

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2\(44\)-27-41](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-27-41)

УДК 621.7.043

Руслан Григорович Пузир¹, Ростислав Русланович Козлов²

¹доктор технічних наук, професор кафедри автомобілів і тракторів
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського (Кременчук, Україна)

E-mail: puzyruslan@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9791-9002>ResearcherID: [K-4287-2018](https://orcid.org/0000-0001-9791-9002). SCOPUS Author ID: <https://surl.li/doglqs>

²аспірант кафедри машинобудування
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського (Кременчук, Україна)

E-mail: rovrost@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3291-1126>**АНАЛІТИЧНЕ ФОРМУЛЮВАННЯ МАТЕРІАЛУ ЗАГОТОВОК
ЗІ ЗВАРНИМ ШВОМ ПІД ЧАС ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ**

Показано, що зварні конструкції широко використовуються в автомобільній та машинобудівній промисловості. Однак під час їх пластичного деформування теоретично складно спрогнозувати поведінку та руйнування таких заготовок. Для спрощення аналітичних розрахунків на основі методу січних модулів запропоновано модель матеріалу заготовки, яка враховує геометрію зварного шва та його механічні характеристики. Наведено конкретний процес формозмінення та застосування отриманої моделі матеріалу в аналітичних рівняннях для розрахунку напруженого стану. Проведено та проаналізовано порівняння результатів розрахунку для того ж самого процесу для заготовок зі зварним швом та без нього.

Ключові слова: роздавання; асиметрія; пуансон; зварний шов; трубна заготовка; напружений стан; січний модуль.

Рис.: 6. Бібл.: 25.

Актуальність теми дослідження. Пластична деформація зварних заготовок викликає неоднорідний напружений стан, який складно прогнозувати в аналітичних моделях різних процесів формоутворення [1]. Зварний шов накладає на механічні властивості заготовки різку анізотропію властивостей, яка зумовлена наявністю самого шва та навколо шовної зони [2]. Тому аналітичні моделі розрахунку напруженого стану заготовки під час пластичної деформації не достатньо розвинені або мають значну складність для їх застосування [3]. Переважно отримали розвиток чисельні моделі деформування заготовок зі зварним швом, але їх використання обумовлене певною операцією та результати такого моделювання не можуть бути використані для інших процесів [4]. Тому актуальним залишається завдання аналітичного представлення механічних властивостей зварної конструкції загалом для формування та реалізації математичних моделей пластичного формування. Такий підхід спростить розрахунок зварних виробів та надасть прості інженерні моделі для застосування у виробничій практиці.

Постановка проблеми. На даний час з розвитком лазерного зварювання, технологій «Tailored Blanks», «Tailored strips», «Tailored Orbitals» та ін., які дозволяють з'єднувати метали з різними механічними властивостями та товщиною, гостро стоїть проблема дослідження розподілу напружень та деформацій зварної конструкції під час її пластичного формозмінення. Такі системи застосовуються в автомобільній промисловості під час виготовлення бічних панелей, дверей, колісних арок, лонжеронів та підлог. У всьому світі автомобільна промисловість використовує зварні конструкції з різнорідних металів для економії дорогих сплавів та зменшення ваги транспортного засобу. Дослідження показують, що зменшення ваги автомобіля лише на 1 % призводить до зниження витрати палива на 0,6–1,0 % [5; 6]. Також вирішується завдання високоефективного захисту водія та пасажирів автомобіля під час аварійних ситуацій із зіткненням. Частина деталі, яка працює на захист, виробляється з більш міцного сплаву, а частина, яка повинна поглинати енергію удару та пластично деформуватися – з іншого, менш міцного матеріалу. Конкретним прикладом такого застосування є середня стійка кузова автомобіля. Верхня частина стійки виробляється з високоміцної сталі – вона повинна захистити пасажирів автомобіля. У нижній третині стійки застосовується сталь з меншою межею міцності для розсіювання ене-

ргії удару за рахунок кращих пластичних властивостей [7]. Таким чином, переважна більшість деталей автомобілів отримується шляхом зварювання, які потім деформуються пластично. Однак достатньо простих розрахункових моделей для прогнозування поля напружень та деформацій практично не існує. Автовиробники вирішують такі завдання, застосовуючи чисельне моделювання в різних програмних продуктах. Аналітичні моделі мають складні формулювання, де заготовка поділяється на декілька зон і до кожної з них наводиться притаманне рішення. Тому актуальним є завдання теоретичного опису розподілу напружень під час пластичного деформування зварних конструкцій. Такі рішення нададуть змогу прогнозувати розподіл деформацій у всьому напівфабрикаті, включаючи і зону зварного шва, передбачати руйнування заготовки ще перед операцією формозмінення та знаходити шляхи зменшення дії руйнівних напружень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зварні комбіновані деталі використовуються також і у вузлах пасивного захисту транспортного засобу, так званих «краш боксед» бамперів та лонжеронів (рис. 1) [8]. Вони приходять на заміну конструкцій, з'єднаних точковим зварюванням.

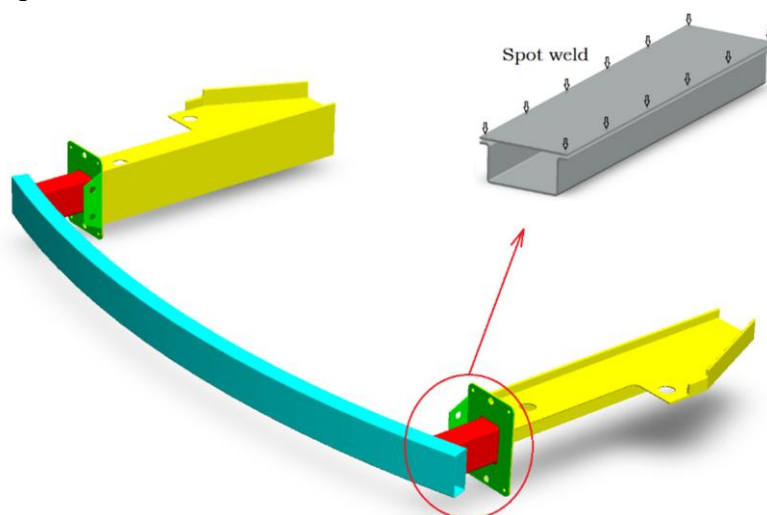


Рис. 1. Конструкція «crash box» лонжеронів автомобіля [8]

Майже в усіх галузях промисловості застосовуються трубні та циліндричні елементи зі зварним швом, які потім формуються у необхідний виріб. Трубні комбіновані елементи, зварені за технологією «Tailored Orbitals», яка поєднує труби різних діаметрів, товщин та матеріалів, можуть використовуватися як елементи витяжних систем та систем кондиціонування, елементів конструкції автомобіля: розпірки, труби посилення, приладові панелі, демпфери, підвіска тощо (рис. 2) [7].

