

УМОВИ РУЙНУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБІЛЕЙ ПІД ЧАС ВИТЯГУВАННЯ ІЗ ЗНАКОЗМІННОЮ ДЕФОРМАЦІЄЮ ФЛАНЦЯ

Р. Г. Аргат, В. Т. Щетинін, В. Р. Пузир, О. М. Долгих

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

ORCID: 0000-0001-9247-5297; 0000-0003-0764-0396; 0000-0002-7704-1674; 0000-0002-6367-9714

Р. Г. Пузир

Коледж Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського

ORCID: 0000-0001-9791-9002

Попередня оцінка запасу пластичності на етапі проектування технологічних процесів сприяє їх інтенсифікації, зниження браку від руйнування матеріалу в процесі пластичної деформації, запобігання появи вм'ятин і задирів на напівфабрикатах, відхилень від технічних вимог. Показано, що практично всі операції листового штампування виконуються в умовах, близьких до плоского напруженого і об'ємно-деформованого стану. Для них характерно місцеве стоншення стінки заготовки, що приводить до утворення тріщини і руйнування, або втрата стійкості у вигляді виникнення гофрів і складок. Витягування без притискання зменшує металоємність оснащення і спрощує процес, але накладає певні умови на отримання якісних деталей. Представлені дві умови, які накладають обмеження для застосування методу витягування циліндричних деталей з кантуванням заготовки. Ці умови враховують механічні характеристики вихідного металу, накопичення ушкоджень в процесі пластичної деформації у вигляді ступеня використання ресурсу пластичності, а також основний технологічний фактор – коефіцієнт витягування, що представляє досліднику необхідний набір даних для проектування технологічного процесу. Для достатності інформації необхідно мати відомості про геометрію інструменту, коефіцієнт тертя і товщину металу.

Ключові слова: витягування, циліндрична деталь, кантування, коефіцієнт витягування.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Витягування без притискання зменшує металоємність оснащення і спрощує процес. Цьому способу деформування властива зменшена висота і коефіцієнти витягування в порівнянні з способом із застосуванням притискання [1, 16-18]. Прагнення інтенсифікувати штампування без притискання фланця заготовки призвело до створення великої кількості нових способів деформування і відповідного оснащення [2, 19].

Оцінка здатності до деформації металу, тобто його здатності до технологічної операції без локалізації деформацій, що передують руйнуванню, набуває належну увагу із зростаючими вимогами до якості продукції, що випускається промисловістю, раціонального використання металу, призначенням раціональних режимів деформування на кожній операції з метою зниження їх кількості і забезпечення функціональної надійності деталей [20-22]. Попередня оцінка запасу пластичності на етапі проектування технологічних процесів сприяє їх інтенсифікації, зниження браку від руйнування матеріалу в процесі пластичної деформації, запобігання появи вм'ятин і задирів на напівфабрикатах, відхилень від технічних вимог [1, 19, 23]. Формозміна заготовок здійснюється різними методами обробки металів тиском із складним напружено-деформованим станом. Механічні характеристики металу і умови деформування накладають певні обмеження на можливість граничного формоутворення [24-27]. Практично всі операції листового штампування виконуються в умовах, близьких до плоского напруженого і об'ємно-деформованого стану. Для них характерно місцеве стоншення стінки заготовки, що приводить до утворення тріщини і руйнування, або втрата стійкості у вигляді виникнення гофрів і складок [1, 28, 29].

Сутність способу полягає у витягуванні круглої заготовки до певної глибини з утворенням складок

на фланцевій частині, кантування заготовки на 180°, співвісне встановлення пуансону і матриці і деформування напівфабрикату в зворотному напрямку. Разом з цим відбувається розгладження і подальше утворення складок. Після декількох кантувань можна отримати необхідний діаметр і висоту готового виробу (рис. 1, а, б) [27, 30].

Для цього способу витягування характерна циклічність прикладання навантаження і кантуванням заготовки в процесі формозміни, що призводить до реверсу поля напружень і деформацій, які виникають на кожному етапі навантаження. Ці обставини, а також технологічні чинники процесу штампування накладають обмеження геометричного характеру і характеристики міцності на використання цього способу у виробництві.



а)



б)

Рисунок 1 – Витягування з кантуванням заготовки (матеріал – алюміній А2; діаметр заготовки – $D_{заг.}=86\text{мм}$): а – прямий хід пуансона (4-е кантування заготовки); б – зворотній хід пуансона (5-е кантування заготовки)

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Під час пластичної деформації заготовки с ізотропним зміцненням матеріал прийнято моделювати запропонованим законом Г. Бакхауза [6, 7]:

$$\alpha_{ij} = \frac{1-\beta(e)}{3} \sigma_0(e) \frac{d\varepsilon_{ij}}{e} - \frac{1}{3} \int_0^e [1-\beta(e^*)] \sigma_0(e^*) \varphi(e-e^*) \frac{d^2 e_{ij}}{de^{*2}} de^* \quad (1)$$

де $\sigma_0(e)$ – інтенсивність напружень, що є функцією накопиченої деформації e ; $de = \sqrt{2de_{ij}de_{ij}}/3de$ – приріст накопиченої деформації; $d\varepsilon_{ij}$ – компоненти приросту пластичних деформацій; e^* – змінна інтегрування; $\beta(e)$ – параметр, що характеризує ефект Баушінгера; $\varphi(e-e^*)$ – спадкова функція (або функція «пам'яті» матеріалу), що відображає властивості металу запам'ятовувати історію попереднього навантаження.

