

Пузир Р.Г., Савелов Д.В., Качмар Р.Я., Дмитрів І.В., Козлов Р.Р., Єрух Є.І.  
*Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, Україна*  
*Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна*

## ОБҐРУНТУВАННЯ РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА РЕМОНТУ З'ЄДНУВАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ВИХЛОПНОЇ СИСТЕМИ АВТОМОБІЛІВ

Показано, що вихлопна система транспортного засобу руйнується під впливом корозії та механічних навантажень. Особливо схильні до пошкоджень любого типу зони з'єднання перехідних діаметрів, які виконані зварюванням або поєднанні з натягом. Для підвищення зносостійкості та міжремонтного періоду компонентів необхідно збільшувати товщину стінок складових механізму вихлопу. Але це призводить до зростання ваги агрегатів та маси автомобіля, що не бажано. У статті запропонований спосіб виготовлення та ремонту з'єднувальних патрубків вихлопної системи шляхом отримання розтрубів з мінімальним потоншенням торця готового виробу. Розроблені загальні рекомендації щодо проектування технологічного процесу виготовлення та ремонту таких елементів. Складність та тривалість підготовки виробництва та ремонту, а також відносна висока вартість штампового обладнання вимагають ретельної розробки технологічних процесів та обґрунтованого вибору технічно раціонального та економічно найбільш ефективного варіанту технологічного процесу, який відповідає даному типу виробництва. Навіть невеликі наступні зміни технологічних процесів зазвичай призводять до перероблення штампів або до проектування та виготовлення нових, що вимагає значного часу та коштів. Також запропоновані коефіцієнти роздавання для двох матеріалів трубчатих заготовок сталі 12X18H10T та алюмінію АД1, рекомендовані змашувальні речовини, які зменшують коефіцієнт тертя між заготовкою та інструментом в осередку пластичної деформації. Запропонований спосіб роздавання несиметричним інструментом дозволяє збільшити товщину крайової частини у порівнянні з класичним роздаванням за рахунок появи дотичних напружень, які розвантажують осередок деформації. За рахунок такого розвантаження тангенціальні нормальні напруження, що розтягують, зменшуються по модулю, що призводить до збільшення товщини готового виробу.

**Ключові слова:** вихлопна система, ремонт, виготовлення, автомобіль, пластична деформація, розтруб, роздавання.

### ВСТУП

Вихлопна система транспортних засобів являє собою сукупність агрегатів, які з'єднані з двигуном магістральними металевими патрубками. З'єднання можуть бути фланцеві та суцільні. Суцільні з'єднання нероз'ємні, в основному, зварні, які утворюються між трубками різного діаметру [1]. Для отримання суцільного зварного з'єднання труб різного діаметру необхідно створити методами холодної обробки тиском на трубі меншого діаметру розтруб (перехідну конусну поверхню), а потім проводити зварювальні операції [2].

### АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

В процесі експлуатації транспортних засобів відбувається руйнування зварних з'єднань та компонентів вихлопної системи в загалом. Більшість сучасних автомобілів обладнано бензиновими або дизельними двигунами внутрішнього згоряння. Функціонування таких двигунів засноване на стисканні та згорянні палива вибухом, що створює вибуховий фронт, високу температуру, утворення великої кількості продуктів згоряння, які відводяться у випускний колектор та далі у атмосферу. Робота вихлопних елементів заснована на відведенні відпрацьованих газів, зниженні шуму, очищенні газів та корекції роботи двигуна. Через постійний вплив високих температур, агресивних хімічних речовин і механічних навантажень, різні компоненти цієї системи схильні до зношування та пошкоджень. Сукупність різних видів навантажень визначає вкрай важкі умови роботи кожного елемента системи. Тому актуальним залишається завдання рівної міцності, стійкості та надійності всіх компонентів та з'єднувальних патрубків, які сполучають ці частини.

Аналіз літературних джерел показав, що питанню причин зносу елементів вихлопної частини автомобіля приділено багато уваги. Так Т. Šolić та інші [3] з'ясували, що превалюючий знос компонентів вихлопу автомобіля відбувається з-за хімічної корозії. Найбільше пошкодження пов'язано із глушником, де накопичуються частки сажі та конденсат. Також корозія часто виникає на трубках у місцях зварних з'єднань. Зварний шов вважається найслабшою частиною структури і зазвичай першим страждає від корозії [4]. Іншою поширеною причиною несправностей є трубні з'єднання, виконані без зварювання, де недостатня стійкість з'єднання призводить до витoku вихлопних газів та, як наслідок, до розвитку механізмів корозійного руйнування [5]. Інші дослідники ще більше

заглиблюються у проблеми зносостійкості елементів вихлопної системи, де виділяють різні механізми руйнування, які обмежують термін служби агрегатів. Так, у дослідженні [6] класифіковані різні види корозії, які виникають в процесі експлуатації. Це високотемпературна, волога та сольова корозія, а також хімічні реакції між матеріалом та компонентами вихлопної суміші.