Класичним прикладом пластичної деформації циліндричної заготовки зі зварним швом є виготовлення ободів коліс транспортних засобів. За технологією радіально-ротарційного профілювання лист металу скручується в обичайку, кінці якої приварюються один до одного за допомогою контактного зварювання. Після охолодження та обрізання грату така заготовка передається до лінії профілювальних машин, де за 3-4 операції вона набуває заданого профілю ободу колеса (рис. 3).

Під час набуття профілю циліндричною заготовкою може відбуватися локалізація деформацій та руйнування напівфабрикату в зоні зварного шва, навколо шовної зони або у зоні термічного впливу. З'являється осьова тріщина й заготовка відбраковується. За даними дослідників [9; 10] об'єм бракованих ободів коліс, пов'язаний із порушенням герметичності матеріалу зварного шва і навколо шовної зони, становить 29-37 %. З цього числа на розрив безпосередньо зварного шва приходить до 80 % браку, на розрив навколо

шовної зони близько 17–19 %, на комбінований розрив, коли порушується суцільність зварного шва та навколошовної зони, близько 2–3 %, розрив основного матеріалу заготовки виникає надзвичайно рідко.

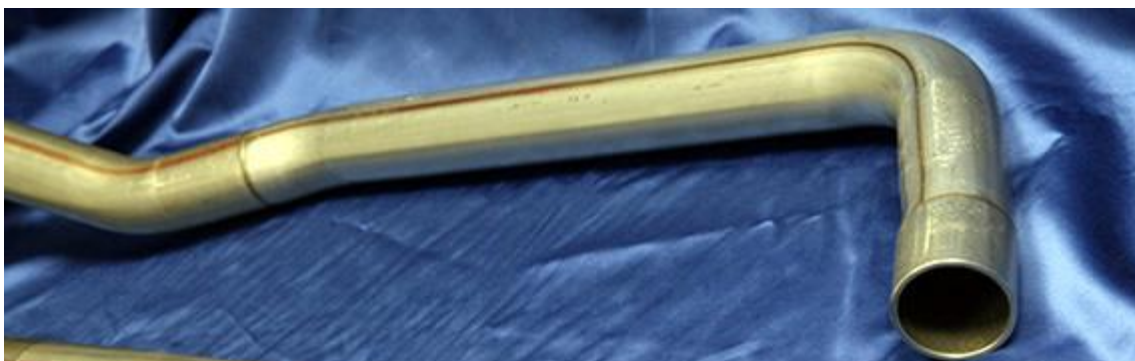


Рис. 2. Трубний елемент вихлопної системи автомобіля, виготовлений за технологією «Tailored Orbitals»[7]



а



б



в



г

Рис. 3. Виготовлення сталюго ободу колеса:

а – заготовка зі зварним швом для ободу колеса після охолодження ; б – роздавання заготовки на першому переході; в – напівфабрикат ободу колеса після декількох переходів профілювання; г – готові ободи коліс з ніпельним отвором

Джерело: розроблено авторами.

На рис. 4 зображено відбраковані напівфабрикати ободів сталюгих коліс унаслідок руйнування зони зварного з'єднання під час технологічного процесу радіально-ротаційного профілювання. Причому руйнування може відбуватися як на першому переході під час двостороннього роздавання кінців циліндра, так і під час наступних переходів профі-

лювання. Ймовірно, якщо зона зварного шва не має технологічних пошкоджень, то в результаті накопичення деформацій під час технологічного процесу виникає їх локалізація та руйнування металу у зоні зі зміненими механічними характеристиками, якою вона і є.



Рис. 4. Руйнування зварного шва у процесі пластичної деформації циліндричної заготовки ободу колеса

Джерело: розроблено авторами.

Як зазначається у [9], до основних причин руйнування зварних швів належить наявність після зварювання ряду зон із низькими пластичними властивостями і невисокою ударною в'язкістю НШЗ (навколошовна зона), яка має велике зерно – це зона перегріву. Також у результаті зварювання виробів з вуглецевих та легованих сталей під час нагрівання до критичних температур відбуваються фазові перетворення зі зміною типу кристалічної решітки та утворенням фази, що володіє великим питомим об'ємом та іншим коефіцієнтом лінійного розширення. У легованих сталях під час прискореного охолодження перетворення структур нагріву йде не з утворенням вихідної до нагріву структури, а з формуванням так званих гартувальних структур, що мають великий питомий об'єм, більш високу твердість, крихкість і знижену пластичність. Такі перетворення супроводжуються виникненням структурних напружень, які в непластичних сплавах можуть призвести до утворення тріщин [11].

На думку дослідників [12; 13] деформація зварного з'єднання здійснюється в такий спосіб. На першому етапі пластичної течії ($0,05\% < \epsilon < 1,3\%$) спостерігається локалізація деформації в зоні термічного впливу у вигляді вузьких мезополос та виникнення в основному металі смуг Людерса. Другий етап ($1,3\% < \epsilon < 5,5\%$) пов'язаний із розвитком у зоні основного металу, що прилягає до зони термічного впливу, сукупності мезополос локалізованої деформації. Третій етап ($5,5\% < \epsilon < 16\%$) є заключним і пов'язаний із деформацією основного металу та подальшим руйнуванням у місці утворення «шийки».

У зварному з'єднанні є межі розділу між зонами металу з різними механічними властивостями, які впливають на розподіл напружень і деформацій у ньому. Характер зародження та подальшого розвитку пластичної течії залежить від співвідношення між концентрацією напружень поблизу меж розділу зон зварного з'єднання. У роботах [14; 15] досліджувалося зварне з'єднання на мезорівні. Показано, що на пружній стадії навантаження кордони між зернами є джерелами концентрації напружень. Концентрація напружень у прикордонних областях тим більша, чим більша різниця пружних характеристик

зон, що контактують. Найбільша різниця механічних властивостей спостерігається в перехідних зонах ЗШ/ЗТВ (зварного шва/зона термічного впливу) та ЗТВ/ОМ (зона термічного впливу/основний метал). Таким чином, області меж розділу ЗШ/ЗТВ та ЗТВ/ОМ автоматично є областями високої концентрації напружень.

У роботі [16] досліджувалось методом скінченоелементного аналізу стикове зварне з'єднання з одностороннім зварним швом. Визначалось зусилля, що розтягує, необхідне для руйнування бездефектного з'єднання та з'єднань із різними видами дефектів. Показано, що зварний шов без дефектів зварювання отримує пошкодження та руйнування в зоні термічного впливу під кутом 60° до лінії горизонту (рис. 5).