У роботах [6-8] показано, якщо в процесі пластичного деформування координата центру по поверхні навантаження дорівнюватиме $\alpha_{ij} = 0$, то матеріал ізотропно зміцнюється.

На підставі рівності $\alpha_{ij} = 0$, з урахуванням аналізу деформованого стану отримано рівняння для визначення величини деформації ε_2 коли матеріал знову стає ізотропним за механічними властивостями, наприклад, за умовною межею плинності [8]

$$[1-\beta(\varepsilon_2)] \sigma_0(\varepsilon_2) = [1-\beta(\varepsilon_1)] \sigma_0(\varepsilon_1) \varphi(\varepsilon_2 - \varepsilon_1). \quad (2)$$

Аналізуючи залежність (2) можна зробити висновки, що знакова змінна деформація ε_2 буде залежати від величини попередньої деформації і є її фу-

нкцією. Це можна записати у вигляді співвідношення

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1(f), \quad (3)$$

чи

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 + \Delta\varepsilon, \quad (4)$$

де $\Delta\varepsilon$ – приріст накопиченої деформації за зворотним деформуванням, що забезпечує ефект ізотропного зміцнення.

З огляду на співвідношення, прийняті для рівняння (2), залежність (4) можна представити таким чином

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 + \frac{[1-\beta(\varepsilon_2)] \sigma_0(\varepsilon_2)}{[1-\beta(\varepsilon_1)] \sigma_0(\varepsilon_1)}. \quad (5)$$

Її аналіз показує, що для набуття металом заготовки своїх початкових механічних характеристик, наприклад, межі плинності, необхідно під час реверсу навантаження повідомити заготовці деформацію зворотного знака, причому більшу за абсолютною величиною, ніж попередня пряма деформація. Приріст реверсної деформації є співвідношенням меж плинності матеріалу з урахуванням ізотропного зміцнення і коефіцієнтів Баушінгера для знакозмінної формозміни.

Але для отримання якісної деталі запропонованим способом необхідно не тільки вміти розрахувати кількість переходів і кантувань заготовки, що дозволяє нам формула (5), а й прогнозувати можливість її руйнування на певному етапі деформування.

Взагалі, численні експерименти з дослідження пластичності при симетричному циклі, виконані, головним чином, в рамках вивчення малоциклової втоми, показують, що пластичність при знакозмінній деформації вище, ніж під час монотонної, причому тим більше, чим менше амплітуда циклу [9].

Використання феноменологічної теорії руйнування для оцінки деформаційної здатності металу під час знакозмінної деформації стає можливим, якщо уявити приріст ступеня використання запасу пластичності на кожному етапі деформування у вигляді суми [9, 10]:

$$\psi_m = \xi_m + \varphi_m, \quad (6)$$

де ξ_m – пошкодження, які відновлюються під час зміни знака деформації; φ_m – необоротна ступінь використання запасу пластичності.

Обмеження характеристики міцності пояснюються міцністю зони передачі зусиль від пуансона до заготовки, яка знаходиться на радіусі заокруглення пуансона, де діють найбільші за величиною меридіональні розтягувальні напруження. Умова міцності для цієї зони виглядає наступним чином [2, 27] – $\sigma_{\max} \leq \sigma_p$, де $\sigma_p = \sigma_e(1+\delta_e)$ – істинний опір розриву; δ_e – відносне рівномірне подовження; σ_{\max} – найбільше розтягувальне напруження. Найбільше розтягувальне напруження залежить від сумарного опору деформації фланця заготовки. І, як випливає з теоретичного аналізу процесу витягування, складовими будуть: радіальні напруження розтягування і тангенціальні напруження стискання, які залежать від коефіцієнта витягування; напруження тертя заготовки від дзеркала матриці і притиску;

напруження тертя, викликані ковзанням фланця по витяжній кромці матриці; а також напруження вигинання, що виникають під час переміщення фланця за витяжною кромкою матриці. Визначення усіх вище перерахованих складових вимагає від інженера певних знань з теорії листового штампування і достатню кількість часу, що не завжди є на виробництві. Тому для обчислення цього критерію міцності обмежимося більш простим підходом, хоча і менш точним, запропонованим Шофманом Л. А. [2]. Відповідно до цього підходу максимальні значення радіальних розтягувальних напружень за умовою міцності можуть бути наближено визначені за залежністю:

$$\sigma_{\max} = \sigma_e \phi_1 (k - \phi'_1), \quad (7)$$

де ϕ_1 і ϕ'_1 – константи листового металу, зв'язані з рівномірним звуженням зразка ψ_p ; k – коефіцієнт витягування.

У таблиці 1 наведена залежність констант листового металу ϕ_1 і ϕ'_1 від рівномірного звуження ψ_p [2].

