \right] \end{array} \right. \quad (19)$$

Результати моделювання деформовності за вказаних умов показано на рис. 4.

Із представлених даних видно, що розрахункові значення координат критичних точок для досліджуваної траєкторії деформування нехтовно мало відрізняються один від одного за значенням показника напруженого стану η та

зростання накопиченої деформації. Таким чином, розрахункове значення накопичення пошкоджень на цьому етапі майже не залежить від показника нелінійності накопичення пошкоджень. Це свідчить про те, що моделювання деформовності при прямому витискуванні методом штампування обкочуванням можна проводити за умови $n = n_i = const$.

При $n=1$ – матимемо лінійний принцип накопичення пошкоджень, відповідно якого на основі (19) матимемо:

суттєво відрізняються за величиною граничної деформації. В усіх випадках розрахункові значення граничної деформації в 2÷4 рази менше, ніж значення накопиченої деформації в точці перетину даної траєкторії з кривою граничних деформацій при стаціонарному навантаженні.

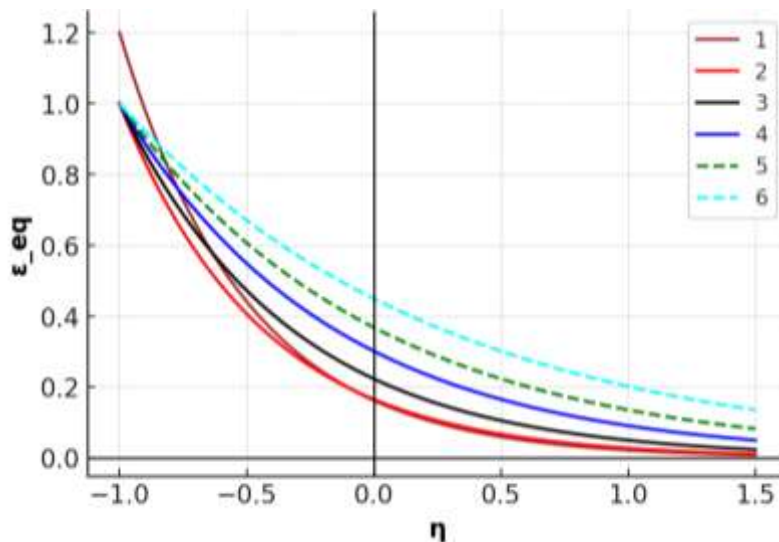


Рис. 4 Дослідження деформовності матеріалу заготовок при прямому витискуванні методом ШО: 1- траєкторія деформування (4.), $a=1.7$, $b=-1$, $c=0.08$, $m=0.02$; 2 – крива граничних деформацій сплаву 6061 – розрахунок за (5.) при $\varepsilon_{*y}(\eta=-1)=1.6$, $\varepsilon_{*y}(\eta=0)=0.4$, $\varepsilon_{*y}(\eta=1)=0.16$; 4, 5, 6 – криві накопичення пошкоджень – розрахунок за при $n=0.73, 1, 1.27$; \circ - розрахункові значення граничної деформації.

Аналіз отриманих даних показує, що порівняно з лінійним принципом накопичення пошкоджень, використання моделі на основі критерію В.А. Огороднікова зменшує розрахункове значення граничної деформації. Водночас, недотримання співвідношення (19) та призначення параметру нелінійності накопичення пошкоджень значень, які відповідають умові, призводить до збільшення розрахункового значення граничної деформації порівняно з лінійним підходом.

Основні результати дослідження. У процесі виробництва трубчастих деталей з днищами та горловинами, таких як ролики для конвеєрів, балони, гільзи та інші елементи, що використовуються в агропромисловому комплексі (АПК), важливу роль відіграють методи обробки тиском. Виготовлення таких виробів зазвичай включає в себе різноманітні операції, такі як витяжка, обтискування, роздавання, а також електрозварювання, яке застосовується в разі потреби. Одним з найбільш ефективних методів виробництва вісесиметричних трубчастих виробів є ротаційне обточування інструментом тертя, при якому нерухомий інструмент рухається вздовж осі обертання заготовки або перпендикулярно до неї.