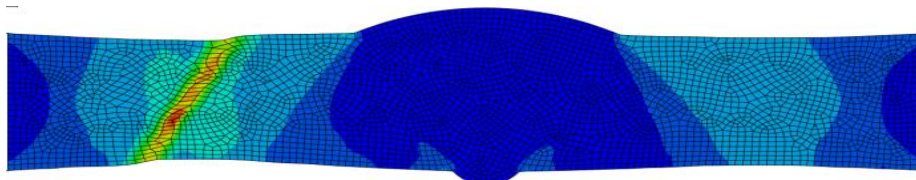


Рис. 5. Руйнування зони термічного впливу у звареній листовій заготовці під дією зусилля, що розтягує [16]

Наведений критичний огляд за літературними даними показав, що деталі зі зварним швом використовуються в різних галузях промисловості для зменшення ваги конструкцій, раціонального використання матеріалу, зміцнення навантажених зон та покращення захисних властивостей протекторів. Зварний шов – це необхідний елемент технологічного процесу виготовлення різноманітних деталей методами пластичного формування конструкцій, наприклад таких, як ободи коліс транспортних засобів та елементи кузова транспортного засобу. Зазначено, що під час пластичного формозмінення зварна заготовка деформується, загалом, як суцільна, але з-за зміни механічних характеристик зони зварного з'єднання може виникати локалізація деформацій і руйнування цієї ділянки. Механічні характеристики матеріалу заготовки змінюються за рахунок термічно-силового впливу в зоні шва, навколошовній зоні та зоні термічного впливу. Причому залежно від способу зварювання та марки сплаву ці зони можуть мати різні межі міцності, текучості та твердості і загалом відрізнятися за цими властивостями від основного матеріалу деталі. Проведений аналіз ще раз обґрунтовує складність теоретичного представлення пластичної деформації зварених конструкцій. Проте дослідження в цьому напрямку проводяться та удосконалюються.

Так, під час експандування зварених труб вводиться додатковий коефіцієнт пластичної деформації, який враховує механічні характеристики зварного шва [17]. У [18] чисельним моделюванням у програмному комплексі ANSYS показані навантаження на зварний шов та поведінка зварної конструкції у цілому. Для формування математичної моделі деформування зварних конструкцій дослідники [20] використовують метод Тягучі та генетичні алгоритми. У [21] наведено критерії руйнування зварених заготовок під час пластичних деформацій – $a_{11}s_1^2 + a_{22}s_2^2 + a_{33}s_3^2 + 2a_{12}s_1s_2 + 2a_{13}s_1s_3 + 2a_{23}s_2s_3 + a_1s_1 + a_2s_2 + a_3s_3 = 1$, де кожна складова формули обчислюється емпірично за дослідними даними.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. З вищевикладеного випливає, що зварна конструкція пластично деформується по-різному. Одні ділянки заготовки, які мають більшу межу текучості залишаються у пружному стані, в той час як інші вже перебувають у пластичному. Складність теоретичного обґрунтування переходу заготовки зі зварним швом у пластичний стан підтверджується застосованими методами для такого аналізу – метод Тягучі, методи генетичних алгоритмів та емпіричних коефіцієнтів. З метою спрощення аналітичних формулювань для розрахунку напруженого

стану зварної заготовки під час пластичного формозмінення запропоновано підхід, який заснований на використанні у математичній моделі січних модулів основного металу та металу зварного шва. Такий підхід надасть змогу врахувати пластичні характеристики та степінь деформації конструкції у цілому та виявити технологічні фактори процесу деформування, за рахунок яких можна впливати на величину руйнівних напружень.

Мета дослідження. Аналітичне моделювання матеріалу заготовки зі зварним швом для реалізації моделі в математичних представленнях пластичного деформування конструкцій машинобудування, напруженого та деформованого станів з урахуванням механічних властивостей основного металу та зони зварного з'єднання, що надасть змогу прогнозувати розподіл напружень та деформацій, а також можливість руйнування заготовки під час проектування технологічних процесів формозмінення та вносити необхідні корективи. Для досягнення поставленої мети були вирішені такі завдання:

- аналітичне формулювання механічних властивостей зварної заготовки, як конструкції загалом, для подальшого застосування її в аналітичних та інженерних моделях пластичного формозмінення;
- апробація отриманих залежностей для конкретного технологічного процесу пластичного деформування;
- формування рекомендацій щодо використання отриманої моделі матеріалу та проведення порівняльного аналізу з існуючими розрахунковими даними.

Виклад основного матеріалу. Врахування анізотропії заготовки, яку вносить зварний шов та зона термічного впливу, під час аналітичного розрахунку поля напружень залишається складним завданням теоретичного аналізу. Термічне навантаження на матеріал, яке викликано процесом зварювання, призводить до зміни механічних властивостей та внутрішньої структури сталі (розпад аустеніту, мартенситне та бейнітне перетворення), у зоні термічного впливу може формуватися бейнітно-мартенситна структура [21]. Ці внутрішні перетворення формують певні механічні характеристики на ділянці зварювання та хвилеподібно змінюють межу пластичності, межу міцності та відносне подовження матеріалу заготовки.

Тому для проектування технологічного процесу пластичної деформації заготовок зі зварним швом першочергово проводять механічні випробування для визначення твердості, межі текучості та межі міцності, ударної в'язкості ділянок зварного шва та зони термічного впливу. Потім порівнюють отримані результати з механічними характеристиками основного металу та вносять, якщо необхідно, корегування в технологію.

Під час пластичної деформації різке змінення механічних властивостей металу викликає зростання або зменшення величини напружень, необхідних для переходу металу зварної зони у пластичний стан. Це, в свою чергу, може привести до втрати стійкості недеформованої частини заготовки або утворення гофрів у тангенціальному напрямку, а також до локалізації деформацій та появи тріщини в меридіональному напрямку. Тому розрахунок поля напружень з урахуванням механічних властивостей зони зварного шва дозволить передбачити ці негативні явища та спрогнозувати положення зварного шва відносно до інструменту. Моделюємо матеріал заготовки, використовуючи метод січних модулів, для конкретного технологічного процесу пластичного деформування – роздавання циліндричних заготовок конічним пуансоном. Подібно до модуля пружності, що характеризує зміцнення матеріалу в пружній області, в пружно-пластичній області також існують показники інтенсивності зміцнення. Найбільше застосування в розрахунках на міцність знайшли дотичний та січний модулі.

Основною деформацією під час роздавання є тангенціальна складова, тому механічні характеристики зони зварного шва розглядаємо в цьому напрямку. У дослідженні [22] було отримано рівняння для розрахунку січного модулю металу зі зварним швом:

$$E_y = E_{об} \left(1 \pm \frac{E_{шв} F_{шв}}{E_{об} a_{шв} s} \right), \quad (1)$$

де E_y – січний модуль заготовки зі зварним швом по тангенціальному шляху.

Враховуючи наведену формулу можна зауважити, що січний модуль заготовки зі зварним швом залежить від січного модуля матеріалу заготовки $E_{об}$, який помножений на коефіцієнт у дужках. Він буде більше за одиницю, якщо механічні характеристики матеріалу шву будуть вищими за основний метал, та менше за одиницю – якщо навпаки. Січні модулі зварного шва $E_{шв}$ та основного металу заготовки визначаються стандартними випробуваннями на розтягування. Якщо під час цього випробування з'ясується, що межа міцності, або екстрапольована межа текучості вища за значенням для металу зварного шва ніж для основного металу, то у формулі береться знак плюс.