Таблиця 1 – Залежність констант листового металу ϕ_1 і ϕ'_1 від рівномірного звуження ψ_p

ψ_p	0,15–0,20	0,25–0,30	0,35–0,40
ϕ_1	0,75	0,8	0,85
ϕ'_1	1,0	1,1	1,15–1,20
ψ_p	0,15–0,20	0,25–0,30	0,35–0,40

Отже, виходячи з наведених співвідношень, умову міцності небезпечного перетину запишемо залежністю:

$$\phi_1 (k - \phi'_1) \leq (1 + \delta_e). \quad (8)$$

Тоді, враховуючи зв'язок рівномірного звуження зразка ψ_p з рівномірним відносним подовженням δ_e ,

$\delta_e = \frac{\psi}{1 - \psi}$, остаточно для умови міцності небезпечного перетину матимемо:

$$\phi_1 (k - \phi'_1) \leq \left(1 + \frac{\psi}{1 - \psi}\right). \quad (9)$$

Як видно з наведеної формули перше обмеження пов'язане з міцністю небезпечного перетину і залежить від механічних характеристик металу, а також від ступеню деформації заготовки, вираженої коефіцієнтом витягування.

Однак, як показують сучасні дослідження, прагнення до граничної формозміни під час пластичної деформації обмежується, наприклад, феноменологічними моделями руйнування. За базу в цих моделях приймається концепція накопичення пошкоджень металу під час пластичної деформації. В цей час феноменологічні моделі руйнування ізотропного матеріалу під час пластичної формозміни удосконалені в роботах Колмогорова В. Л., Богатова О. О., Степанського Л. Г., Деля Г. Д., Огороднікова В. А., Михалевича В. М. та ін. [3-8]. У них розглядаються два критерії руйнування – деформаційний і енергетичний. Тут характеристикою втрати стійкості заготовки у вигляді утворення тріщини служить ступінь використання ресурсу пластичності (Колмогоров В. Л.), пошкодження (Работнов Ю. М., Бога-

тов О. О.), використаний ресурс пластичності (Огородніков В. А.), тріщинуватість (Шібаков В. Г.), відносне вичерпання пластичності (Матвеев А. Д.) – відношення накопиченої інтенсивності деформацій до їх критичної величини, яка залежить від механічної схеми напруження і деформацій під час пластичної деформації. Величина ψ недеформованого металу повинна дорівнювати нулю, а умова руйнування $\psi=1$ (ψ – характеристика руйнування металу).

Критичні значення питомої роботи руйнування і інтенсивності деформацій визначаються діаграмами пластичності, які отримані експериментальними випробуваннями металу під час різних схем навантаження. Прийнято, що величина інтенсивності деформації і питома робота руйнування під час пластичної деформації в миттєвий момент руйнування істотно залежать від параметра виду напруженого стану Надаї-Лоде і показника напруженого стану. Далі визначається накопичення пошкоджень у процесі формозміни одним з принципів накопичення пошкоджень (лінійний або нелінійний). Однак ці моделі придатні для процесів пластичної деформації, які не враховують реверсивність докладання зусиль і повороту тензора напружень на 180° у кожному циклі деформування заготовки. Під час знакозмінної деформації друга головна вісь тензора швидкостей деформації зберігає своє становище відносно матеріальних волокон, а дві інші міняються місцями [9, 31].

З аналізу критеріїв руйнування, представлених в роботах Калпіна Ю. Г. виходить, що накопичена деформація у момент руйнування під час знакозмінної і монотонної деформації однакова. Це суперечить експериментальним даним [9]. Так, наприклад, у своїх роботах Сегал В. М. для досягнення високих значень деформації використовував метод багаторазового знакозмінного бокового видавлювання [10]. Автор досягав таким чином значення накопиченої деформації близько 20, тоді як монотонна деформація зразків дозволяє отримати значення накопиченої деформації до 1. Таким чином, на основі критерію, використаного Колмогоровим В. Л. (принцип лінійного накопичення пошкоджень) або Богатовим О. О., Делем Г. Д., Огородніковим В. А. і ін. (принцип нелінійного накопичення пошкоджень) визначити деформаційну здатність металу під час знакозмінної деформації неможливо. Формулу Менсона-Коффіна і узагальнену залежність Богатова О. О. слід вважати виключно експериментальними формулами [9]. Калпін Ю. Г. під час знакозмінного навантаження пропонує скористатися кількома критеріями пластичності, які засновані на феноменологічній моделі руйнування. У першому наближенні для технологічних розрахунків витягування з перемінним розтягуванням фланця скористаємося простим визначенням ступеню використання ресурсу пластичності. При цьому критерій руйнування під час знакозмінної деформації з будь-якою формою циклів і постійному на цьому етапі деформації значенні K , що впливає з феноменологічної теорії руйнування, має вигляд [9]:

$$\psi = \sum_{m=1}^L \psi_m - \sum_{m=1}^{L-1} \psi_m \frac{1 - \psi_m^{a-1}}{1 - \psi_m^a} = 1, \quad (10)$$

де m – номер етапу деформування; ψ_m – ступінь використання ресурсу пластичності на m -м етапі деформування; L – число етапів деформування; $L-1$ – число змін знаку деформування; a – константа матеріалу, яка визначається з дослідів шляхом знакозмінного кручення зразків у камері високого тиску.

Під час деформації відповідальних деталей, для яких встановлено граничне значення ступеня використання ресурсу пластичності $\psi < 1$ [13], необхідно, щоб ступінь використання ресурсу пластичності не перевищувала зазначеного значення протягом усього процесу знакозмінного деформування. Авторами [9, 11, 12] відзначається, що результати розрахунків граничної деформації для несиметричних або неоднакових циклах за формулою (10) і аналогічним розходяться.