Дослідження [7, 8] на основі факторів руйнування ключових елементів вихлопної ланки (механічне руйнування при підвищеній температурі, корозійне розтріскування, міжкристалічна корозія) пропонують вибирати відповідні матеріали, виходячи з критеріїв маси, вартості, термічної (понад 800°C для колектора та понад 400°C для інших частин) та високої корозійної стійкості. Найбільш пристосованими матеріалами виявилися феритна нержавіюча сталь марок AISI 409, AISI 439, аустенітна нержавіюча сталь марок AISI 304, AISI 316, AISI 316Ti та алюмінізована сталь.

Зважаючи на існуючі результати досліджень, очевидним стає розуміння ролі товщини стінки елементів вихлопної системи та з'єднувальних патрубків у продовженні строку експлуатації. З одного боку виявляється, що складові вихлопу з більшою товщиною ребер та стінок краще протистоять корозії та механічним пошкодженням, з іншого – збільшується маса кожного компоненту, що збільшує вагу транспортного засобу в цілому. Також ослабленими зонами вважаються міста з'єднань труб з складовими механізмів вихлопу та між собою. Маються на увазі зварні з'єднання та стики з натягом [9].

### ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Тому, виходячи з вище викладеного, метою роботи було формування рекомендацій щодо процесу виготовлення та ремонту патрубків вихлопної системи транспортного засобу з підвищеною товщиною стінки розтруба. Для цього були поставлені та вирішені наступні завдання: а) розробка загальних рекомендацій до проектування технологічного процесу виготовлення та ремонту з'єднувальних елементів; б) розробка рекомендацій щодо ступені роздавання циліндричних заготовок та для використання мастильних матеріалів; в) конструювання геометричних характеристик пропонованого деформуючого інструменту.

### РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Труби механізму вихлопу автомобіля з'єднують між собою працюючі агрегати: випускний колектор, гофру, каталітичний нейтралізатор, резонатор, глушник та лямбда-зонд. Діаметр зон стику цих складових та поєднувальних труб не завжди співпадає. Тому для отримання надійного контакту діаметр патрубків розширюють на торцях (рис. 1). Для цього застосовується операції холодної обробки тиском, такі як роздавання та обкочування роликками. Обкочування роликками використовують для ремонту на СТО, роздавання – для виготовлення. Або комбінують ці способи для отримання виробу мінімальної собівартості.



Рисунок 1. Місце перехідного діаметру на з'єднувальному патрубку вихлопної системи автомобіля Mercedes W203 та S203.

Як показує практика, під час роздавання труби торцева її частина, яка збільшується у діаметрі, потоншується. Зменшення товщини стінки залежить від коефіцієнта роздавання та умов тертя між заготовкою та інструментом. З точки зору експлуатаційної стійкості такі зони трубопроводів

зменшують надійність з'єднань та строк їх роботи. У роботі [10] представлено спосіб отримання розтрубу на трубній заготовці, де товщина торцевої частини збільшена на 22,5% у порівнянні з деформацією за класичною схемою. Приводяться чисельні розрахунки та схеми формоутворення. Але не надано рекомендацій технологічного характеру щодо організації технічної підготовки та реалізації способу в умовах діючого виробництва та СТО.

Технологічний процес роздавання трубної заготовки несиметричним інструментом проектується на основі діючих технологічних процесів на виробництві за класичними схемами. Основною відмінністю під час проектування буде розділення однієї операції на два переходи зі зміною інструменту. З точки зору технологічності конструкції поява додаткового переходу та інструменту зменшує технологічність деталі в умовах багатосерійного та масового виробництва. Але збільшення товщини торця заготовки може призвести до економії матеріалу, що в цілому спричинить загальну економічність процесу.

Аналіз собівартості відштампованих деталей показав, що економія матеріалу на 10% еквівалентна збільшенню продуктивності праці у 3 рази на всіх операціях [11]. А економія металу на 20-25% не тільки у рази підвищує технологічність конструкції деталі, а й призводить до того, що вартість металу, який зекономлений, зазвичай перевищує суму прямої заробітної плати [12].