Ще однією важливою складовою цієї формули є співвідношення площі поперечного перетину $F_{шв} = b_{шв} s$ зварного шва до добутку $a_{шв} s$, де $a_{шв}$ – довжина зварного шва; s – товщина стінки заготовки, що зварюється; $b_{шв}$ – ширина шва. Зрозуміло, що товщина заготовки скорочується, тому що знаходиться як у чисельнику, так і у знаменнику. Залишається співвідношення $b_{шв}/a_{шв}$. Тоді остаточно наведена залежність матиме вигляд

$$E_y = E_{об} \left(1 \pm \frac{E_{шв} b_{шв}}{E_{об} a_{шв}} \right). \quad (2)$$

Це найпростіше обчислювання площі поперечного перетину зварного шва, яке має певні спрощення. Залежно від типу зварної труби (прямошовні труби; труби зі спіральним швом) або способу зварювання обчислення площі поперечного перетину шва може змінюватися.

Таким чином, січний модуль зварної заготовки залежить від співвідношення січних модулів основного металу та шва, а також від його ширини та довжини, тобто від геометричних характеристик. Отже, варіювання технологічними режимами зварювання може призвести до збільшення ширини поперечного перетину шва і, як наслідок, до зростання (зменшення) січного модуля зварної оболонки. Довжина зварного шва входить у формулу (2) як знаменник. Якщо розглядати короткі обичайки, то на значення січного модуля цей параметр практично не впливає. Однак якщо зона пластичної деформації охоплює велику частину зварної конструкції, то довжина зварного шва зменшує величину коефіцієнта у дужках та спрямовує його до одиниці. При цьому значення січних модулів основного металу та металу заготовки зі зварним швом практично вирівнюються.

Січний модуль як характеристика зміцнення металу під час пластичної деформації дорівнює [23]

$$E_s = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}, \quad (3)$$

де σ_i – інтенсивність напружень в осередку деформації;

ε_i – інтенсивність деформацій в осередку пластичної деформації.

Інтерес викликає застосування отриманої залежності (2) у процесах пластичного деформування. Розглянемо спосіб роздавання зварних труб кінчним пуансоном. Запропоновано удосконалення такого способу шляхом створення несиметричного осередку деформації, де напруження зсуву викликають розвантаження стінок заготовки від дії розтягуючих тангенціальних напружень (рис. 6) [24]. Його використання якраз можливо для деформації зварних циліндричних виробів, де шов розташовується у зоні дії найбільших зсувних напружень, якщо його межа пластичності менша за межу текучості основного металу. Якщо ж навпаки – то його зона буде в місті дії найбільших тангенціальних деформацій.

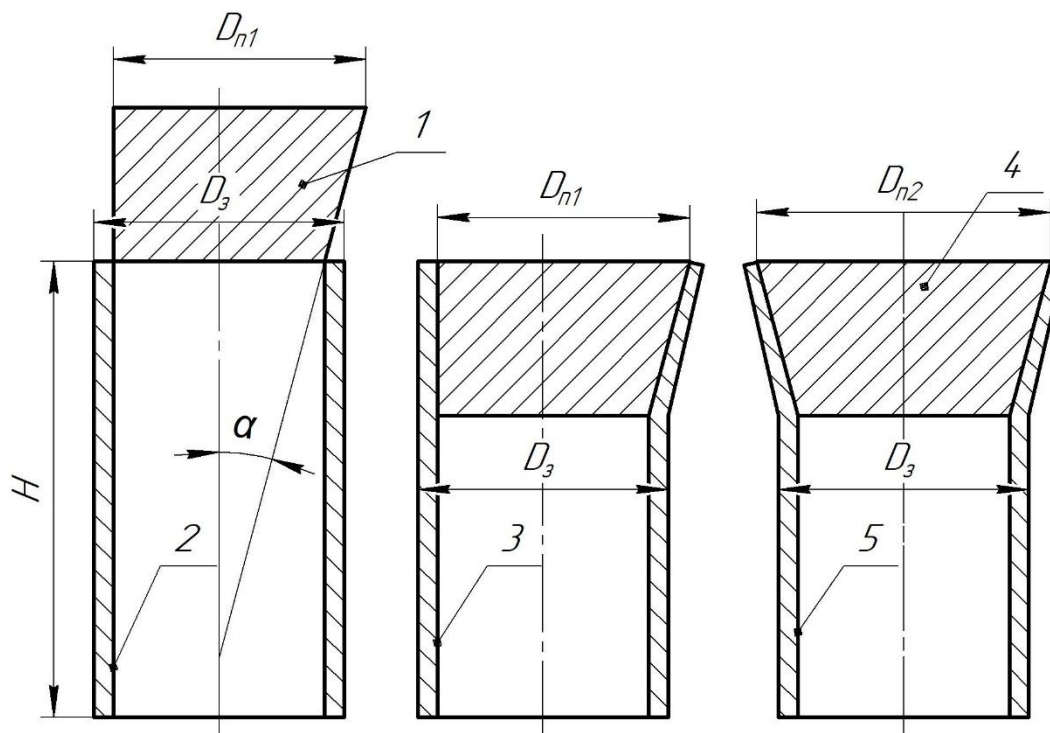


Рис. 6. Переходи роздавання асиметричним пуансоном:

a – заготовка та пуансон у початковому положенні; *б* – проміжний перехід роздавання; *в* – кінцевий перехід роздавання; 1 – асиметричний пуансон; 2 – заготовка; 3 – напівфабрикат; 4 – симетричний пуансон; 5 – готовий виріб

Джерело: розроблено авторами.

Інтенсивність напружень у первинному наближенні можна виразити через межу пластичності матеріалу заготовки σ_s . Інтенсивність деформацій наближено під час роздавання прирівнюється до відносної деформації в тангенціальному напрямку $\varepsilon_\theta = \frac{R-r_3}{r_3} = \frac{R}{r_3} - 1 = k_{\text{розд}} - 1$, оскільки ця деформація найбільша у порівнянні з двома іншими (меридіональною та радіальною). Тоді рівняння (3) буде мати вигляд

$$E_s = \frac{\sigma_s}{k_{\text{розд}} - 1}. \quad (4)$$

Переходячи до формулювань, які описують напружений стан під час несиметричного роздавання, для трубної заготовки зі зварним швом будемо мати такі рівняння [25]:

– меридіональні напруження для конічної ділянки заготовки

$$\sigma_\varphi = - \frac{R_u E_{o\bar{o}} (k_{\text{розд}} - 1) \left(1 \pm \frac{E_{\text{шв}} b_{\text{шв}}}{E_{o\bar{o}} a_{\text{шв}}} \right) \cos \theta}{2\rho \sin \alpha} \left(\frac{R_u}{\rho} - 1 \right); \quad (5)$$