З огляду на те, що під час знакозмінного кручення можна отримати тільки симетричний цикл деформування через нерівномірність деформації за довжиною зразка, дані за значеннями коефіцієнта a , наведені Богатовим О. О. [13, 14], розглядаються лише як наближені. Тому додатково проведена перевірка запропонованої методики розрахунку граничної деформації шляхом знакозмінного плоского осадку зразків зі сплаву АК4-1 (в стані поставки). З одного прутка виготовлено 80 зразків у формі паралелепіпеда з розмірами 30x20x20 мм [9, 13, 15]. Зразки були піддані деформації в щелевому штампі.

Для зменшення впливу сил контактної тертя на рівномірність деформації і показника напруженого стану між зразками і поверхнями штампа проклали поліетиленову плівку. В результаті зразки практично не отримували бочкоподібності.

На незначний вплив сил тертя вказує той факт, що руйнування зразків завжди відбувалося по площині, нахилений під кутом 45° до напрямку осадку, а не на вільній поверхні. Після кожного етапу осадку зразок повертали на 90° і проводили осадку в протилежному напрямку. Таким чином була досягнута сталість показника напруженого стану протягом кожного етапу і на різних етапах деформування, а також відсутність градієнта деформації і показника напруженого стану в об'ємі зразка. Якщо перша вимога задовольняється також і при знакозмінному крученні, то друга – не задовольняється.

Спочатку шляхом безперервного навантаження до руйнування була визначена гранична деформація $\varepsilon_p = 0,585$; середньоквадратичне відхилення ступеня використання ресурсу пластичності складо $\sigma_{\psi} = 0,065$. Далі 12 зразків були піддані знакозмінному осадку під час симетричного циклу; число етапів деформування становило від 3 до 17. За отриманими результатами було знайдено значення $a = 1,55$; разом з цим середньоквадратичне відхилення ступеня використання ресурсу пластичності складо $\sigma_{\psi} = 0,17$. Інші зразки доведені до руйнування знакозмінною осадкою за довільних форм і числі етапів деформування. В результаті встановлено, що за розрахунком ступеню використання ресурсу пластичності під час руйнування за формулою (10) середнє значення ста-

новить $\psi = 0,988$; середньоквадратичне відхилення $\sigma_{\psi} = 0,258$ [9, 32].

Отже формула (10) визначає другу умову, що до можливості витягування з перемінним розтягуванням фланця, яке дає можливість розрахувати ступінь використаного ресурсу пластичності після кожного кантування заготовки або прогнозувати принципову можливість виготовлення деталі даними способом.

ВИСНОВКИ. Проведені дослідження з оцінки здатності металу до технологічної операції без локалізації деформацій для методу витягування циліндричних деталей витягуванням з перемінним розтягуванням фланця. Представлені дві умови можливої застосування цього методу, які враховують механічні характеристики вихідного металу, накопичення ушкоджень в процесі пластичної деформації у вигляді ступеню використання ресурсу пластичності, а також основний технологічний фактор – коефіцієнт витягування, що представляє досліднику необхідний набір даних для проектування технологічного процесу. Для достатності інформації необхідно мати відомості про геометрію інструменту, коефіцієнт тертя і товщину металу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Пилипенко О. В. Обжим и раздача трубных заготовок из анизотропных материалов : монография. Тула : Тул. гос. ун-т, 2007. 150 с.
2. Михеев В. А., Зайцев В. М. Анизотропные материалы : электронное учебное пособие по практическим занятиям. Самара : СГАУ, 2010. 95 с.
3. Колмогоров В. Л. Напряжения. Деформации. Разрушение. Москва : Металлургия, 1970. 229 с.
4. Богатов А. А., Колмогоров В. Л. Условие разрушения металлов при знакопеременном деформировании с произвольной формой цикла. *Изв. ВУЗов. Черная металлургия*. 1973. № 4. С. 102–104.
5. Степанский Л. Г. Расчеты процессов обработки металлов давлением. Москва : Машиностроение, 1982. 217 с.
6. Бакхауз Г. Анизотропия упрочнения. Теория в сопоставлении с экспериментом. *Изв. АН СССР. Механика твердого тела*. 1976. № 6. С. 12–129.
6. Dell H., Gese H., Kepler L., Werner H. and Hooputra H. Continuous Failure Prediction Model for Nonlinear Load Paths in Successive Stamping and Crash Processes, SAE – Paper 2001-01-1131. New Sheet Steel Products and Steel Metal Stamping (SP-1614). *SAE 2001 world Congress, (Michigan, march 5–8)*. 2001. P. 113–122.
7. Огородников В. А., Кирица И. Ю., Муzychuk В. И. Диаграммы пластичности и особенности их построения. *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр.* Краматорськ. 2006. С. 251–255.
8. Хван А. Д., Евдокимова Н. А. Изотропное упрочнение материалов реверсивным кручением. *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*. Краматорск : ДГМА, 2009. № 1 (20). С. 36–40.
9. Калпин Ю. Г. Сопроотивление деформации и пластичность металлов при обработке давлением : учебное пособие по курсу “Теория обработки ме-

таллов давлением” для студентов специальности “Машины и технология обработки металлов давлением”. Москва : МГТУ МАМИ, 2005. 113 с.

10. Сегал В. М., Резников В. И. Пластическая обработка металлов простым сдвигом. *Изв. АН СССР. Металлы*. 1981. № 1. С. 115–123.