Під час побудови технологічного процесу роздавання вирішують основні технологічні питання: встановлюється характер, кількість, послідовність та сумісність операцій. До основних операцій роздавання належать такі: нарізання трубного прокату на мірні заготовки, зачищення заусенцю та пластична деформація крайових зон з однієї або двох сторін. Кількість операцій залежить від допустимого для даного металу коефіцієнту роздавання, який розраховується на стадії проектування технологічного процесу. Якщо під час розрахунків виявляється, що за одну операцію не можливо отримати задану конфігурацію деталі, то проектується друга операція з рівномірним розподілом степені деформації між ними. Між операціями вводиться проміжний відпал.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень, наведені у роботі [13], дозволяють рекомендувати збільшити коефіцієнт роздавання для матеріалу заготовок зі сталі 12X18H10T та технічного алюмінію АД1. Степінь роздавання може бути збільшена також і для інших металів та сплавів, але для цього необхідно проводити додаткові дослідження безпосередньо на виробництві під час пробних переходів. Рекомендовані коефіцієнти роздавання подані у таблиці 1 [14].

Таблиця 1. Коефіцієнти роздавання

Матеріал	АД1	12X18H10T
Значення $K_p$ для класичного способу	1,4...1,35	1,47...1,35
Значення $K_p$ для асиметричного способу	1,5...1,4	1,55...1,48

Якщо під час роздавання кінців труб необхідно забезпечити збільшення товщини стінки конічної частини, то коефіцієнти роздавання вибирають з довідкових даних для класичних схем.

Важливим етапом проектування технологічного процесу є вибір змащувальної рідини. Мاستило зменшує тертя між пуансоном та заготовкою та поліпшує умови деформування. При цьому знижується загальне навантаження на недеформовану частину заготовки, що за граничними коефіцієнтами роздавання буде сприяти стійкості цієї зони. Однак, у тангенціальному напрямку покращення умов тертя не завжди сприяє позитивному ефекту. Річ у тому, що зменшення коефіцієнту тертя може привести до втрати стійкості у вигляді появи гофрів на конічній частині заготовки за рахунок зниження щеплення з інструментом [15]. Особливо цей ефект притаманний як раз деталям зі зварним швом, де хвилеподібно змінюється межа пластичності та міцності матеріалу. Тут може проявлятися локалізація деформацій у послабленій зоні термічного впливу, що значно стоншує товщину металу цих міст та може призвести до появи тріщини у меридіональному напрямку. Тому у таких випадках рекомендовано підбирати таку мастильну рідину, яка б забезпечувала не рідинний режим тертя, а граничний, або напівсухий [16]. Рекомендовані змащувальні рідини подані у таблиці 2 [17].

Таблиця 2. Мастильні матеріали для процесу роздавання трубних заготовок

Матеріал	Тип труби	В'язкість Па·с	Мастило, що рекомендується
Сталі вуглецеві: Ст.1, Ст.2, Ст.3, 10, 15, 20, 30	Труби електрозварні, водогазопровідні, безшовні гаряче деформовані	1,2- 1,3·10 <sup>2</sup>	Солідол, консталін синтетичний, ЯНЗ-2, ЛЗ-31
Корозійностійкі та Жаростійкі сталі: 10X17H13M2T, 12X18H10T і 20X23H18, 12X13, 12X17	Труби безшовні круглі (харчові та технічні)	1,6-12·10 <sup>2</sup>	ЦИАТИМ-202 ЦИАТИМ-203
Мідь М1, М1р, М2, М2р, М3, М3р	Водопровідні труби	0,8-6,0	20% каніфолі в касторовому мастилі
Латунь Л62, Л63, Л68, ЛС 59	Труби цільно тягнуті	1,5-10,0	Теж саме
Алюмінієві сплави А, АД, АД1, АМц	Труби цільно тягнуті	0,2-0,8	МС-14, МС20, турбінні та циліндрові мастила

Складність та тривалість підготовки виробництва, а також відносна висока вартість штампового обладнання вимагають ретельної розробки технологічних процесів та обґрунтованого вибору технічно раціонального та економічно найбільш ефективного варіанту технологічного процесу, який відповідає даному типу виробництва. Навіть невеликі наступні зміни технологічних процесів зазвичай призводять до переробленню штампів або до проектуванню та виготовленню нових, що вимагає значного часу та коштів.

Рекомендовано наступні етапи у розробці технологічних переходів роздавання та ремонту вихлопної системи:

1. Аналіз технологічності форми та конструктивних елементів деталі.
2. Визначення форми та розмірів заготовки, а також витрати матеріалу при найкращому його використанні.
3. Розробка найбільш раціонального технологічного процесу.
4. Встановлення типу, потужності та габаритів обладнання.
5. Відшукання типу та технологічної схеми штампу.
6. Визначення трудомісткості виготовлення деталей, що роздаються, а також кількості та розряду робочих на виробництві.

Під час розробки технологічних процесів роздавання повинні бути виконані наступні технологічні завдання: а) раціональне розкроювання матеріалу та визначення найменших розмірів заготовок; б) встановлення кількості та послідовності операцій; в) вибір ступеня складності операцій; г) встановлення кількості деталей, які одночасно роздаються; д) визначення операційних розмірів та операційних допусків.

### ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Класична технологія роздавання розтрубів на циліндричних заготовках реалізує схему вісесиметричної пластичної деформації, яка створює умови для рівномірного потоншення стінки заготовки від недеформованої частини до її торця. Роздавання несиметричним інструментом дозволяє збільшити товщину крайової частини у порівнянні з класичним роздаванням за рахунок появи дотичних напружень, які розвантажують осередок деформації. За рахунок такого розвантаження тангенціальні нормальні напруження, що розтягують, зменшуються по модулю, що призводить до збільшення товщини готового виробу. Ще одним позитивним моментом є те, що падіння рівня тангенціальних напружень зменшує навантаження на зварний шов під час пластичної деформації, як наслідок, зниження браку, за рахунок руйнування зварного шву. У роботі [18] отримано рівняння для розрахунку величини тангенціальних напружень в осередку деформації під час асиметричного роздавання розтрубу на циліндричній заготовці:

$$\sigma_{\theta} = \sigma_s \left( 1 - \frac{R_u^2}{2\rho^2} \left( \frac{\cos\theta}{\sin\alpha} + \frac{2}{3} \sin\theta \right) - \frac{R_u}{2\rho} \frac{\cos\theta}{\sin\alpha} \right), \quad (1)$$

де  $\sigma_s$  – межа текучості металу заготовки;  
 $R_u$  – радіус інструменту;  
 $\rho$  – поточна радіальна координата;  
 $\theta$  – кут, який визначає положення меридіану;  
 $\alpha$  – кут нахилу утворюючої пуансону.

Третій складовий виразу у дужках характеризує вплив дотичних напружень, які виникають за рахунок несиметричності осередку деформації. Виходячи з формули, можна зрозуміти, що найбільші за модулем дотичні напруження діють у зоні передачі зусилля, але в загалом зменшують тангенціальні.

Деформуючим інструментом під час роздавання є пуансон. Заготовка встановлюється вертикально на стіл пресу, затискається клиновими затискачами та роздається з робочим ходом траверси пресу. Зі зворотнім ходом траверси пуансон виходить із контакту з напівфабрикатом, зупиняється та заготовка переставляється.

Форма несиметричного пуансону у плані, робота якого досліджувалася, представлена на рис. 2 (а). Такий інструмент створює найбільш сприятливі умови для створення несиметричного осередку деформації. Різкий перепад діаметрів циліндричної та конічної частини сприяє виникненню дотичних напружень достатньої величини для розвантаження осередку пластичної деформації від дії розтягуючих тангенціальних зусиль. Але недоліком такої конструкції пуансону є гостра кромка на з'єднанні більшого напівкола з меншим. Це спричиняє концентрацію напружень та може привести до локалізації деформації та руйнуванню заготовки. Рекомендуються надавати цій зоні закруглення з максимально допустимим радіусом. Рекомендовано  $R_{\min}=5 - 8$  мм для  $k=1,4$ , що виходить з експериментальних та чисельних експериментів, коли рівень напружень у цій зоні зменшується та дорівнює вищій величині напружень для усього осередку деформації.

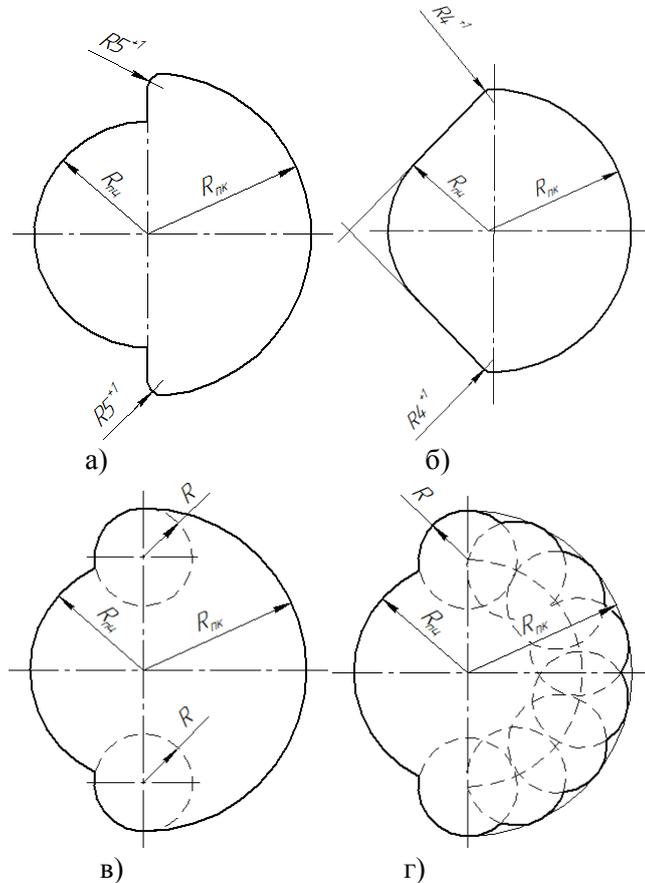


Рисунок 2. Конструкції пуансонів для формування несиметричного осередку деформації: а – з закругленням перехідної кромки; б – з перехідним конусом; в – зі сполученням колами; г – з конусною хвилеподібною поверхнею.