– тангенціальні напруження для конічної ділянки

$$\sigma_\theta = E_{o\bar{o}} (k_{\text{розд}} - 1) \left(1 \pm \frac{E_{\text{шв}} b_{\text{шв}}}{E_{o\bar{o}} a_{\text{шв}}} \right) \left(1 - \frac{R_u^2}{2\rho^2} \left(\frac{\cos \theta}{\sin \alpha} + \frac{2}{3} \sin \theta \right) - \frac{R_u}{2\rho} \frac{\cos \theta}{\sin \alpha} \right); \quad (6)$$

– меридіональні напруження для циліндричної ділянки заготовки

$$\sigma_{\varphi} = \frac{x^2 E_{об} (k_{розд} - 1) \left(1 \pm \frac{E_{ув} b_{ув}}{E_{об} a_{ув}} \right)}{2a^2} \times \left(\left(\frac{R_u \cos \theta}{2\rho \sin \alpha} \left(\frac{R_u}{\rho} - 1 \right) + \frac{R_u^2}{3\rho^2} \sin \theta \right) - \frac{a}{x} \cos \theta \right); \quad (7)$$

– тангенціальні напруження для циліндричної ділянки

$$\sigma_{\theta} = E_{об} (k_{розд} - 1) \left(1 \pm \frac{E_{ув} b_{ув}}{E_{об} a_{ув}} \right) \left(1 - \frac{R_u \cos \theta}{2\rho \sin \alpha} \left(\frac{R_u}{\rho} - 1 \right) - \frac{2}{3} \frac{R_u^2}{2\rho^2} \sin \theta \right), \quad (8)$$

де σ_s – межа текучості металу заготовки;

ρ – поточний радіус;

θ – координата у тангенціальному напрямку;

R_u – найбільший радіус інструменту;

α – кут нахилу утворюючої конічного пуансону.

a – радіус заготовки;

x – координата в осьовому напрямку.

Порівняємо розрахунок компонент тензора напружень для двох варіантів заготовок – зі зварним швом та без нього. Розрахунок проведемо за такими параметрами: геометрія пуансона з прямолінійною твірною: діаметр верхньої основи - $D_n = 29$ мм; діаметр нижньої основи - $d_n = 21$ мм; кут нахилу твірної - $\alpha = 15^\circ$; висота пуансона - $l_n = 15$ мм; заготовка: діаметр зовнішній - $D_0 = 25$ мм; товщина стінки - $s = 2$ мм; висота - $l_s = 50$ мм. Матеріал заготовки моделювався наступними механічними характеристиками: питома вага $\rho = 2700$ кг/м³; межа плинності $\sigma_s = 50$ МПа; межа міцності $\sigma_b = 110$ МПа; відносне подовження $\delta = 50\%$; модуль Юнга $E = 70000$ МПа; коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,33$. Розрахунок ведемо за виразами (5) та (6) для зварної оболонки. Формули для розрахунку напруженого стану суцільної трубної обичайки отримані у [25] та мають вигляд

- меридіональні напруження

$$\sigma_{\varphi} = - \frac{R_u \sigma_s \cos \theta}{2\rho \sin \alpha} \left(\frac{R_u}{\rho} - 1 \right); \quad (9)$$

- тангенціальні напруження

$$\sigma_{\theta} = \sigma_s \left(1 - \frac{R_u^2}{2\rho^2} \left(\frac{\cos \theta}{\sin \alpha} + \frac{2}{3} \sin \theta \right) - \frac{R_u \cos \theta}{2\rho \sin \alpha} \right). \quad (10)$$

Наведемо результати для найбільш характерних зон: $\theta = 0^\circ$, $R_u = \rho$. Приймаємо, що шов має меншу межу текучості ніж основний метал. За дослідами на розтягування отримано значення $\sigma_s = 42$ МПа, тоді за формулою (5)

$$\sigma_{\varphi} = - \frac{14,5 \cdot 132(1,38 - 1) \left(1 - \frac{110 \cdot 0,002}{132 \cdot 0,5} \right) \cdot 1}{2 \cdot 14,5 \cdot 0,26} \left(\frac{14,5}{14,5} - 1 \right) = 0 \text{ МПа,}$$

та за формулою (9)

$$\sigma_{\varphi} = - \frac{14,5 \cdot 50 \cdot 1}{2 \cdot 14,5 \cdot 0,26} \left(\frac{14,5}{14,5} - 1 \right) = 0 \text{ МПа,}$$

що збігається з прийнятими допущеннями.

За формулами (6) та (10) відповідно

$$\sigma_{\theta} = 132(1,38 - 1) \left(1 - \frac{110 \cdot 0,002}{132 \cdot 0,5} \right) \left(\frac{14,5^2}{2 \cdot 14,5^2} \left(\frac{1}{0,26} + 0 \right) + \frac{14,5}{2 \cdot 14,5} \cdot \frac{1}{0,26} - 1 \right) = 138,9 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\theta} = 50 \cdot \left(\frac{14,5^2}{2 \cdot 14,5^2} \left(\frac{1}{0,26} + 0 \right) + \frac{14,5}{2 \cdot 14,5} \cdot \frac{1}{0,26} - 1 \right) = 142,3 \text{ МПа}.$$

Для $\theta = 90^\circ$, $R_u = \rho$ маємо для меридіональних напружень $\sigma_{\varphi} = 0$ – гранична умова на торці заготовки для двох варіантів. Для тангенціальних напружень отримаємо такі результати

$$\sigma_{\theta} = 132(1,38 - 1) \left(1 - \frac{110 \cdot 0,002}{132 \cdot 0,5} \right) \left(1 - \frac{14,5^2}{2 \cdot 14,5^2} \left(\frac{0}{0,26} - \frac{2}{3} \right) - \frac{14,5}{2 \cdot 14,5} \cdot \frac{0}{0,26} \right) = 32,3 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\theta} = 50 \cdot \left(1 + \frac{14,5^2}{2 \cdot 14,5^2} \left(\frac{0}{0,26} - \frac{2}{3} \right) - \frac{14,5}{2 \cdot 14,5} \cdot \frac{0}{0,26} \right) = 33,3 \text{ МПа}.$$

Проведений розрахунок показав, що зниження механічних характеристик зварного шва в загалом впливає на величину компонент тензора напружень. У осередку деформації для характерних зон величина тангенціальних напружень зменшується на 2,2 % та на 3 % для $\theta = 0^\circ$ та $\theta = 90^\circ$ відповідно, що підтверджує чутливість моделі зварної заготовки до зміни механічних властивостей зварного з'єднання.

Січні модулі пластичності $E_{об}$ та $E_{ув}$ визначаються стандартними випробуваннями на одновісне розтягування вирізаних зразків у кожному конкретному випадку. Виходячи з отриманих виразів, можна розрахувати величину напружень улюбій точці ділянки заготовки, яка роздається. Координата ρ характеризує змінення величини напружень у меридіональному напрямку, починаючи від торця заготовки, де $\rho = R_u$ та закінчуючи зоною передачі зусилля де $\rho = r_z$. Окружна координата θ визначає змінення напружень у тангенціальному напрямку.