Завдяки цьому методу можна досягти високої точності і симетричності виробів, що має особливе значення для забезпечення їх ефективного функціонування в різних галузях, зокрема в АПК. Однак, незважаючи на численні переваги, цей метод має певні недоліки. Перш за все, проблема виникає при використанні жорсткого інструменту або ролика з віссю обертання, паралельною осі заготовки. У цьому випадку кінематика деформування та тертя на контактній

поверхні не є оптимальними для процесу формування виробів. Така ситуація може призвести до зниження ефективності процесу і погіршення якості готових виробів.

Одним з основних аспектів, який ускладнює процес виробництва, є необхідність нагрівання заготовки перед обточуванням. Нагрівання необхідне для забезпечення стійкої формозміни, однак це вносить додаткові витрати, зменшує довговічність інструменту та заготовки, а також може негативно впливати на якість готових виробів. Проблема нагрівання полягає також у виборі оптимальних режимів, оскільки неправильний вибір температури та часу нагріву може призвести до дефектів у структурі матеріалу, що в свою чергу впливає на механічні властивості виробів. Такі умови призводять до нерівномірного розподілу напружень по всій площі контакту між інструментом і заготовкою, що може викликати дефекти у виготовлених виробах, наприклад, пошкодження поверхні, тріщини або нерівності. Кінематика деформування, за якої матеріал заготовки не переміщається в потрібному напрямку, також знижує ефективність процесу та може погіршити точність виготовлення. Через це, щоб забезпечити стійку і якісну формозміну, процес обточування вимагає обов'язкового нагрівання заготовки, щоб знизити її жорсткість і забезпечити плавну деформацію матеріалу [6].

Нагрівання заготовки є необхідним етапом, який дозволяє зменшити механічний опір матеріалу та полегшити його обробку, однак цей етап ускладнює процес виробництва і додає додаткові витрати на енергію. Зокрема, вибір режимів нагрівання стає ключовим фактором, оскільки недостатнє або надмірне нагрівання може



призвести до погіршення властивостей матеріалу. Зниження температури на ділянках, що підлягають обкочуванню, може спричинити нерівномірне розподілення температури в матеріалі, що в свою чергу негативно позначається на якості готових виробів. Крім того, використання нагріву додатково зменшує стійкість інструменту та зменшує термін служби заготовок. Це також може сприяти виникненню внутрішніх напружень, що збільшують ризик пошкодження матеріалу, зокрема, виникнення тріщин або інших дефектів, які знижують якість готових виробів.

Для подолання цих недоліків була обрана технологія штампування обкочуванням, яка дозволяє значно поліпшити процес виробництва деталей з днищами та горловинами. Цей метод дозволяє досягти необхідної форми та точності виробів без значних витрат на нагрівання заготовок.

Технологія ШО дозволяє значно знизити теплові та енергетичні витрати, що також має позитивний вплив на економічну ефективність виробництва. При ШО трубних заготовок циліндричним валком напрям плин матеріалу заготовки залежить переважно від величини та напрямку зміщення осі валка від осі поперечного перерізу заготовки δ , по відношенню до напрямку обертання заготовки [6]. При зміщенні валка у від'ємному напрямі ($\delta < 0$) (рис. 5), спостерігається плин металу до центру заготовки, що сприяє формуванню днищ і горловин. Зі збільшенням величини зміщення δ збільшується кут φ між векторами швидкості точок контактної поверхні заготовки і валка та посилюється інтенсивність плин металу у відповідному напрямі.