Деформуючий інструмент, зображений на рис. 2 (б) являє собою напівконічний пуансон. Більше напівколо з'єднане з меншим за допомогою дотичних прямих до меншого напівкола, що утворює перехідну конічну поверхню. Така форма у плані буде сприяти більш рівномірному розподілу деформацій по товщині заготовки. Цьому допомагає плавний перехід від зони більшого діаметру до меншого. Гострі кромки притуплюються під час виготовлення. Така будова пуансону використовується для отримання більшого коефіцієнту роздавання у порівнянні з класичними схемами. Використання інструменту запропонованої конструкції збільшить навантаження на перехідну зону за рахунок появи сил тертя по боковим прямолінійним стінкам, але при цьому зменшиться концентрація напружень у зоні переходу діаметрів.

Проекція у плані пуансону, зображеного на рис. 2 (в), являє собою з'єднання двох його половин за допомогою твірної кола, радіус якого дорівнює різниці радіусів більшого та меншого напівкіл. Така будова дозволяє зменшити концентрацію напружень у перехідній зоні та збільшити асиметричність інструменту. Так як у пластичну деформацію втягується більше матеріалу заготовки (у порівнянні з першим варіантом), то зусилля деформування теж буде рости. Тому під час роздавання за критичними коефіцієнтами роздавання може виникнути втрата стійкості недеформованої частини. З цієї точки зору рекомендовані коефіцієнти роздавання (табл. 1) необхідно зменшувати на 10 – 15%.

Пуансон, представлений на рис. 2 (г) відрізняється від попереднього наявністю хвилеподібної поверхні, яка утворена твірними кіл радіусом  $R$ , який дорівнює перепаду розмірів між конусною та циліндричною поверхнею. Центри цих кіл знаходяться на утворюючій циліндричної поверхні. Особливістю такої конструкції є конічна поверхня пуансону зі зменшеною площею дотику між інструментом та заготовкою, як у тангенціальному, так і в меридіональному напрямку. Це зменшує сили тертя та загальне зусилля деформування, що в загальному позитивно впливає на умови технологічного процесу пластичної деформації. Під час роздавання таким інструментом у тангенціальному напрямку виникає різномірний напружено-деформований стан. Конусна частина пуансону в загальному збільшує початковий діаметр циліндру і на цій ділянці виникають тангенціальні напруження, що розтягують. В свою чергу частини заготовки, які не контактують з інструментом (зони западин) намагаються повернути собі початкову форму та заповнюють западини. Ці зони знаходяться під впливом не тільки розтягуючих, а ще й стискаючих нормальних тангенціальних напружень. Такий розподіл напружень збільшує товщину стінки цих зон. Розвантаження осередку деформації за рахунок дотичних напружень також збільшує товщину стінок на торці для всієї зони деформування. Після калібруючого переходу метал заготовки перерозподіляється по товщині між зонами западин та виступів, що в цілому зменшує негативну радіальну складову деформації по всьому торцю. В меридіональному напрямку також зменшується навантаження на зону передачі зусилля за рахунок зменшення сил тертя, що підвищує стійкість недеформованої частини.

## ВИСНОВКИ

Таким чином, сформовані рекомендації до проектування технологічного процесу роздавання несиметричним пуансоном, основними з яких є: раціональне розкроювання матеріалу та визначення найменших розмірів заготовок; встановлення кількості та послідовності операцій та переходів; вибір ступеня складності операцій; встановлення кількості деталей, які одночасно роздаються; визначення операційних розмірів та операційних допусків.