Висновки. У роботі представлено аналітичний вираз для розрахунку січного модуля матеріалу заготовки зі зварним швом, який враховує зміцнення основного металу та зони зварного шва під час пластичного формозмінення. Відповідно до прийнятого допущення, яке визначається виразом (2), механічні властивості матеріалу зварної заготовки у пластичній зоні усереднюють по всьому поперечному перетину й розглядаються в розрахунках як такі, що притаманні цього матеріалу конструкції. Цей прийом значно спрощує аналітичний розрахунок зварних заготовок, не розділяючи на окремі компоненти деформацію зварного шва та деформацію частини оболонки.

Наведено математичну модель розрахунку напруженого стану трубної заготовки зі зварним швом під час асиметричного роздавання конічним пуансоном. Показано, що використання отриманого аналітичного виразу для матеріалу заготовки зі зварним швом забезпечує достатню простоту формлювань, які у явному вигляді надають досліднику набір технологічних інструментів (факторів) для керування напруженим станом ділянок заготовки, яка піддається асиметричному роздаванню. Аналіз такої моделі показав, що рівень виникаючих напружень під час пластичної деформації заготовки залежить не тільки від співвідношення січних модулів основного металу та зварного шва, але також від геометрії самого шва, тобто від співвідношення $b_{ув}/a_{ув}$.

Проведено порівняльний розрахунок напруженого стану під час асиметричного роздавання трубної заготовки зі зварним швом та без нього. При цьому брали припущення, що межа текучості зони зварного з'єднання менша за межу текучості оболонки на 16 %.

Отримані результати показали чутливість математичної моделі для розрахунку напруженого стану під час асиметричного роздавання щодо зміни механічних характеристик заготовки. Це, в свою чергу, дає можливість рекомендувати отримані залежності для інженерних моделей прогнозування напруженого та деформованого станів зварних конструкцій під час роздавання циліндричних виробів.

Наступним етапом досліджень планується проведення експериментальних дослідів для уточнення прийнятих допущень та математичних моделей.

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання тексту статті.

Під час написання цього матеріалу автор(и) використовували [ГЕНЕРАТИВНИЙ ШІ / DEEPSEEK CHAT / ДЛЯ ОФОРМЛЕННЯ СПИСКУ ЛІТЕРАТУРИ В СТИЛІ АРА ТА ДОПОМОГИ У ФОРМУВАННІ РОЗШИРЕНОЇ АНОТАЦІЇ] - [ЕКОНОМІЯ ЧАСУ ДЛЯ ОФОРМЛЕННЯ ПУБЛІКАЦІЇ]. Після використання цього інструменту/сервісу автори переглянули та відредагували зміст і взяли на себе повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Ayadi, A., Cherouat, A., Rezgui, M., & Mezghani, N. (2009). Experimental and Numerical Studies of Welded Tubes Formability. *Materials Science Forum*, 614, 129-134.
2. He, Z., Ruan, X., Liang, J., Ning, J., Lin, Y., & Chen, K. (2024). The Development of a Continuous Constitutive Model for Thin-Shell Components with A Sharp Change in the Property at Welded Joints. *Materials*, 17(8), 1796. <https://doi.org/10.3390/ma17081796>
3. Khalfallah, A. (2014). Experimental and numerical assessment of mechanical properties of welded tubes for hydroforming. *Materials & Design*, 56, 782-790. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.051>.
4. Fan, L., Gao, Y., Yan, J.X., & Yun, J.B. (2014). Deformation Characteristic Analysis on Mechanical Expanding of Large Diameter Welding Pipe. *Applied Mechanics and Materials*, 623, 125-128. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.623.125>.
5. Auto/Steel Partnership. (2001). *TWB Applications and Manufacturing* (pp. 9, 12, 43). Southfield MI, USA: Auto/Steel Partnership.
6. Пузырь, Р. Г., Левченко, Р. В., & Мосьпан, Д. В. (2011). Влияние автомобильного транспорта на окружающую среду и пути уменьшения вредных выхлопов путем совершенствования технологии и машин для профилирования. In *Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Ідеї академіка Вернадського та науково-практичні проблеми стійкого розвитку регіонів»* (pp. 108–110). КрНУ.
7. BAOSTEEL. (n.d.). *Tailored Blanks*. <https://www.tailored-blanks.com/en>.
8. Ciubotariu, V. A., Radu, M. C., Herghelegiu, E., Zichil, V., Grigoras, C. C., & Nechita, E. (2022). Structural and behaviour optimization of tubular structures made of tailor welded blanks by applying taguchi and genetic algorithms methods. *Applied Sciences*, 12(13), 6794. <https://doi.org/10.3390/app12136794>.
9. Бойко, Ю. О. (2011). *Удосконалення технології формозміни зварних циліндричних заготовок при профілюванні та повздожньому обтиску з осадкою* [Дисертація кандидата технічних наук, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського].
10. Янчук, О.С. (2022). *Вдосконалювання технології виготовлення колеса легкового автомобіля шляхом комп'ютерного моделювання процесу* [Дипломна робота магістра]. Хмельницький національний університет.
11. Ren, J., Yue, Y., Zhang, X., Yang, Z., Liu, Z., Dong, Y., Ma, J., Liu, C., & Ma, J. (2025). Investigation of Welding-Induced Residual Stresses in a Herringbone Column Using the Blind Hole Technique: An Experimental and Numerical Study. *Buildings*, 15(3), 398. <https://doi.org/10.3390/buildings15030398>.
12. Махненко, В.И. (1976). *Расчетные методы исследования кинетики сварочных деформаций и напряжений*. Наукова Думка.