11. Аргат Р. Г., Пузырь Р. Г., Щипковский Е. В. Разработка метода расчета усилий профилирования при производстве ободьев колес транспортных средств. *Технології та інфраструктура транспорту* : матеріали міжнар. наук.-техн. конф. (м. Харків, 14–16 трав. 2018 р.). Харків : УкрДУЗТ, 2018. С. 73–74.

12. Сивак Р. І. Підвищення міцності елементів металокопункції обробкою тиском. *Сучасні технології в будівництві, економіці та дизайні*: матеріали всеукр. наук.-практ. конф. (Немирів, 4-5 квіт. 2019 р.). Немирів : Немирів. коледж будівництва, економіки та дизайну ВНАУ, 2019. С. 4.

13. Богатов А. А., Мижирицкий О. И., Смирнов С. В. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением. Москва : Металлургия, 1984. 144 с.

14. Алиева Л. И., Сивак Р. И., Коцобивская Е. И., Сухоруков С. И. Деформируемость заготовок при радиальном выдавливании с противодействием. *Обработка материалов давлением*. Краматорск : ДГМА, 2018. № 2. С. 96–104.

15. Коларов Д., Балтов А., Бончева Н. Механика пластических сред. Москва : Мир, 1979. 302 с.

16. Томсен Э., Янг Г., Кобаяши Ш. Механика пластической деформации при обработке металлов. Москва : Машиностроение, 1968. 504 с.

17. Аргат Р. Г., Пузырь Р. Г. Пути управления полем напряжений в операциях листовой штамповки. *Обработка материалов давлением: сб. науч. трудов*. Краматорск : ДГМА, 2012. № 4 (33). С. 100–104.

18. Sosenushkin E. N., Yanovskaya E. A., Sosenushkin A. E., Emel'yanov V. V. Mechanics of nonmonotonic plastic deformation. *Russian Engineering Research*. 2015. Vol. 35. No. 12. PP. 902–906.

19. Мовшович А. Я., Пузырь Р. Г. Расчет меридиональных напряжений, возникающих на первом переходе процесса радиально-ротационного профилирования ободьев колес. *Научно-технический и производственный журнал «Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением»*. 2013. № 10. С. 3–7.

20. Пузырь Р. Г., Троцко О. В., Черкашенко В. Ю. Влияние геометрических параметров цилиндрической заготовки на напряженно-деформированное состояние при раздате коническими пуансонами. *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*. Краматорск : ДГМА, 2012. № 4 (33). С. 114–121.

21. Моспан В. Д., Драгобецкий В. В., Пузырь Р. Г. Определение потребного крутящего момента при радиально-ротационном профилировании ободьев колес. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук : КДПУ, 2008. № 6 (53). частина 2. С. 64–66.

22. Аргат Р. Г., Пузырь Р. Г., Долгих О. Н. Распределение напряжений на вытяжном ребре матрицы при вытяжке цилиндрических заготовок. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. *Збірник наукових праць*. Серія: *Іноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*. Харків : НТУ «ХПИ», 2014. № 43 (1086). С. 8–13.

23. Сивак Р. И., Огородников В. А., Сивак И. О. Оценка пластичности металла при холодном двухэтапном деформировании. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Серія «*Машинобудування*». 2016. № 3 (78), С. 96–100.

24. Вольмир А. С. Устойчивость деформируемых систем. М.: Наука, 1967. 984 с.

25. Сивак Р. І., Рекечинський В. І. Особливості пластичної деформації металів при немонотонному деформуванні. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2019. № 2 (93). С. 50–55.

26. Аргат Р. Г., Пузырь Р. Г., Гайкова Т. В., Маркевич А. Г. Теоретичні дослідження напруженого стану на витяжному ребрі матриці при витягуванні циліндричних деталей. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. Тематичний випуск: *Машина і пластична деформація металу*. Кам'янське : ДДТУ, 2018. С. 153–158.

27. Пузырь Р. Г. Моделирование вытяжки цилиндрической детали без прижима фланца заготовки из изотропного и анизотропного металла. *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серія: *Новые решения в современных технологиях*. Харьков : НТУ «ХПИ», 2019. № 1. С. 58–66.

28. Аргат Р. Г., Пузырь Р. Г., Вакуленко Р. А. Влияние анизотропии и змцнення металу на втрату стійкості фланця при витягуванні циліндричної деталі без складкоутримувача. *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПИ": зб. наук. пр. Сер.: Іноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*. Харків : НТУ «ХПИ», 2018. № 31 (1307). С. 3–7.

29. Yang C., Li P., Fan L. Blank Shape Design for Sheet Metal Forming based on Geometrical Resemblance. *Procedia Engineering*. 2014. No. 81. PP. 1487–1492.

30. Wang G., Zhao G., Xia Sh., Luan Y. Numerical and experimental study of new cold precision forging technique of spear gears. *Trans. Nonferrous Metal Soc. China*. 2003. Vol. 13, No. 14. PP. 798–802.

31. Сивак Р. І. Визначення кінематики деформування на основі сплайн-апроксимації. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2020. № 2 (97). С. 101–107.

32. Калюжний В. Л., Запороженко А. С., Піманов В. В. Інтенсифікація технологій виготовлення виробу «Балон 180x184». *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*. Краматорск : ДГМА, 2012. № 2 (31). С. 136–140.