Запропоновані конструкції несиметричного деформуючого інструменту, які дозволяють отримати розвантаження осередку деформації від дії тангенціальних розтягуючих напружень за рахунок виникнення дотичних та тим самим збільшити товщину стінки готового виробу. Також, за рахунок впровадження у виробництво та ремонтні майстерні таких пуансонів можна підвищити стійкість недеформованої частини заготовки, зменшуючи сили тертя у двох взаємно перпендикулярних напрямках. Локалізація деформацій відбувається у зоні переходу більшого діаметру у менший, що найбільш небезпечно для форми пуансону, яка досліджувалась у роботі. Результати досліджень показали, що навіть конструкція інструменту з різким переходом діаметрів забезпечує отримання якісних деталей з потовщеною стінкою торця деталі, коли витримані запропоновані коефіцієнти роздавання. З'єднувальні елементи вихлопної системи автомобіля зі збільшеною товщиною стінки підвищують строк експлуатації та міжремонтні періоди за рахунок кращого протистояння корозійним та механічним руйнівним впливам.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Bainschab M., Schriebl M. A., Bergmann A. Particle number measurements within periodic technical inspections: A first quantitative assessment of the influence of size distributions and the fleet emission reduction. *Atmospheric Environment*. 2020. X 8. P. 1-14.
2. Сивак Р.І. Пластичність металів при немонотонному навантаженні. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2015. №1(91). С. 108-111.
3. Šolić T., Marić D., Samardžić I. Analysis of the vehicle exhaust system corrosion and its effect on the eco-test result. *Metalurgija*. 2022. Vol. 61. 3-4. P. 841-844.
4. Hudec J., Šarkan B., Czödörövá R. Examination of the results of the vehicles technical inspections in relation to the average age of vehicles in selected EU states. *Transportation Research Procedia*. 2021. No 55. P. 2-9.
5. Puricelli S., Casadei S., Bellin T., Cernuschi S., Faedo D., Lonati G., Rossi T., Grosso M. The effects of innovative blends of petrol with renewable fuels on the exhaust emissions of a GDI Euro 6d-TEMP car. *Fuel*. 2021. No 294. P. 1-13.
6. Aniekan I. et al. Engineering Material Selection for Automotive Exhaust Systems Using CES Software. *International journal of engineering technologies-ijet*. 2017. Vol. 3. No 2. P. 50-60.
7. Ікпе А. Е., Овунна І., Ебуніло Р. О., Ікпе Е. Е. Material Selection for High Pressure (HP) Turbine Blade of Conventional Turbojet Engines. *American Journal of Mechanical and Industrial Engineering*. 2016. No. 1 (1). P. 1-9.
8. Zimmermann K. *Lightweight design in exhaust systems using tailored products*: 9th International CTI Forum Exhaust Systems, Stuttgart, January 26 2011. Stuttgart, Germany, 2011.
9. Пузир Р.Г., Левченко Р.В., Аргат Р.Г., Сіра Ю.Б., Пузир В.Р., Дятловська В.Л. *Моделювання матеріалу циліндричної заготовки зі зварним швом при обтиску-роздачі*: матеріали наук.-техн. конф. "Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта"(XXI), м. Київ, 6 – 9 жовт. 2020 р. Київ, 2020. С. 406-407. <https://doi.org/10.20535/2409-7160.2020.XXI.213010>.
10. Пузир Р., Аргат Р., Климов Е., Черненко С., Черниш А., Сіра Ю., Гайков Р. Асиметричне роздавання трубних перехідників автомобілів. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. Серія: *Нові рішення у сучасних технологіях*, 2023. № 1(15). С. 12–18. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2023.01.02>
11. Rojek I. Technological process planning by the use of neural networks. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*. 2017. No 31 (1). P. 1-15. doi:10.1017/S0890060416000147.
12. Srikar S. K., Navdeep Sh. D., Gurmeet S. Validation of erosion wear models for a stainless steel automobile exhaust manifold. *World Journal of Engineering*. 2024. <https://doi.org/10.1108/WJE-03-2024-0146>.
13. Puzyr R., Shchetynin V., Vorobyov V., Salenko A., Arhat R., Haikova T., Yakhin S., Muravlov V., Skoriak Yu., Negrebetskyi I. Improving the Technology for Manufacturing Hollow Cylindrical Parts for Vehicles by Refining Technological Estimation Dependences. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021. Vol. 6(1 (114)), P. 56–64. doi:10.15587/1729-4061.2021.244241.
14. Puzyr R., Klimov E., Chernish A., Chernenko S., Sira Y. The Optimal Conditions for Adding Strain to the Deformation Zone During the Expansion of Automobile Pipe Adapters. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. DSMIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham*. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7_11).
15. Калюжний В. Л., Олександренко Я. С., Куліков І. П. Розрахунково-експериментальний аналіз відкритої роздачі трубчастих заготовок. *Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування: збірник наукових праць*. 2014. № 1 (70). С. 63-68.
16. Maryin S.B., Phyto Wai Aung. Working Body for Deformation of Thin Walled Pipe Billets. *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 945. P. 628-633.
17. Min Ko Hlaing, Phone Htet Kyaw, Maryn B.N. Defect Analysis of Operating Hydro-Gasified Piping System. *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 1. P. 885.
18. Puzyr R. H., Shchetynin V. T., Arhat R. H., Sira Yu. B., Muravlov V. V., Kravchenko S. I. *Numerical modeling of pipe parts of agricultural machinery expansion by stepped punches*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Bucharest, 29th-30th October 2020, Bucharest, Romania 2020. Vol. 1018, 012013.