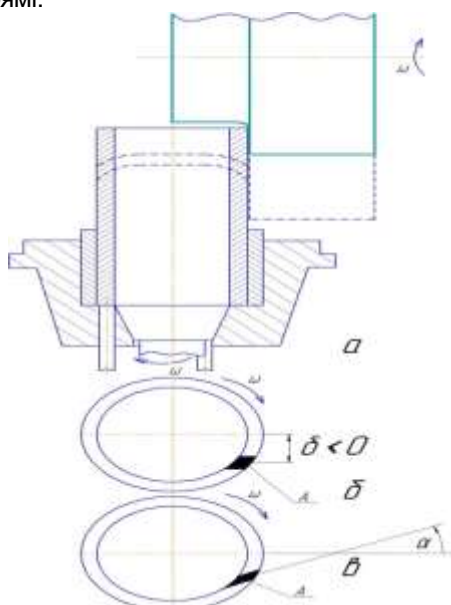


Рис. 5. Схема формування днища трубної заготовки

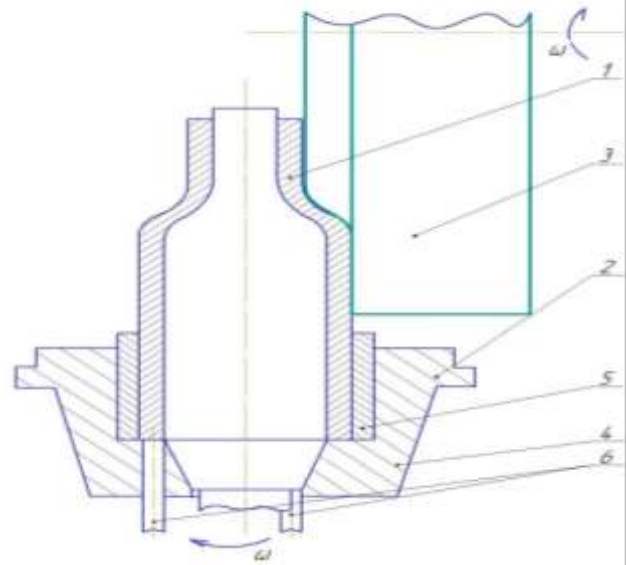


Рис. 6. Схема формування горловини трубної заготовки; 1 заготовки, 2 матриця, 3 валок циліндричний, 4 оправка, 5 втулка, штовхачі 6.

Кут між проекціями векторів швидкості точок циліндричного валка і заготовки на площину розкочування в місці контакту визначається співвідношенням.

$$\varphi = \arctg \sqrt{\left(\frac{\sqrt{R_e^2 - (h - R_e)^2} + \delta}{R} \right)^2}, \quad (20)$$

де R_e – радіус валка, h – глибина втискування валка, R – радіус заготовки.

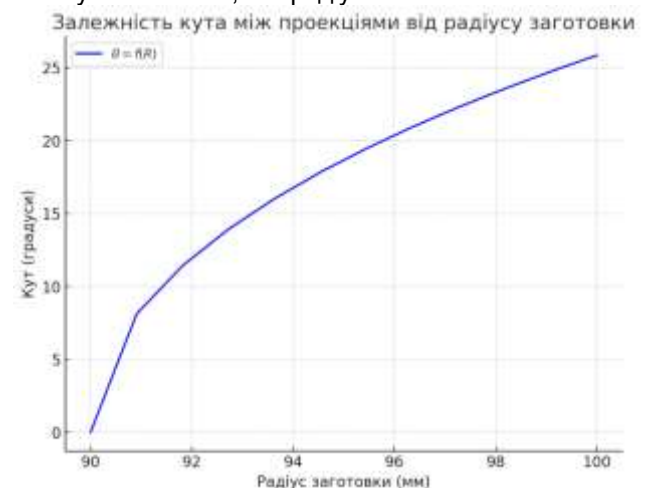


Рис. 7. Графік залежності кута між проекціями векторів швидкості точок циліндричного валка та заготовки на площину розкочування від радіусу заготовки R . Графік побудовано при значеннях $R_v=100$ мм (радіус валка) та $h=10h$ мм (глибина втискування).



Формуванню днищ і горловин при ШО сприяє також розміщення циліндричного валка з поворотом його вісі до вісі поперечного перерізу заготовки на кут α у напрямі протилежному напрямку обертання заготовки (рис. 5,6). Розміщення вісі валка під кутом α до вісі поперечного перерізу заготовки у напрямі протилежному напрямку її обертання і зміщення положення вісі валка по відношенню до вісі поперечного перерізу заготовки на величину $\delta < 0$, у напрямку протилежному плямі контакту, дає змогу управляти інтенсивністю течії металу до центру заготовки, а подача валка вздовж заготовки забезпечує високу жорсткість обкочувального блоку і дозволяє здійснювати калібрування заготовки на оправці. За даним способом на лобовому токарному верстаті ЛТ2 сформована обкочуванням горловини трубної заготовки деталь із сталі 10. При розмірах вихідної заготовки: довжина $L = 100\text{мм}$, зовнішній діаметр $D = 60\text{мм}$, товщина стінки $t = 2\text{мм}$, виготовлена деталь з горловиною, зовнішній діаметр якої $D_2 = 40\text{мм}$ і довжина $L = 25\text{мм}$.