13. Yang, L., Chuai, R., & Cai, G. (2024). Ultrasonic Non-Destructive Testing and Evaluation of Stainless-Steel Resistance Spot Welding Based on Spiral C-Scan Technique. *Sensors*, 24(14), 4771. <https://doi.org/10.3390/s24144771>.
14. Yuan, D., Cui, C., Zhang, Q., Li, Z., & Ye, Z. (2022). Fatigue damage evaluation of welded joints in steel bridge based on meso-damage mechanics. *International Journal of Fatigue*, 161, 106898. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106898>.
15. Muślewski, Ł., & Pająk, M. (2025). Methodological aspects of welded joint quality assessment. *Materials*, 18(9), 2148. <https://doi.org/10.3390/ma18092148>.
16. Johnson, G.R., & Cook, W.H. (1985). Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures, and pressures. *Engineering Fracture Mechanics*, 21, 31-48.
17. Лоскутов, О.Ю., Овсяников, В.В., Проців, В.В., & Григоренко, В.У. (2021). Процес експандування в технологіях виробництва труб великого діаметра для магістральних нафто- і газопроводів та металознавчі аспекти його використання. *Матеріалознавство та галузеве машинобудування*, 65, 99-106. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/65.099>.
18. Цибульник, М., Хоцевич, М., & Товбер, А. (2018). Stress-strain state simulation of welded plate. *Вісник Київського політехнічного інституту. Серія Приладобудування*, 56(2), 38-44.
19. Ciubotariu, V. A., Radu, M. C., Herghelegiu, E., Zichil, V., Grigoras, C. C., & Nechita, E. (2022b). Structural and behaviour optimization of tubular structures made of tailor welded blanks by applying taguchi and genetic algorithms methods. *Applied Sciences*, 12(13), 6794. <https://doi.org/10.3390/app12136794>.
20. Бойко, Ю.А. (2007). Выбор критериев разрушения сварной цилиндрической заготовки при профилировании. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського*, 5(46), Ч. 1, 42-46.
21. Костін, В.А., Позняков, В.Д., Берднікова, О.М., Жуков, В. В., Алексеенко, Т. О., & Алексеенко, І. І. (2020). Вплив структурних перетворень на механічні властивості зварних з'єднань броньових сталей. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, 4, 36-43.
22. Пузырь, Р., Сирая, Ю., & Дятловская, В. (2021). Моделирование материала цилиндрической заготовки со сварным швом при обжиге-раздаче деталей автомобилей. *Mechanics and Advanced Technologies*, 5(1), 130-135. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.1.218045>.
23. Пузырь, Р.Г. (2012). Определение длины волны затухания изгибающего момента при раздаче цилиндрической заготовки. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, 5(76), 64-66.
24. Пузырь, Р.Г., Левченко, Р.В., & Сирая, Ю.Б. (2017). Интенсификация процесса раздачи цилиндрической заготовки. *Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*, 43(1265), 39-42.
25. Козлов, Р.Р., Єрух, Є.І., Вакуленко, Р.А., Аргат, Р.Г., Пузир, Р.Г., & Сіра, Ю.Б. (2025). Визначення поля напружень, які діють на заготовку зі зварним швом під час несиметричного роздавання. *Матеріали XXXII Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства»* (с. 90). Кременчук: КрНУ.

References

1. Ayadi, A., Cherouat, A., Rezgoui, M., & Mezghani, N. (2009). Experimental and Numerical Studies of Welded Tubes Formability. *Materials Science Forum*, 614, 129-134.
2. He, Z., Ruan, X., Liang, J., Ning, J., Lin, Y., & Chen, K. (2024). The Development of a Continuous Constitutive Model for Thin-Shell Components with A Sharp Change in the Property at Welded Joints. *Materials*, 17(8), 1796. <https://doi.org/10.3390/ma17081796>.
3. Khalfallah, A. (2014). Experimental and numerical assessment of mechanical properties of welded tubes for hydroforming. *Materials & Design*, 56, 782-790. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.051>.
4. Fan, L., Gao, Y., Yan, J.X., & Yun, J.B. (2014). Deformation Characteristic Analysis on Mechanical Expanding of Large Diameter Welding Pipe. *Applied Mechanics and Materials*, 623, 125-128. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.623.125>.

5. Auto/Steel Partnership. (2001). *TWB Applications and Manufacturing* (pp. 9, 12, 43). Southfield MI, USA: Auto/Steel Partnership.

6. Puzyr, R.H., Levchenko, R.V., & Mospan, D.V. (2011). Vliyanie avtomobilnogo transporta na okruzhayushchuyu sredu i puti umensheniya vrednykh vykhlopov putem sovershenstvovaniya tekhnologii i mashin dlya profilirovaniya [The influence of automobile transport on the environment and ways to reduce harmful emissions by improving technology and machines for profiling]. *Idei akademika Vernadskoho ta naukovo-praktychni problemy stiikoho rozvytku rehioniv – Ideas of Academician Vernadsky and Scientific-Practical Problems of Sustainable Development of Regions: Proceedings of the 13th International Scientific and Practical Conference*. (pp. 108-110). Kremenchuk: KrNU.

7. BAOSTEIL. (n.d.). *Tailored Blanks*. <https://www.tailored-blanks.com/en>.

8. Ciubotariu, V.A., Radu, M.C., Herghelegiu, E., Zichil, V., Grigoras, C.C., & Nechita, E. (2022). Structural and Behaviour Optimization of Tubular Structures Made of Tailor Welded Blanks by Applying Taguchi and Genetic Algorithms Methods. *Applied Sciences*, 12(13), 6794. <https://doi.org/10.3390/app12136794>.

9. Boiko, Yu.O. (2011). Udoskonalennia tekhnolohii formozminy zvarnykh tsylindrychnykh zahotovok pry profiliuvanni ta povzdovzhnomu obtysku z osadkoiu [Improvement of the technology for forming welded cylindrical blanks during profiling and longitudinal compression with upsetting]. (Candidate's thesis, Mykhailo Ostrohradskyi Kremenchuk National University). Kremenchuk: KrNU.

10. Yanchuk, O.S. (2022). *Vdoskonalennia tekhnolohii vyhotovlennia koleasa lehkovo avtomobilia shliakhom kompiuternoho modeliuvannia protsesu [Improving the manufacturing technology of a passenger car wheel through computer process simulation]*. (Master's thesis, Khmelnytskyi National University).

11. Ren, J., Yue, Y., Zhang, X., Yang, Z., Liu, Z., Dong, Y., Ma, J., Liu, C., & Ma, J. (2025). Investigation of Welding-Induced Residual Stresses in a Herringbone Column Using the Blind Hole Technique: An Experimental and Numerical Study. *Buildings*, 15(3), 398. <https://doi.org/10.3390/buildings15030398>.

12. Makhnenko, V.I. (1976). Raschetnye metody issledovaniya kinetiki svarochnykh deformatsiy i napryazheniy [Calculation methods for studying the kinetics of welding deformations and stresses]. Kyiv: Naukova Dumka.

13. Yang, L., Chuai, R., & Cai, G. (2024). Ultrasonic Non-Destructive Testing and Evaluation of Stainless-Steel Resistance Spot Welding Based on Spiral C-Scan Technique. *Sensors*, 24(14), 4771. <https://doi.org/10.3390/s24144771>.

14. Yuan, D., Cui, C., Zhang, Q., Li, Z., & Ye, Z. (2022). Fatigue damage evaluation of welded joints in steel bridge based on meso-damage mechanics. *International Journal of Fatigue*, 161, 106898. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106898>.

15. Muślewski, Ł., & Pająk, M. (2025). Methodological Aspects of Welded Joint Quality Assessment. *Materials*, 18(9), 2148. <https://doi.org/10.3390/ma18092148>.

16. Johnson, G.R., & Cook, W.H. (1985). Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures, and pressures. *Engineering Fracture Mechanics*, 21, 31-48.