## REFERENCES

1. Bainschab M., Schriebl M. A. & Bergmann A. (2020) Particle number measurements within periodic technical inspections: A first quantitative assessment of the influence of size distributions and the fleet emission reduction. *Atmospheric Environment*, 8, 1-14.

2. Syvak R.I. (2015) *Plastychnist metaliv pry nemonotonnomu navantazheni. Tekhnika, enerhetyka, transport APK*, 1(91), 108-111.
3. Šolić T., Marić D. & Samardžić I. (2022) Analysis of the vehicle exhaust system corrosion and its effect on the eco-test result. *Metalurgija*, 61, 3-4, 841-844.
4. Hudec J., Šarkan B. & Czödörövá R. (2021) Examination of the results of the vehicles technical inspections in relation to the average age of vehicles in selected EU states. *Transportation Research Procedia*, 55, 2-9.
5. Puricelli S., Casadei S., Bellin T., Cernuschi S., Faedo D., Lonati G., Rossi T. & Grosso M. (2021) The effects of innovative blends of petrol with renewable fuels on the exhaust emissions of a GDI Euro 6d-TEMP car. *Fuel*, 294, 1-13.
6. Ikpe Aniekan E., Orhorhoro Ejiroghene Kelly & Gobir Abdulsamad (2017) Engineering Material Selection for Automotive Exhaust Systems Using CES Software. *International journal of engineering technologies-ijet*, 3, 2, 50-60.
7. Ikpe A. E., Owunna I., Ebunilo P. O. & Ikpe E. E. (2016) Material Selection for High Pressure (HP) Turbine Blade of Conventional Turbojet Engines. *American Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 1 (1), 1-9.
8. Zimmermann K. (Eds.). (2011) *Lightweight design in exhaust systems using tailored products, 9th International CTI Forum Exhaust Systems, 2011*. Stuttgart, Germany.
9. Puzyr R.H., Levchenko R.V., Arhat R.H., Sira Yu.B., Puzyr V.R. & Diatlovska V.L. (Eds.). (2020) *Modeliuvannia materialu tsylindrychnoi zahotovky zi zvarnym shvom pry obtysku-rozdachi, materialy nauk.-tekh. konf. "Prohresyva tekhnika, tekhnolohiia ta inzhenerna osvita"(XXI), 2020*. Kyiv, Ukraina. <https://doi.org/10.20535/2409-7160.2020.XXI.213010>.
10. Puzyr R., Arhat R., Klymov E., Chernenko S., Chernysh A., Sira Yu. & Haikov R. (2023) Asymetrychne rozdavannia trubnykh perekhidnykiv avtomobiliv. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Seria: Novi rishennia u suchasnykh tekhnolohiakh, 1(15), 12–18. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2023.01.02>.
11. Rojek I. (2017) Technological process planning by the use of neural networks. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 31 (1), 1-15. doi:10.1017/S0890060416000147.
12. Srikar S. K., Navdeep Sh. D. & Gurmeet S. (2024) Validation of erosion wear models for a stainless steel automobile exhaust manifold. *World Journal of Engineering*. <https://doi.org/10.1108/WJE-03-2024-0146>.
13. Puzyr R., Shchetynin V., Vorobyov V., Salenko A., Arhat R., Haikova T., Yakhin S., Muravlov V., Skoriak Yu. & Negrebetskyi I. (2021) Improving the Technology for Manufacturing Hollow Cylindrical Parts for Vehicles by Refining Technological Estimation Dependences. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(1 (114), 56–64. doi:10.15587/1729-4061.2021.244241.
14. Puzyr R., Klimov E., Chernish A., Chernenko S. & Sira Y. (Eds.). (2021) *The Optimal Conditions for Adding Strain to the Deformation Zone During the Expansion of Automobile Pipe Adapters, Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV, DSMIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7_11).
15. Kaliuzhnyi V. L., Oleksandrenko Ya. S. & Kulikov I. P. (2014) Rozrakhunkovo-eksperymentalnyi analiz vidkrytoi rozdachy trubchastykh zahotovok. *Visnyk NTUU «KPI»*. *Mashynobuduvannia: zbirnyk naukovykh prats*, 1 (70), 63-68.
16. Maryin S.B. & Phyto Wai Aung. (2019) Working Body for Deformation of Thin Walled Pipe Billets. *Materials Science Forum*, 945, 628-633.
17. Min Ko Hlaing, Phone Htet Kyaw & Maryn B.N. (Eds.). (2019) *Defect Analysis of Operating Hydro-Gasified Piping System, Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham.
18. Puzyr R.H., Shchetynin V.T., Arhat R.H., Sira Yu.B., Muravlov V.V., & Kravchenko S.I. (Eds.). (2020) *Numerical modeling of pipe parts of agricultural machinery expansion by stepped punches, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Bucharest, 2020*. Bucharest, Romania.