За даним способом було сформовано також сферичне днище деталі „гільза” для апарату доїння корів із труби 45x2- 08X17 Т ДСТУ Т 9941-2012.

Висновки. У сучасному виробництві трубних деталей з горловинами та днищами, що використовуються в агропромисловому комплексі (АПК), ключовою задачею є забезпечення високої точності виготовлення та економічної ефективності процесу обробки. Одним з основних методів, який застосовується для виготовлення таких деталей, є обробка тиском, зокрема ротаційне обкочування інструментом тертя. Однак традиційні методи не завжди дозволяють досягнути бажаної точності та ефективності, особливо при використанні жорсткого інструменту або валка з віссю, паралельною осі заготовки.

Впровадження процесу штампування обкочуванням (ШО) дозволило значно розширити можливості виробництва трубних деталей з горловинами і днищами, збільшивши точність виготовлення до $\pm 0,5$ мм для зовнішнього діаметра та $\pm 0,3$ мм для товщини стінки.

Завдяки застосуванню ШО, теплові витрати на процес обробки заготовок зменшилися на 20-25%, що дозволило знизити загальні енергетичні витрати на виробництво на 15% порівняно з традиційними методами.

Виготовлені за допомогою ШО деталі (наприклад, горловини і днища) мають підвищену міцність на 18-22%, порівняно з

деталлями, виготовленими традиційним методом. Це дозволяє забезпечити довший термін експлуатації продукції в агропромисловому комплексі.

Визначено, що оптимальні параметри для обробки включають швидкість обертання валка 350 об/хв та зміщення осі валка на 2-3 мм, що дозволяє досягти високої точності та мінімізувати дефекти поверхні.

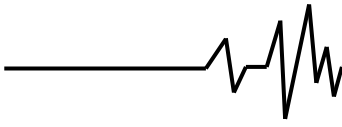
Завдяки комбінованому підходу, економія на енергозабезпеченні досягає 18-20% за рахунок зменшення необхідності в нагріванні заготовок і зниження енергетичних витрат на 10-15% порівняно з традиційними методами.

Використання ШО дозволяє зменшити знос інструменту на 12-15%, що суттєво продовжує термін служби обладнання і знижує витрати на його обслуговування та заміну.

Процес дозволяє ефективно виготовляти трубні деталі з різними геометричними характеристиками (наприклад, зовнішній діаметр 50-200 мм, товщина стінки 3-10 мм) з високою точністю, що відкриває можливості для виготовлення нових типів продукції для агропромислового комплексу.

Список використаних джерел

1. Калетнік Г.М. Перспективи підвищення енергетичної автономії підприємств апк в рамках виконання енергетичної стратегії України. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. 2019. №4 (104). С. 90–98.
2. Matviychuk V., Shtuts A. Construction of curve boundary deformations of metals. In: *Traditional and innovative approaches to scientific research: theory, methodology, practice: Scientific monograph*: Riga, Latvia: Baltija Publishing, 2022. P. 90-113.
3. Shtuts A., Kolisnyk M., Vydmysh A., Voznyak O., Baraban S., Kulakov P. Improvement of stamping by rolling processes of pipe and cylindrical blades on experimental research. *Key Engineering Materials*. 2020. Vol. 844. P. 168-181
4. Matviychuk V., Shtuts A., Kolisnyk M., Kupchuk I., Derevenko I. Investigation of the Tubular and Cylindrical Billets Stamping by Rolling Process with the Use of Computer Simulation. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. 2022. № 66 (1). P. 51-58.
5. Mykhalevych V.M, Kolisnyk M.A., Shtuts A.A. Study of the Stress–Strain State of the Material of the Blanks during Plastic Stamping by Rolling. *Metallophysics and Advanced Technologies*. 2025, vol. 47, No. 1, pp. 57-81.
6. Матвійчук В.А., Явдик В.В., Штуць А.А. Патент на винахід. Спосіб виготовлення вісесиметричних виробів з днищами і горловинами



штампуванням обкочуванням. № 116672. Публікація відомостей 25.04.2018. Бюл. № 8.