CONDITION OF DESTRUCTION OF VEHICLE PARTS DURING DRAWING WITH VARIABLE FLANGE DEFORMATION

R. Arhat, V. Shchetynin, V. Puzyr, O. Dolhikh

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

ORCID: 0000-0001-9247-5297; 0000-0003-0764-0396; 0000-0002-7704-1674; 0000-0002-6367-9714

R. Puzyr

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University College

ORCID: 0000-0001-9791-9002

Purpose. The assessment of the ability of the metal to deform, i.e. its ability to technological operation without localization of deformations preceding the destruction, is given due attention because of the growing demands on the quality of industrial products, the rational use of metal, the application of rational modes of deformation in each operation to reduce their number and ensuring the functional reliability of the parts. **Methodology.** The limitations of the strength characteristic are explained by the strength of the zone of the force transmission from the punch to the workpiece, which is located on the radius of rounding of the punch, where the largest meridional tensile stresses act. Therefore, the first limitation is related to the strength of the dangerous cross section and depends on the mechanical characteristics of the metal, as well as the degree of deformation of the workpiece, expressed by the coefficient of elongation. However, as modern research shows, the desire for ultimate deformation during plastic deformation is limited by phenomenological models of destruction. The concept of accumulation of metal damage during plastic deformation is the basis of these models. **Results.** Research on the assessment of the ability of metal to technological operation without localization of deformations for a method of drawing of cylindrical details by drawing with variable stretching of the flange is carried out. Two conditions of possible application of this method are presented. They take into account mechanical characteristics of source metal, accumulation of damages in the process of plastic deformation in the form of the degree of the use of plasticity resource, and also the basic technological factor – coefficient of extraction, which provides the researcher with the necessary data set for the design of the technological process. For sufficient information it is necessary to have data on the geometry of the tool, the coefficient of friction and the thickness of the metal. **Originality.** The approach and method of describing the deformation of the workpiece by drawing with sign-alternating deformation of the flange can be considered original. The application of the destruction criteria limits the use of this method of drawing, but allows prediction of the quality of the product. **Practical value.** The results of the research can be applied at various enterprises of automobile making and mechanical engineering where operations of drawing cylindrical parts are involved. The discussed restrictions are used during the technological preparation of production. References 32, tables 1, figures 1.

Key words: drawing, cylindrical part, canting, coefficient of drawing.

REFERENCES

1. Pilipenko, O. V. (2007). Obzhim i razdacha trubnykh zagotovok iz anizotropnykh materialov: monografiya [Compression and distribution of pipe blanks from anisotropic materials: monograph]. Tula, 150 p. [in Russian]
2. Mikheyev, V. A., Zaytsev, V. M. (2010). Anizotropnyye materialy: elektronnoye uchebnoye posobiye po prakticheskim zanyatiyam. [Anisotropic materials: electronic training manual for practical exercises]. Samara, 95 p. [in Russian]
3. Kolmogorov, V. L. (1970). Napryazheniya. Deformatsii. Razrusheniye [Deformations. Destruction] *Metallurgy*. Moscow, 229 p. [in Russian]
4. Bogatov, A. A., Kolmogorov, V. L. (1973). Usloviye razrusheniya metallov pri znakoperemennom deformirovanii s proizvol'noy formoy tsikla [Condition of fracture of metals at alternating deformation with an arbitrary shape of the cycle]. *Izv. VUZov. Chernaya metallurgiya* [Izv. Universities. Ferrous metallurgy], issue 4. pp. 102–104 [in Russian]
5. Stepanskiy, L. G. (1982). Raschety protsessov obrabotki metallov davleniyem [Calculations of metal pressure processing processes]. *Mechanical Engineering*. Moscow, 217 p. [in Russian]
6. Bakkhauz, G. (1976). Anizotropiya uprochneniya. Teoriya v sopostavlenii s yeksperimentom [Theory versus experiment]. *Izv. AN SSSR. Mekhanika tverdogo tela* [Izv. Academy of Sciences of the USSR. Rigid body mechanics], issue 6, pp. 12–129. [in Russian]
6. Dell, H., Gese, H., Kepler, L., Werner, H. and Hooputra, H. (2001). Continuous Failure Prediction Model for Nonlinear Load Paths in Successive Stamping and Crash Processes, SAE – Paper 2001-01-1131. New Sheet Steel Produkts and Steel Metal Stamping (SP-1614). *SAE 2001 world Congress, (Michigan, March 5–8)*, pp. 113–122.
7. Ohorodnykov, V. A., Kyrystsya, Y. Yu., Muzychuk, V. Y. (2006). Dyahrammy plastychnosti y osobennosti ykh postroeniya [Plasticity diagrams and features of their construction]. *Udoskonalennya protsesiv i obladnannya obrobky tyskom v metalurhiyi i mashynobuduvanni: zb. nauk. pr.* [Improving processes and equipment for pressure treatment in metallurgy and mechanical engineering: Coll. Science]. Kramatorsk, pp. 251–255. [in Russian]
8. Khvan, A. D., Yevdokimova, N. A. (2009). Izotropnoye uprochneniye materialov reversivnym krucheniyem [Isotropic hardening of materials by reverse torsion]. *Obrabotka materialov davleniyem: sbornik nauchnykh trudov* [Processing of materials pressure: collection of scientific works], *DGMA*. Kramatorsk, issue 1 (20), pp. 36–40. [in Russian]
9. Kalpin, Yu. G. (2005). Soprotivleniye deformatsii i plastichnost' metallov pri obrabotke davleniyem: uchebnoye posobiye po kursu “Teoriya obrabotki metallov davleniyem” dlya studentov spetsial'nosti “Mashiny i tekhnologiya obrabotki metallov davleniyem” [Resistance to deformation and plasticity of metals during pressure treatment: a textbook for the

course “Theory of metal pressure processing” for students of the specialty “Machines and technology for metal processing by pressure” *MGTU MAMI*. Moscow, 2005, 113 p. [in Russian]