17. Loskutov, O.Yu., Ovsianikov, V.V., Protsiv, V.V., & Hryhorenko, V.U. (2021). Protses ekspanduvannia v tekhnolohiiakh vyrobnytstva trub velykoho diametra dlia mahistralnykh nafto- i hazoprovodiv ta metaloznavchi aspekty yoho vykorystannia [The expanding process in production technologies of large-diameter pipes for main oil and gas pipelines and metallurgical aspects of its use]. *Materialoznavstvo ta haluzeve mashynobuduvannia – Materials Science and Industrial Mechanical Engineering*, 65, 99-106. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/65.099>.

18. Tsybulnyk, M., Khotsevych, M., & Tovber, A. (2018). Stress-strain state simulation of welded plate. *Visnyk Kyivskoho politekhnichnoho instytutu. Serii Pryladobuduvannia – Bulletin of the Kyiv Polytechnic Institute. Series Instrument Making*, 56(2), 38-44.

19. Ciubotariu, V.A., Radu, M.C., Herghelegiu, E., Zichil, V., Grigoras, C.C., & Nechita, E. (2022). Structural and Behaviour Optimization of Tubular Structures Made of Tailor Welded Blanks by Applying Taguchi and Genetic Algorithms Methods. *Applied Sciences*, 12(13), 6794. <https://doi.org/10.3390/app12136794>.

20. Boiko, Yu.A. (2007). Vybory kriteriev razrusheniya svarnoy tsilindricheskoy zagotovki pri profilirovani [Selection of fracture criteria for a welded cylindrical blank during profiling]. *Visnyk Kremenchutskoho derzhavnogo politekhnichnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho - Bulletin of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, 5(46), Part 1, 42-46.

21. Kostin, V.A., Pozniakov, V.D., Berdnikova, O.M., Zhukov, V.V., Alekseenko, T.O., & Alekseenko, I.I. (2020). Vplyv strukturnykh peretvoren na mekhanichni vlastyivosti zvarnykh ziednan bronovykh stalei [Influence of structural transformations on the mechanical properties of welded joints of armor steels]. *Fiziko-khimichna mekhanika materialiv – Physical-Chemical Mechanics of Materials*, 4, 36-43.

22. Puzyr, R., Siraia, Y., & Diatlovska, V. (2021). Modelirovanie materiala tsilindricheskoy zagotovki so svarnym shvom pri obzhime-razdache detaley avtomobiley [Modeling the material of a cylindrical welded blank during compression-flaring of automotive parts]. *Mechanics and Advanced Technologies*, 5(1), 130-135. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.1.218045>.

23. Puzyr, R.H. (2012). Opredelenie dliny volny zatukhaniya izhibayushchego momenta pri razdache tsilindricheskoy zagotovki [Determination of the damping wavelength of the bending moment during flaring of a cylindrical blank]. *Visnyk Kremenchutskoho derzhavnogo politekhnichnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho – Bulletin of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, 5(76), 64-66.

24. Puzyr, R.H., Levchenko, R.V., & Siraia, Yu.B. (2017). Intensifikatsiya protsessa razdachi tsilindricheskoy zagotovki [Intensification of the flaring process of a cylindrical blank]. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Innovatsiini tekhnologii ta obladnannia obrobky materialiv u mashynobuduvanni ta metalurhii – Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative Technologies and Equipment for Materials Processing in Mechanical Engineering and Metallurgy*, 43(1265), 39-42.

25. Kozlov, R.R., Yerukh, Ye.I., Vakulenko, R.A., Arhat, R.H., Puzyr, R.H., & Sira, Yu.B. (2025). Vyznachennia polia napruzhen, yaki diiut na zahotovku zi zvarnym shvom pid chas nesymetrychnoho rozdavannia [Determination of the stress field acting on a welded blank during asymmetric flaring]. *Aktualni problemy zhyttiediialnosti suspilstva – Current Problems of Society's Life: Proceedings of the 32nd International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists*. (p. 90). Kremenchuk: KrNU.

Дата першого надходження статті до видання: 20.02.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 14.03.2026

UDC 621.7.043

Ruslan Puzyr¹, Rostyslav Kozlov²

¹Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automobiles and Tractors
Mykhailo Ostrohradskiy Kremenchuk National University (Kremenchuk, Ukraine)
E-mail: puzyruslan@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9791-9002>
ResearcherID: [K-4287-2018](https://orcid.org/0000-0001-9791-9002). SCOPUS Author ID: <https://surl.li/doglqs>

²Postgraduate student of the Department Mechanical Engineering
Mykhailo Ostrohradskiy Kremenchuk National University (Kremenchuk, Ukraine)
E-mail: rovrost@gmail.com. ORCID <https://orcid.org/0009-0006-3291-1126>

ANALYTICAL FORMULATION OF THE MATERIAL OF WELDED BLANKS DURING PLASTIC DEFORMATION

Modern mechanical engineering and the automotive industry widely use welded structures made of dissimilar metals, which allows reducing product weight by 1% and ensuring fuel savings of 0.6-1%. Tailored Blanks and Tailored Orbitals technologies are used for manufacturing side panels, doors, side members, wheel rims, and exhaust system components. However, predicting the behavior of such blanks during plastic deformation is complicated by the anisotropy of properties caused by the weld seam and the heat-affected zone.

Manufacturing practice shows that 29-37% of defects in wheel rim production are associated with the failure of the weld seam or the heat-affected zone. Thermal influence during welding induces phase transformations, the formation of martensitic structures, and changes in hardness and yield strength of the metal in the joint zone. The interfaces between the weld metal, the heat-affected zone, and the base metal become natural stress concentrators. Existing analytical models require dividing the blank into separate zones with individual equations, which overly complicates engineering calculations.

The aim of this work is the analytical modeling of the material of a welded blank for predicting the stress-strain state and assessing the risk of failure at the technology design stage, considering the mechanical characteristics of the base metal and the welded joint zone.

To simplify analytical calculations, the secant modulus method is proposed. An analytical expression was derived for determining the effective secant modulus of the entire welded blank material. This approach allows averaging the mechanical properties across the cross-section, treating the welded structure as quasi-homogeneous, which significantly simplifies the mathematical apparatus without losing physical adequacy. The model was tested for the process of asymmetric flaring of a cylindrical blank by a conical punch – an operation characteristic of manufacturing wheel rims. Analytical dependencies were obtained for calculating meridional and tangential stresses incorporating the proposed material model. A comparative calculation was performed for blanks with a weld seam (assuming the weld's yield strength is 16% lower than that of the base metal) and without a weld. The calculations confirmed the model's sensitivity: the reduction in weld strength leads to a decrease in tangential stresses by 2.2-3% in characteristic zones of the deformation zone.

The developed analytical model effectively accounts for the influence of the weld seam on the stress-strain state of the blank without complex division into separate zones. It was established that the stress level depends not only on the ratio of the strength characteristics of the materials but also on the geometric parameters of the welded joint (width and length of the weld). The obtained dependencies can be recommended for engineering calculations and predicting the technological reliability of manufacturing processes for welded cylindrical parts.

Keywords: flaring, punch; weld seam; tubular blank; stress state; secant modulus; heat-affected zone.

Fig.: 6. **References:** 25.