7. Матвійчук В.А., Колісник М.А., Штуць А.А. Побудова кривих граничних деформацій матеріалів. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2022. № 2 (105). С. 84-90.

8. Матвійчук В.А., Михалевич В.М., Штуць А.А. Аналіз напружено-деформованого стану матеріалу заготовок при висаджуванні ресурсощадним методом штампування. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2023. № 1 (120). С. 76-85.

9. Matviychuk V., Mikhalevich V., Shtuts A. Analysis of stress-strain state (sss) of billet material in the course of setting by resource-saving method of roll stamping. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2023. № 1 (108). С. 63-72.

10. Михалевич В.М., Штуць А.А., Колісник М.А. Дослідження процесів штампування обкочуванням за рахунок аналізу моделювання деформовності матеріалу заготовок. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2023. № 3 (122). С. 22-34.

11. Ogorodnikov V.A., Zyska T., Sundetov S. The physical model of motor vehicle destruction under shock loading for analysis of road traffic accident. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2018. 10808.

12. Матвійчук В. А., Михалевич В. М., Добрянюк Ю. В., Бубновська І.А. Спосіб визначення пластичності металів вальцюванням циліндричних зразків на клин. *МПК G01N 3/08 (2006/01)*. № 109984. Верес. 26. 2016.

References

1. Kaletnik H.M. (2019). Perspektyvy pidvyshchennia enerhetychnoi avtonomii pidpriemstv apk v ramkakh vykonannia enerhetychnoi stratehii ukrainy. *Visnyk ahramoi nauky Prychornomia*. №4 (104). S. 90–98. [in Ukrainian].

2. Matviychuk V., Shtuts A. (2022). Construction of curve boundary deformations of metals. In: *Traditional and innovative approaches to scientific research: theory, methodology, practice: Scientific monograph*. Riga, Latvia: Baltija Publishing. P. 90–113. [in Latvia].

3. Shtuts A., Kolisnyk M., Vydmysh A., Voznyak O., Baraban S., Kulakov P. (2020). Improvement of stamping by rolling processes of pipe and cylindrical blades on experimental research. *Key Engineering Materials*. Vol. 844. P. 168–181. [in Switzerland].

4. Matviychuk V., Shtuts A., Kolisnyk M., Kupchuk I., Derevenko I. (2022). Investigation of the Tubular and Cylindrical Billets Stamping by Rolling Process with the Use of Computer Simulation.

Periodica Polytechnica Mechanical Engineering. № 66 (1). P. 51–58. [in Hungary].

5. Mykhalevych V. M., Kolisnyk M. A., Shtuts A. A. (2025). Study of the Stress–Strain State of the Material of the Blanks during Plastic Stamping by Rolling. *Metallophysics and Advanced Technologies*. Vol. 47, No. 1. P. 57–81. [in Ukraine].

6. Matviychuk V. A., Yavdyk V. V., Shtuts A. A. (2018). Patent for invention. Method for manufacturing axisymmetric products with bottoms and necks by roll stamping. № 116672. Publication date: April 25, 2018. Bulletin № 8. [in Ukraine].

7. Matviychuk V. A., Kolisnyk M. A., Shtuts A. A. (2022). Construction of curve boundary deformations of materials. *Vibrations in Engineering and Technology*. № 2 (105). P. 84–90. [in Ukraine].

8. Matviychuk V. A., Mykhalevych V. M., Shtuts A. A. (2023). Analysis of the stress-strain state of billet material during upsetting by a resource-saving stamping method. *Tekhnika, Enerhetyka, Transport APK*. № 1 (120). P. 76–85. [in Ukraine].

9. Matviychuk V., Mikhalevich V., Shtuts A. (2023). Analysis of stress-strain state (SSS) of billet material in the course of setting by resource-saving method of roll stamping. *Vibrations in Engineering and Technology*. № 1 (108). P. 63–72. [in Ukraine].