10. Segal, V. M., Reznikov, V. I. (1981). Plasticheskaya obrabotka metallov prostym sdvigom [Plastic processing of metals by simple shear]. *Izv. AN SSSR. Metally* [Izv. Academy of Sciences of the USSR. Metals], issue 1, pp. 115–123. [in Russian]

11. Argat, R. G., Puzyr, R. G., Shchipkovsky, E. V. (2018). Razrabotka metoda rascheta usilyi profilirovaniya pri proizvodstve obod'ev koles transportnykh sredstv [Development of a method for calculating the efforts of profiling in the production of wheel rims for vehicles]. *Tekhnolohiyi ta infrastruktura transportu : materialy mizhnar. nauk.-tekh. konf.* [Technologies and infrastructure of transport: materials intern. scientific and technical conf.]. Kharkiv, May 14–16, 2018, pp. 73–74. [in Russian]

12. Sivak, R. I. (2019). Pidvyshchennya mitsnosti elementiv metalokonstruktsiy obrobkoyu tyskom [Increasing the strength of elements of metal structures by pressure treatment]. *Suchasni tekhnolohiyi v budivnytstvi, ekonomitsi ta dyzayni: materialy vseukrayins'koyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi* [Modern technologies in construction, economics and design: materials of the all-Ukrainian scientific-practical conference]. Nemyriv, April 4–5, 2019, 4 p. [in Ukrainian]

13. Bogatov, A. A., Mizhiritskiy, O. I., Smirnov, S. V. (1984). Resurs plastichnosti metallov pri obrabotke davleniyem [Resource plasticity of metals during pressure treatment] *Metallurgy*. Moscow, 144 p. [in Russian]

14. Alieva, L. I., Sivak, R. I., Kotsyubivskaya, E. I., Sukhorukov, S. I. (2018). Deformiruyemost' zagotovok pri radial'nom vydavlivanii s protivodavleniyem [Deformability of workpieces during radial extrusion with back pressure]. *Obrabotka materialov davleniyem* [Material processing], issue 2, pp. 96–104. [in Russian]

15. Kolarov, D., Baltov, A., Boncheva, N. (1979). *Mekhanika plasticheskikh sred* [Mechanics of plasticity] Mir. Moscow, 302 p. [in Russian]

16. Thomsen, E., Young, G., Kobayashi, Sh. (1968). *Mekhanika plasticheskoy deformatsii pri obrabotke metallov* [Mechanics of plastic deformation in metal processing] *Mechanical engineering*. Moscow, 504 p. [in Russian]

17. Arhat, R. G., Puzyr, R. G. (2012). Puti upravleniya polem napryazheniy v operatsiyakh listovoy shtampovki [Ways to control the stress field in sheet stamping operations]. *Obrabotka materialov davleniyem: sbornik nauchnykh trudov* [Processing of materials pressure: collection of scientific works], *DGMA*. Kramatorsk, issue 4 (33), pp. 100–104. [in Russian]

18. Sosenushkin, E. N., Yanovskaya, E. A., Sosenushkin, A. E., Emel'yanov, V. V. (2015). Mechanics of nonmonotonic plastic deformation. *Russian Engineering Research*. Vol. 35, issue 12, pp. 902–906. [in English]

19. Movshovich, I. Ja., Puzyr, R. G. (2013). Raschet meridional'nykh naprjazhenij na pervoj operatsii processa

radial'notacionnogo profilirovaniya obod'ev koles [Calculation of meridional stresses on the first operation of the process of radial-rotary profiling of wheel rims]. *Kuznechnoshtampovnochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem* [Forging and stamping production. Pressure treatment], issue 10, pp. 3–7. [in Russian]

20. Puzyr, R. G., Trotsko, O. V., Cherkashchenko, V. Y. (2012). Vliyanie geometricheskikh parametrov tsilindricheskoy zagotovki na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie pri razdache konicheskimi puansonami [Influence of geometrical parameters of cylindrical preparation on the intense deformed state at distribution by conic punches]. *Obrabotka materialov davleniyem: sbornik nauchnykh trudov* [Processing of materials pressure: collection of scientific works], *DGMA*. Kramatorsk, issue 4 (33), pp. 114–121. [in Russian]

21. Mos'pan, D. V., Dragobekij, V. V., Puzyr, R. G. (2008). Opredelenie potrebnogo krutjashhego momenta pri radial'no-rotacionnom profilirovanii obod'ev koles [Determination of the required torque at radial-rotational profiling of wheel rims]. *Visnik Kremenchuc'kogo derzhavnogo politehnicnogo universitetu imeni Mihajla Ostrogradsk'kogo* [Bulletin of the Kremenchug State Polytechnic University named after Mikhail Ostrogradsky] *KDPU*. Kremenchuk, issue 6 (53), part 2, pp. 64–66. [in Russian]