**R. Puzyr, D. Savielov, Roman Kachmar, I. Dmytriv, R. Kozlov, Ye. Yeruh. Justification of recommendations for the design of technological processes for manufacturing and repairing connecting elements in automotive exhaust systems**

Vehicle exhaust systems are damaged by corrosion and mechanical stress. Connection zones at diameter transitions, especially those welded or tensioned, are particularly vulnerable. Increasing wall thickness can improve wear resistance and extend repair intervals, but this also adds weight to the components and the vehicle, which is not desirable.

Therefore, the current task remains to increase the wear resistance and reliability of components with a simultaneous reduction in the weight of the vehicle without the use of expensive materials.

This article presents a method for manufacturing and repairing exhaust system connecting pipes by forming bells with minimal end thinning. It offers general recommendations for designing the manufacturing and repair processes. Due to the complexity, time requirements, and high cost of stamping equipment, careful process development and selection of the most technically and economically effective approach are essential. Even minor changes in the process often require redesigning or producing new dies, which can be time-consuming and costly.

Recommended distribution coefficients are provided for steel 12X18N10T and aluminum AD1, both commonly used in automotive exhaust units. The suggested lubricants effectively reduce friction between the blank and tools during plastic deformation as the blank diameter increases. These lubricants are readily available and have proven effective in various applications.

The proposed method of dispensing with an asymmetric tool increases the thickness of the edge part compared to classic dispensing. This happens due to the appearance of tangential stresses that unload the deformation center. Because of this unloading, tangential normal tensile stresses are reduced, which increases the thickness of the finished product. The route for manufacturing a bell on a pipe blank includes an additional transition compared to classic dispensing.

**Key words:** exhaust system, repair, manufacturing, car, plastic deformation, bell, dispensing.

*ПУЗИР Руслан Григорович*, доктор технічних наук, професор кафедри автомобілів і тракторів, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, e-mail: [puzyruslan@gmail.com](mailto:puzyruslan@gmail.com) <https://orcid.org/0000-0001-9791-9002>

*САВСЛОВ Дмитро Володимирович*, кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, e-mail: [dvsavelov@gmail.com](mailto:dvsavelov@gmail.com) <https://orcid.org/0000-0002-5170-9621>

*КАЧМАР Роман Ярославович*, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільний транспорт, Національний університет «Львівська політехніка», e-mail: [roman.y.kachmar@lpnu.ua](mailto:roman.y.kachmar@lpnu.ua) <https://orcid.org/0000-0002-5440-6853>

*ДМИТРИВ Ігор Васильович*, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільний транспорт, Національний університет «Львівська політехніка», e-mail: [dmytriv\\_igor@ukr.net](mailto:dmytriv_igor@ukr.net) <https://orcid.org/0000-0002-5107-7273>

*КОЗЛОВ Ростислав Русланович*, аспірант, кафедра машинобудування, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, e-mail: [rowrost@gmail.com](mailto:rowrost@gmail.com) <https://orcid.org/0009-0006-3291-1126>

*СРУХ Євгеній Ігорович*, аспірант, кафедра машинобудування, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, e-mail: [blackmamba0130@gmail.com](mailto:blackmamba0130@gmail.com) <https://orcid.org/0009-0002-8229-5377>

*Ruslan PUZYR*, Doctor of Technical Sciences, Professor of Automobiles and Tractors Department, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, e-mail: [puzyruslan@gmail.com](mailto:puzyruslan@gmail.com) <https://orcid.org/0000-0001-9791-9002>

*Dmytro SAVIELOV*, PhD in Engineering, associate professor of Mechanical Engineering Department, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, e-mail: [dvsavelov@gmail.com](mailto:dvsavelov@gmail.com) <https://orcid.org/0000-0002-5170-9621>

*Roman KACHMAR*, PhD in Engineering, associate professor of Road Transport Department, Lviv Polytechnic National University, e-mail: [roman.y.kachmar@lpnu.ua](mailto:roman.y.kachmar@lpnu.ua) <https://orcid.org/0000-0002-5440-6853>

*Igor DMYTRIV*, PhD in Engineering, associate professor of Road Transport Department, Lviv Polytechnic National University, e-mail: [dmytriv\\_igor@ukr.net](mailto:dmytriv_igor@ukr.net) <https://orcid.org/0000-0002-5107-7273>

*Rostislav KOZLOV*, postgraduate of Mechanical Engineering Department, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, e-mail: [rowrost@gmail.com](mailto:rowrost@gmail.com) <https://orcid.org/0009-0006-3291-1126>

*Yevgeniy YERUH*, postgraduate of Mechanical Engineering Department, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, e-mail: [blackmamba0130@gmail.com](mailto:blackmamba0130@gmail.com) <https://orcid.org/0009-0002-8229-5377>

Дата надходження статті до видання: 15.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 31.10.2025

DOI 10.36910/automash.v2i25.1932