10. Mykhalevych V. M., Shtuts A. A., Kolisnyk M. A. (2023). Study of roll stamping processes through analysis of deformability modeling of billet material. *Tekhnika, Enerhetyka, Transport APK*. № 3 (122). P. 22–34. [in Ukraine].

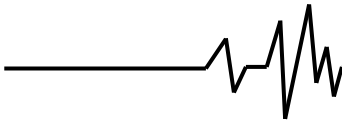
11. Ogorodnikov V. A., Zyska T., Sundetov S. (2018). The physical model of motor vehicle destruction under shock loading for analysis of road traffic accident. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. Vol. 10808. [in USA].

12. Matviychuk V. A., Mykhalevych V. M., Dobranyuk Yu. V., Bubnovska I. A. (2016). Method for determining the plasticity of metals by rolling cylindrical samples on a wedge. *IPC G01N 3/08 (2006/01)*. № 109984. September 26, 2016. [in Ukraine].

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGICAL PROCESSES FOR THE PRODUCTION OF TUBULAR COMPOSITE PRODUCTS WITH BOTTOMS AND NECKS BY STAMPING, ROLLING

The paper addresses the pressing issue of improving the plasticity of metals in cold roll stamping processes, which is crucial for ensuring high reliability and quality of finished products in modern manufacturing. One of the key aspects of these processes is determining the forming limit curves, which allow for an accurate assessment of the maximum permissible material deformations before failure.

Cold stamping processes involve complex metal deformations, leading to the accumulation of micro-damage in their structure. Such damage causes



material loosening, reducing its residual plasticity and increasing the risk of crack formation. The ability of a material to undergo plastic deformation without failure depends on several factors, including material properties, loading conditions, and the nature of the stress state.

Particular attention in this study is given to the influence of the stress state scheme on the plasticity of materials, as this factor largely determines material behavior during processing. The Nadai-Lode parameter is used for the quantitative assessment of the stress state, enabling the identification of critical conditions under which material failure may occur.

An innovative method for constructing forming limit curves is proposed, based on experimental data and considering the features of the material's stress-strain state under specific technological process conditions. This approach enhances the accuracy of

plasticity assessment, optimizes the parameters of cold roll stamping processes, and ensures the stability of product quality.

The practical application of the developed methodology contributes to increased production efficiency, a reduction in defect rates, and a lower probability of defects in finished products. The research results can be beneficial for engineers and technologists involved in developing modern metal forming processes. Furthermore, the proposed method has the potential for adaptation in other technological processes where considering the plastic properties of materials is essential.

Keywords: roll stamping, cylindrical roller, bottoms, necks, contact stresses, complex-profiled billets, research, technological capability analysis, mechanics, shape formation, complex-profiled products, stress-strain state, forces.

Відомості про авторів

Янович Віталій Петрович – д.т.н., професор, кафедри «Машин та обладнання сільськогосподарського виробництва» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна. yanovichvitaliy@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8152-7124>).

Штуть Андрій Анатолійович - к.т.н. старший викладач кафедри «Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, email: shtuts1989@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4242-2100>).

Гулько Ірина Василівна – кандидат технічних наук, доцент, кафедри Машин та обладнання сільськогосподарського виробництва Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: irynagunko@vsau.vin.ua, <https://orcid.org/0000-0001-5470-7413>).

Швець Людмила Василівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри агроінженерії та технічного сервісу Вінницького національного аграрного університету (ВНАУ, вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: shlv0505@i.ua, <https://orcid.org/0000-0002-4364-0126>).

Yanovych Vitalii – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Agricultural Machinery and Equipment of Vinnytsia National Agrarian University (St. Soniachna, 3, Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: yanovichvitaliy@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8152-7124>).

Shtuts Andrii - Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Vinnitsa National Agrarian University (3, Soniachna st. , Vinnitsa, 21008, Ukraine, email: shtuts1989@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4242-2100>).

Hunko Iryna - Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Agricultural Machinery and Equipment of Vinnytsia National Agrarian University (3 Sonyachna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: irynagunko@vsau.vin.ua, <https://orcid.org/0000-0001-5470-7413>).

Shvets Ludmila – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Agricultural Engineering and Technical Service Vinnytsia National Agrarian University (3 Sonyachna St., Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: shlv0505@i.ua, <https://orcid.org/0000-0002-4364-0126>).