22. Arhat, R. G., Puzyr, R. G., Dolgih, O. N. (2014). Raspredeleniye napryazheniy na vytyazhnom rebre matritsy pri vytyazhke tsilindricheskikh zagotovok [Distribution of stresses on the drawing edge of the matrix during drawing out of cylindrical blanks]. *Visnyk Nats. tekhn. un-tu “KHPI”*: zb. nauk. pr. Ser.: Innovatsiyini tekhnolohiyi ta obladnannya obrobky materialiv u mashynobuduvanni ta metalurhiyi [Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy] NTU “KhPI”. Kharkiv, issue 43 (1086), pp. 8–13. [in Russian]

23. Sivak, R. I., Ogorodnikov, V. A., Sivak, I. O. (2016). Otsenka plastichnosti metalla pri kholodnom dvukhetapnom deformirovanii [Estimation of metal plasticity during cold two-stage deformation]. *Visnyk Nats. tekhn. un-tu “KHPI”*: zb. nauk. pr. Ser.: Innovatsiyini tekhnolohiyi ta obladnannya obrobky materialiv u mashynobuduvanni ta metalurhiyi [Bulletin of the National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”. Mechanical Engineering Series], issue 3 (78), pp. 96–100 [in Russian]

24. Volmir, A.S. (1967). Ustoychivost' deformiruyemykh sistem [Stability of deformable systems] *Nauka*. Moscow, 984 p. [in Russian]

25. Sivak, R. I., Rekechynsky, V. I. (2019). Osoblyvosti plastychnoyi deformatsiyi metaliv pry nemonotonnomu deformuvanni [Features of plastic deformation of metals at nonmonotonic deformation]. *Vibratsiyi v tekhnitsi ta tekhnolohiyakh* [Vibrations in engineering and technology], issue 2 (93), pp. 50–55. [in Ukrainian]

26. Arhat, R. G., Puzyr, R. G., Haikova, T. V., Markevych, A. G. (2018). Teoretychni doslidzhennya napruzhenoho stanu na vytyazhnomu rebri matrytsi pry vytyahuvanni tsylindrychnykh detaley [Theoretical

studies of the stress state on the exhaust edge of the matrix during the extraction of cylindrical parts]. Zbirnyk naukovykh prats' Dniprovs'koho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu (tekhnichni nauky). Tematychnyy vypusk: Mashyny i plastychna deformatsiya metalu [Collection of scientific works of the Dnieper State Technical University (technical sciences). Thematic issue: Machines and plastic deformation of metal] *DSTU*. Kamyanske, pp. 153–158. [in Ukrainian]

27. Puzyr, R. G. (2019). Modelirovaniye vytyazhki tsilindricheskoy detali bez prizhima flantsa zagotovki iz izotropnogo i anizotropnogo metalla [Modeling the drawing of a cylindrical part without clamping the workpiece flange made of isotropic and anisotropic metal]. *Visnyk Nats. tekhn. un-tu "KHPI": zb. nauk. pr. Ser.: Novyye resheniya v sovremennykh tekhnologiyakh* [Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies] *NTU "KhPI"*. Kharkiv, issue 1, pp. 58–66. [in Ukrainian]

28. Arhat, R. G., Puzir, R. G., Vakulenko, R. A. (2018). Vplyv anizotropiyi i zmitsnennya metalu na vtratu stiykosti flantsya pry vytyahuvanni tsylindrychnoyi detali bez skladkoutrymuvacha [Innovative technologies and equipment for materials processing in mechanical engineering and metallurgy]. *Visnyk Nats. tekhn. un-tu "KHPI": zb. nauk. pr. Ser.: Innovatsiyni tekhnolohiyi ta obladnannya obrobky*

materialiv u mashynobuduvanni ta metalurhiyi [Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy] *NTU "KhPI"*. Kharkiv, issue 31 (1307), pp. 3–7. [in Ukrainian]

29. Yang, C., Li, P., Fan, L. (2014). Blank Shape Design for Sheet Metal Forming based on Geometrical Resemblance. *Procedia Engineering*. Issue 81, pp. 1487–1492. [in English]

30. Wang, G., Zhao, G., Xia, Sh., Luan, Y. (2003). Numerical and experimental study of new cold precision forging technique of spear gears. *Trans. Nonferrous Metal Soc. China*. Vol. 13, issue 14, pp. 798–802. [in English]

31. Sivak, R. I. (2020). Vyznachennya kinematyky deformuvannya na osnovi splayn-aproksymatsiy [Determination of deformation kinematics based on spline approximations]. *Vibratsiyi v tekhnitsi ta tekhnolohiyakh* [Vibrations in engineering and technology], issue 2 (97), pp. 101–107. [in Ukrainian]

32. Kalyuzhny, V. L., Zaporozhchenko, A. S., Pimanov, V. V. (2012). Intensyfikatsiya tekhnolohiy vyhotovlennya vyrobu «Balon 180x184» [Intensification of manufacturing technologies of the product «Cylinder 180x184»]. *Obrabotka materialov davleniyem: sbornik nauchnykh trudov* [Processing of materials pressure: collection of scientific works] *DGMA*. Kramatorsk, issue 2 (31), pp. 136–140. [in Ukrainian]

Стаття надійшла 12.01.2021.